Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Influência da adição de dióxido de titânio (TiO_2) nas propriedades físico-mecânicas
de painéis MDP

Ana Caroline Margarido Valle

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

Ana Caroline Margarido Valle
Engenheira Industrial Madeireira

Influência da adição de dióxido de titânio (TiO_2) nas propriedades físico-mecânicas de painéis
MDP

Orientador:
Prof. Dr. **GERALDO BORTOLETTO JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Valle, Ana Caroline Margarido

Influência da adição de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) nas propriedades físico-mecânicas de painéis MDP / Ana Caroline Margarido Valle. - - Piracicaba, 2018.

51 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Painéis de partículas 2. Nanopartículas 3. Dióxido de titânio 4. Propriedades físico-mecânicas I. Título

Dedico este trabalho aos meus pais, por me permitirem trilhar novos caminhos.

Às minhas irmãs, pelo apoio incondicional.

À minha sobrinha Bia, pela alegria e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maria Inês e Vantuir, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, pois não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Assim como às minhas irmãs, pelos conselhos e companheirismo.

À ESALQ/USP, pela oportunidade de realizar o curso com a estrutura necessária para um bom aprendizado e desenvolvimento intelectual; e à CNPq pela bolsa concedida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Geraldo Bortoletto Júnior, pela orientação e capacidade em buscar o melhor dentro da resolução deste trabalho.

A todos os professores e funcionários da USP de Piracicaba pela dedicação, presteza e vontade de ajudar. Em especial ao Alex Canale que esteve presente me auxiliando no desenvolvimento do trabalho e ao Aparecido Siqueira pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Mariane, Caique, Flávia, as meninas da “Casa do seu Heleno” e ao Edipo pelo companheirismo, amizade, auxílio e estímulo.

A todos que fizeram e fazem parte da minha vida, e que de maneira direta ou indireta contribuíram para a minha formação e para o desenvolvimento deste trabalho, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. PAINÉIS À BASE DE MADEIRA	11
3.2. MDP – PAINEL DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE	12
3.2.1. <i>Fatores que influenciam as propriedades dos painéis MDP</i>	13
3.2.1.1. Espécie, densidade básica e extrativos	14
3.2.1.2. Massa específica e razão de compactação	14
3.2.1.3. Geometria das partículas	14
3.2.1.4. Adesivo	15
3.2.1.5. Ciclo de prensagem	16
3.2.2. <i>Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDP</i>	16
3.2.2.1. Teor de umidade, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura	16
3.2.2.2. Tração Perpendicular (Ligação Interna)	17
3.2.2.3. Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) à Flexão Estática	17
3.2.2.4. Arrancamento de Parafuso	18
3.2.2.5. Perfil de Densidade	18
3.3. INOVAÇÕES PARA PAINÉIS DE MADEIRA	18
3.3.1. <i>Uso de nanopartículas</i>	19
3.3.2. <i>Nanopartículas de Dióxido de Titânio (TiO₂)</i>	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1. MATÉRIAS-PRIMAS	25
4.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	25
4.3. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS	26
4.3.1. <i>Preparação das partículas</i>	26
4.3.2. <i>Preparação e aplicação do adesivo, TiO₂, nano-TiO₂ e parafina</i>	26
4.3.3. <i>Formação do colchão de partículas e prensagem dos painéis</i>	27
4.4. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS PAINÉIS	29
4.4.1. <i>Ensaio Físicos e Mecânicos</i>	30
4.4.2. <i>Obtenção dos perfis densitométricos dos painéis por atenuação de raios X</i>	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS	35
5.2. INCHAMENTO EM ESPESSURA E TAXA DE NÃO-RETORNO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS	36
5.3. FLEXÃO ESTÁTICA	37
5.4. LIGAÇÃO INTERNA	38
5.5. ARRANCAMENTO DE PARAFUSO	38
5.6. PERFIL DE DENSIDADE	39
6. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

RESUMO

Influência da adição de dióxido de titânio (TiO₂) nas propriedades físico-mecânicas de painéis MDP

A utilização de nanomateriais na produção de painéis de madeira se apresenta como uma inovação, pois uma revolução vem acontecendo na ciência e tecnologia desde o entendimento que os materiais em escala nanométrica podem apresentar novos comportamentos e/ou propriedades diferentes daquelas que geralmente apresentam em escala macroscópica. O presente projeto teve como objetivo a produção de painéis particulados de madeira de *Eucalyptus grandis* com adição em diferentes porcentagens de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) e dióxido de titânio em pó e avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas, tais como inchamento em espessura, teor de umidade e densidade das chapas, determinação do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática, adesão interna (tração perpendicular), arrancamento de parafuso de topo e superfície, conduzidos conforme a norma NBR 14810 (ABNT, 2013), além da obtenção do perfil de densidade pelo método não destrutivo de raio x. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, sendo constituído por 8 tratamentos com 4 repetições cada. Através deste experimento foram analisadas 3 proporções de nano-TiO₂ (1, 3 e 5%); 2 proporções de TiO₂ em pó (3 e 5%) e 2 tratamentos sem TiO₂ (com e sem adição de parafina). Mediante análise dos resultados dos ensaios concluiu-se que: para o ensaio de inchamento em espessura após 24h de imersão e taxa de não-retorno em espessura, tanto as nano-TiO₂ quanto o TiO₂ tiveram efeito negativo nos painéis, não atendendo às especificações da norma. Porém, para os ensaios mecânicos de ligação interna e arrancamento de parafuso – topo, a adição de TiO₂ em pó, sem adição de parafina, provocou um aumento significativo dessas propriedades, pois há relatos de melhoras em performances mecânicas, de força e adesivas deste composto. Para as demais propriedades físicas e mecânicas, todos os painéis obtiveram valores dentro dos limites estabelecidos pela NBR 14810 (ABNT, 2013).

Palavras-chave: Painéis de partículas; Nanopartículas; Dióxido de titânio; Propriedades físico-mecânicas

ABSTRACT

Influence of the addition of titanium dioxide (TiO₂) on the physical-mechanical properties of MDP panels

The use of nanomaterials in the production of wood panels is presented as an innovation because a revolution is going on in science and technology with the understanding that the materials at nanoscale may exhibit new behaviors and/or different properties from those generally present in macroscopic scale. The purpose of this research was the production of particulate panels of *Eucalyptus grandis* wood by adding different percentages of titanium dioxide nanoparticles (TiO₂), and titanium dioxide powder, and evaluation of its physical and mechanical properties such as thickness swelling, content moisture and density of the panels, static bending - modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE), internal bond, direct screw withdrawal conducted by NBR 14810 (ABNT 2013). The evaluation of the density profile of the panels was also performed by X-ray attenuation methodology. Eight treatments with 4 replicates were analyzed with 3 proportions of nano-TiO₂ (1, 3 and 5%); 2 proportions of TiO₂ powder (3 and 5%) and 2 treatments without TiO₂ (with and without addition of paraffin). It was observed that for the thickness swelling test, both nano-TiO₂ as TiO₂ had a negative effect on the panels. However, for the internal bond and screw pullout - top, the addition of TiO₂ powder without paraffin, caused a significant increase of these properties, as there are improvements reports of mechanical performance, strength and adhesive of this compound. For all other physical and mechanical properties, all panels obtained values within the limits established by NBR 14810 (ABNT, 2013).

Keywords: Wood panels; Nanoparticles; Titanium dioxide; Physical-mechanical properties

1. INTRODUÇÃO

A produção de produtos madeireiros consome menor quantidade de energia em comparação à produção de aço, plásticos e materiais a base de cimento; e a madeira possui como vantagens, alta resistência em relação à massa específica e boa trabalhabilidade (ELEOTÉRIO, 2000). Neste contexto, a indústria de painéis de madeira reconstituída tem se destacado e consequentemente apresenta grande relevância, já que pode suprir tanto em quantidade quanto em qualidade as demandas do setor madeireiro (TRIANOSKI, 2010).

O painel MDP (*Medium Density Particleboard*) é o painel de partículas de média densidade, produto derivado da madeira, classificado como material composto ou compósito. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2015), o MDP é fabricado em três camadas, sendo as duas camadas de superfície constituídas de partículas com menores dimensões, e a camada interna do painel, formada por partículas maiores. Geralmente, é de uso em interiores, por exemplo, os móveis, e comumente tem como matéria-prima lignocelulósica os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*.

Como os recursos de madeira no mundo são limitados, a insuficiente regeneração natural das florestas não satisfaz as grandes demandas da indústria de painéis de madeira e compósitos de madeira (RUPRECHT et al., 2012). Além disso, a área total das florestas mundiais também está diminuindo de forma alarmante, enquanto o consumo de madeira no mundo está aumentando progressivamente, juntamente com o crescimento expoente da população mundial e a prosperidade crescente em vários continentes. Estima-se que a área total das florestas mundiais seja de quatro bilhões de hectares (KUES, 2007). A utilização e o aproveitamento lógico dos recursos limitados são, portanto, necessários.

Uma inovação que vem sendo estudada nesse setor é a utilização de nanopartículas, pois uma revolução vem acontecendo na ciência e tecnologia desde o entendimento que os materiais em escala nanométrica – nanoescala – podem apresentar novos comportamentos e/ou propriedades diferentes daquelas que geralmente apresentam em escala macroscópica (DURÁN et al., 2006).

Neste contexto, a madeira pode ser modificada para melhorar a sua durabilidade contra a deterioração biológica por fungos (SCHIMIDT, 2006 & 2007) e insetos, a sua susceptibilidade contra o fogo (TAGHIYARI, 2012) e a sua instabilidade dimensional em condições úmidas. A nanotecnologia foi utilizada em muitas ciências nas últimas décadas (AYESH & AWWAD, 2012; DRELISH, 2013; SABER et al., 2013); é, sem dúvida, o mais ativamente e extensivamente desenvolvimento sendo trabalhado em áreas de pesquisa no início do século presente (GUZ, 2012). Foi utilizado igualmente para melhorar a qualidade de muitos materiais, incluindo painéis de madeira e compósitos de madeira. No entanto, deve-se ter em mente que quando o tamanho de uma partícula ou o tamanho dos grãos em um sólido é reduzido para a escala nanométrica, podem ocorrer mudanças incomuns em suas propriedades (LI, 2012).

E como os materiais compósitos de madeira também têm a vantagem de se utilizar tratamentos durante o processo de fabricação (“*in-process treatments*”, IPT); esta propriedade em particular se torna bastante útil quando os usos finais necessitam de tratamento dos cavacos e/ou fibras de madeira com nanomateriais durante o processo de produção desses painéis (MANNING, 2002; GARDNER et al., 2003; TAGHIYARI 2014).

Aliando o uso mais racional da madeira e também a necessidade de melhores propriedades para os painéis à base de madeira surgiu a proposta do presente estudo, que adicionou nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) ao adesivo, visando obter um painel com melhores características físicas e/ou mecânicas, a fim de aumentar a durabilidade dos produtos engenheirados de madeira.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo foi o de avaliar as propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de madeira de *Eucalyptus grandis* produzidos com 8 configurações, variáveis conforme a inclusão de aditivos ou não no processo de produção.

Os objetivos específicos do presente estudo foram os seguintes: avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos e verificar a influência da adição de nanopartículas de TiO_2 em 3 diferentes porcentagens (1, 3 e 5%) nessas propriedades, com e sem adição da parafina; e também a influência da adição de TiO_2 em pó em 2 diferentes porcentagens (3 e 5%) sem adição de parafina, principalmente na propriedade física de inchamento em espessura, e posteriormente cotejar os resultados obtidos com as especificações constantes na norma NBR 13418 (ABNT, 2013).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Painéis à base de madeira

O progresso tecnológico do setor madeireiro, aliado a disponibilidade de florestas plantadas possibilitou uma série de alternativas para uso desse recurso florestal, dentre elas a produção de painéis de madeira, sendo possível gerar novos produtos pela sua reconstituição utilizando métodos e processos adequados. A madeira torna-se importante como insumo, pois se caracteriza como matéria-prima renovável e com baixo consumo de energia de processamento (MENDES, 2001).

Os painéis de madeira são estruturas fabricadas com madeiras em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação, que são aglutinadas com resina sintética e consolidadas sob ação de pressão e calor. Aumentam as possibilidades de aplicações da madeira em diferentes usos tais como na fabricação de móveis e pisos, elementos estruturais ou não na construção civil, embalagens, entre outras (GONÇALVES et al., 2008).

Segundo Machado (2005) os painéis derivados de madeira possuem claras vantagens com relação à madeira maciça, entre elas estão: a possibilidade de obtenção de diferentes tipos e características geométricas, independente da altura, diâmetro e forma do tronco; boa relação resistência/peso; maior estabilidade dimensional; obtenção de produtos mais homogêneos; permite a utilização industrial de madeira proveniente de espécies florestais secundárias; originam uma clara redução de desperdícios de madeira, sendo possível a incorporação de resíduos resultantes da serraria e ainda uma percentagem de casca.

Nos últimos anos, a produção e o consumo da indústria de painéis de madeira industrializada apresentaram o maior crescimento médio anual dentre os produtos florestais do Brasil. Segundo a ABIPA, esse aumento foi devido ao incremento do consumo doméstico e aos investimentos significativos realizados pelas indústrias do setor, as quais dobraram a capacidade nominal instalada na última década (ABRAF, 2013).

Iwakiri et al. (2001) menciona que no Brasil, os primeiros painéis foram fabricados em 1966, com a instalação de uma planta industrial na cidade de Curitiba – PR. Tem-se que as produtoras desse segmento localizam-se predominantemente nas regiões sul e sudeste do país, sendo que cerca de 80% da produção de painéis atendem a indústria moveleira e o restante é empregado na construção civil e na indústria de embalagens.

O Brasil está entre os mais avançados do mundo na fabricação de painéis de madeira reconstituída, pois, a maioria das fábricas instaladas no País é de última geração (ABIPA, 2015).

Mattos et al. (2008), utilizando uma base de dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO), afirmam que os painéis compensados, aglomerado/MDP, MDF e chapas de fibras somam 97,0% do volume total de painéis de madeira consumidos mundialmente. Quanto ao emprego dos painéis de madeira, estes servem tanto para a indústria de móveis quanto na construção civil.

Tem-se que os painéis reconstituídos têm maior destaque econômico no mercado, pois são produtos de maior valor agregado e procura. Os painéis aglomerados vêm apresentando uma das maiores taxas de crescimento, tanto mundialmente, quanto nacionalmente, em função da quantidade de produtos disponíveis e facilidades na aplicação para mais variados fins (BERTOLINI, 2011).

3.2. MDP – Painel de Partículas de Média Densidade

A sigla MDP de *Medium Density Particleboard* se refere ao painel de partículas de média densidade, o qual é classificado como material composto ou compósito. Segundo ABIPA (2015), o painel MDP é fabricado em três camadas, sendo as duas camadas de superfície constituídas de partículas com menores dimensões, e a camada interna do painel, formada por partículas maiores, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1. Estrutura de um painel MDP. FONTE: Iwakiri, 2005.

O MDP é tido como uma versão melhorada do painel de madeira aglomerada, que surgiu na Alemanha no início da década de 40, como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, face à dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados, devido ao isolamento da Alemanha durante a 2ª Guerra Mundial (IWAKIRI, 2005). O aglomerado/MDP, através da sua fabricação apresenta vantagens em relação a outros produtos compostos de madeira, e também à madeira serrada. Ainda segundo o autor, as vantagens são: eliminação de efeitos da anisotropia da madeira; eliminação de fatores redutores da resistência da madeira, tais como nós, inclinação da grã, lenhos juvenil e adulto, entre outros; possibilidades de adequações das propriedades físico-mecânicas dos painéis através do controle dos parâmetros de processo como resina, geometria das partículas, grau de densificação, entre outros; menores exigências em termos de matéria-prima com diâmetro, forma do fuste, defeitos, entre outros; menor custo de produção, relacionado principalmente a qualidade da madeira e mão de obra.

No Brasil, a madeira de florestas plantadas, em especial de eucalipto e de pinus, constitui a principal fonte de matéria-prima (EISFELD, 2009).

De acordo com Iwakiri (2005), os principais tipos de adesivos utilizados na produção de painéis aglomerados são: ureia-formaldeído, para painéis que se destinam ao uso interno; fenol-formaldeído, utilizado em menor escala, sendo destinado a produção de painéis estruturais que requerem alta resistência à umidade, tais como “OSB” e compensado; e melamina-formaldeído, utilizado como “fortificante”, em mistura com a ureia-formaldeído, conferindo aos painéis uma maior resistência à água.

As chapas de partículas são produzidas com elementos de madeira, com a incorporação de adesivos, e consolidadas por meio da prensagem a quente. Seu processo de fabricação envolve a geração de partículas, secagem, classificação, aplicação do adesivo e aditivo químico, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, acondicionamento e acabamento (IWAKIRI, 1989).

O processo de produção de painéis aglomerados pode ser definido pelas etapas ilustradas na Figura 2.

Figura 2. Processo produtivo de painéis de madeira aglomerada (MDP). Fonte: Iwakiri, 2016.

Quanto ao uso, o MDP é utilizado fundamentalmente na produção de móveis residenciais e comerciais de linhas retas (tampos de mesas, laterais de armários, estantes e divisórias) e, de forma secundária, na construção civil (BIAZUS, 2010). ABIPA (2015) cita que cerca de 95,0% da produção brasileira de MDP é destinada ao mercado mobiliário nacional.

Estes painéis têm tido elevadas taxas de crescimento de produção justificadas pela ampla variedade de produtos possíveis de serem fabricados a partir dos mesmos. O MDP/aglomerado é bastante utilizado na produção de móveis, sendo oferecido no mercado sem revestimento, com revestimento em ambas as faces ou numa só. Tais revestimentos apresentam inúmeros padrões e cores, podendo conferir aos painéis maior resistência superficial à abrasão, impactos, riscos e manchas. Os painéis podem ser utilizados, ainda, em divisórias, em pisos e até mesmo na construção civil, como por exemplo, em casas pré-fabricadas (SURDI, 2015).

Tem-se como matéria-prima potencial para produção de MDP os resíduos industriais de madeira, resíduos da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior, provenientes de florestas plantadas, e reciclagem de madeira sem serventia (EISFELD, 2009).

Embora o propósito inicial das primeiras indústrias de painéis aglomerados no mundo tenha sido o aproveitamento dos resíduos florestais, no Brasil essa prática ainda é incipiente em nível industrial, restringindo-se a trabalhos acadêmicos, realizados em escala laboratorial (PIERRE et al., 2014).

3.2.1. Fatores que influenciam as propriedades dos painéis MDP

Diversos fatores influenciam as propriedades física e mecânicas dos painéis MDP, por exemplo, os inerentes à madeira, tais como espécie, densidade básica e extrativos; e os inerentes ao processo de produção, tais como massa específica, razão de compactação, geometria das partículas, teor de adesivo e ciclo de prensagem.

3.2.1.1. Espécie, densidade básica e extrativos

As propriedades da madeira possuem forte influência na formação da ligação adesiva e, geralmente, as madeiras de folhosas apresentam mais dificuldades do que as de coníferas (MARRA, 1992).

A densidade básica da madeira afeta a relação entre pressão de prensagem e resistência do colchão de partículas durante a prensagem a quente e, como consequência disso, provoca mudanças na distribuição da densidade vertical, resultando num considerável impacto no processo de manufatura do painel e nas suas propriedades físico-mecânicas (WANG et al., 2000).

A espécie de madeira é outra importante variável a ser considerada no processo de produção de painéis aglomerados pois, de acordo com Iwakiri (2005), a densidade básica, acidez e os extrativos relacionados a ela, interagem com outras variáveis do processo, determinando a massa específica do painel e influenciando na formulação do adesivo utilizado.

3.2.1.2. Massa específica e razão de compactação

Na produção de painéis de partículas, prefere-se o uso de espécies de baixa densidade devido ao fato de que a madeira menos densa permite sua compressão em um painel de média densidade, garantindo um suficiente contato entre as partículas e permitindo uma boa ligação adesiva entre elas (MALONEY, 1993).

A massa específica dos painéis de madeira está relacionada à quantidade de partículas para uma determinada dimensão do painel e influencia significativamente as suas propriedades físico-mecânicas (MALONEY, 1993; MENDES, 2010). A relação entre a massa específica do painel e a densidade básica da madeira utilizada é denominada de razão de compactação e, da mesma forma, exerce influência acentuada sobre tais propriedades (MOSLEMI, 1974).

3.2.1.3. Geometria das partículas

Tem-se que a geometria das partículas, incluindo a forma e o tamanho, é um dos principais parâmetros que afetam as propriedades dos painéis de madeira aglomerada (MOSLEMI, 1974; FRYBORT et al., 2008). Segundo Moslemi (1974), partículas mais longas e finas produzem chapas com maior resistência à flexão estática e estabilidade dimensional, enquanto que partículas mais curtas e mais espessas produzem chapas com maior ligação interna e menor estabilidade dimensional.

Partículas com dimensões menores requerem maior consumo relativo de resina, considerando a maior área superficial específica das partículas a ser recoberta. Com a aplicação de mesma quantidade de resina, o painel produzido com partículas maiores apresentará maior ligação interna, tendo em vista sua menor área superficial específica e, conseqüentemente, maior disponibilidade de resina por unidade de área (MALONEY, 1993).

A razão de esbeltez é a relação entre o comprimento e espessura das partículas, e é considerada um parâmetro importante, pois dela dependem a área de contato entre as partículas no painel e o consumo relativo de adesivo (IWAKIRI, 1989). Ao variar a geometria ou a granulometria de partículas, há a necessidade também de se averiguar a melhor proporção de adesivos a serem empregados, entre outras variáveis do processo (PEIXOTO; BRITO, 2000).

3.2.1.4. Adesivo

Iwakiri (2005) define o adesivo como material com propriedades aderentes, ou seja, um material que apresenta a capacidade de manter unidos outros materiais em suas superfícies, formando uma ligação superficial forte e duradoura.

Após a Primeira Guerra Mundial, onde ainda predominavam os adesivos obtidos à base de proteínas animais, começaram a surgir adesivos com características de utilização a temperatura ambiente e resistentes à água. Estes adesivos são empregados até hoje pelos países mais desenvolvidos na colagem de madeira para uso em interiores (DIAS, 2005).

Na década de 30 foi empregada, como uso em escala industrial na madeira, a primeira resina sintética à base de fenol-formaldeído. Nesta época, foi introduzido também um adesivo à base de ureia-formaldeído, para a produção de móveis e madeira compensada para interiores (DIAS, 2005). Com a Segunda Guerra Mundial, novos adesivos foram desenvolvidos como o resorcinol-formaldeído e os primeiros adesivos poliuretanos.

Maloney (1993) e Moslemi (1974) afirmam que a quantidade de resina está diretamente associada à área superficial específica das partículas. Segundo Marra (1992), para painéis com maior massa específica, recomenda-se o uso de maior quantidade de adesivo, tendo em vista a maior área superficial das partículas.

Na produção de painéis de partículas de madeira, o adesivo é o componente de maior custo de produção, portanto, a quantidade a ser aplicada deve ser otimizada em função das propriedades requeridas para a finalidade de uso a que se destina o painel (IWAKIRI, 2005).

A resina à base de ureia-formaldeído, a mais utilizada na produção dos painéis MDP, apresenta duas inconveniências: perde resistência quando atua sob a ação da umidade por tempo relativamente curto e, na prensagem, há a emissão de formaldeído, tornando seu emprego problemático em países cujo controle ambiental é rigoroso (DIAS, 2005).

E há, ainda, a adição de aditivos ao adesivo, que são produtos químicos com a finalidade de melhorar algumas propriedades específicas dos painéis, Iwakiri (2005) cita alguns: catalisador (endurecedor), tem a função de reativar a pré-condensação e aumentar a velocidade de polimerização e cura da resina; emulsão de parafina, com a finalidade de reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira; retardantes de fogo e produtos preservantes contra fungos e insetos.

3.2.1.5. Ciclo de prensagem

As condições de prensagem mais importantes que afetam as propriedades dos painéis de madeira são o teor de umidade do colchão de partículas, a velocidade de fechamento da prensa, o tempo e a temperatura de prensagem (KELLY, 1977).

Segundo Matos (1988), o teor de umidade do material no ciclo da prensa exerce influência sobre a resistência da madeira à compressão e pode ser considerado como um dos mais importantes fatores na produção de painéis de partículas.

O tempo de prensagem é o tempo decorrido entre o momento da consolidação do colchão de partículas em sua espessura até o momento de abertura dos pratos da prensa, podendo variar em torno de 6 a 12 minutos e deverá ser o suficiente para que o centro da chapa atinja a temperatura ideal para a cura da resina e que seja também suficiente para a migração da umidade pelas bordas da chapa (SILVA et al., 2006). Já a principal função da temperatura da prensa é a aceleração da polimerização do adesivo distribuído entre as partículas e a plasticização da madeira (MATOS, 1988).

A pressão de prensagem, além de determinar a espessura e a densidade final, ainda auxilia na transferência do calor responsável pela cura do adesivo, proporcionando a consolidação do painel (CALEGARI et al., 2005).

3.2.2. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDP

3.2.2.1. Teor de umidade, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura

Teor de umidade do painel MDP é a porcentagem de água desprendida do corpo de prova quando este é submetido a uma temperatura de 103 ± 2 °C, até sua massa se tornar constante (ABNT, 2013).

O inchamento é a variação percentual de aumento em espessura que um corpo de prova de um painel apresenta após ficar imerso pelo tempo de $24 \text{ h} \pm 36 \text{ min}$ em água à temperatura de 20 ± 1 °C (ABNT, 2013).

O inchamento em espessura é uma das propriedades mais importantes em termos de estabilidade dimensional dos painéis (BRITO, 1995). Ele pode ser afetado pela espécie de madeira, geometria das partículas, massa específica dos painéis, teor de adesivo, teor de parafina, eficiência da aplicação da cola e condições de prensagem (HALLIGAN, 1970).

Quando o painel é submerso em água, ocorre a absorção de água líquida e subsequentemente o inchamento em espessura, cuja variável apresenta duas componentes: o inchamento da madeira devido à adsorção de moléculas de água junto aos sítios de sorção que provoca o afastamento das cadeias de celulose e hemicelulose; e o inchamento devido à liberação das tensões de compressão impostas ao painel durante a prensagem. Quando o painel é retirado da água e colocado nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ambiente em que foi acondicionado

anteriormente à imersão, ocorre a desorção, acompanhada da retração (fenômeno inverso ao inchamento) da madeira, que se prolonga até o momento em que o painel atinge a umidade de equilíbrio com aquele ambiente e, então, as suas dimensões se estabilizam. Ao final deste processo de perda de umidade, o inchamento devido às características higroscópicas da madeira pode ser recuperado. Porém, o inchamento em espessura resultante da liberação das tensões de compressão é irreversível. Tal irreversibilidade também é conhecida como *springback* ou taxa de não-retorno em espessura (BORTOLETTO JÚNIOR, 2010).

3.2.2.2. Tração Perpendicular (Ligação Interna)

A resistência à tração perpendicular é a resistência que um corpo de prova de um painel oferece quando este é submetido a uma força aplicada perpendicularmente em seu centro (na superfície) até a ruptura (ABNT, 2013).

Para Matos (1988), a ligação interna serve como parâmetro para avaliação da agregação interna das partículas e da eficiência da colagem dos painéis. Quando uma amostra é testada em tração perpendicular normalmente ocorre a ruptura na porção média da sua espessura, que corresponde a região de menor densidade e ligação entre partículas (IWAKIRI, 1989).

3.2.2.3. Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) à Flexão Estática

A resistência à flexão estática é a resistência que um corpo de prova de um painel, apoiado em seus extremos, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro até sua ruptura (ABNT, 2013).

Matos (1997) define o módulo de ruptura (MOR) como a medida da resistência oferecida pela madeira aos esforços de flexão e os valores obtidos são utilizados para obtenção de tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira. O MOR é uma propriedade muito importante e determina a aplicabilidade das chapas de partículas para uso estrutural (IWAKIRI, 1989).

A elasticidade implica que as deformações produzidas abaixo do limite proporcional são completamente recuperáveis após a remoção da carga e quando esse limite é ultrapassado ocorre a deformação plástica. Normalmente, a curva tensão-deformação para os compósitos à base de madeira é linear abaixo do limite proporcional (CAI e ROSS, 2010).

O módulo de elasticidade (MOE) pode ser definido como a constante elástica que expressa a rigidez do painel quando submetido à aplicação de força durante o regime elástico, não havendo alteração das suas características originais (ABNT, 2013).

3.2.2.4. Arrancamento de Parafuso

É a propriedade que avalia a resistência máxima que uma amostra de painel de madeira oferece ao se retirar um parafuso, colocado na superfície ou topo, quando submetido a uma força de tração (CAI; ROSS, 2010). Conforme Maloney (1993), tal propriedade mecânica pode ser afetada pela geometria das partículas.

3.2.2.5. Perfil de Densidade

A massa específica dos painéis de partículas produzidos por prensagem a quente não se mostra uniforme na direção da sua espessura e essa variação é chamada de perfil de densidade vertical ou gradiente de densidade vertical, o qual pode afetar quase todas as propriedades físicas e mecânicas do produto (JIN et al., 2009).

O perfil de densidade vertical de painéis de partículas é determinado por diversos fatores tais como a geometria das partículas, a distribuição da umidade no colchão de partículas, o tempo de fechamento da prensa, a temperatura da prensa, a reatividade do adesivo e a resistência das partículas de madeira à compressão (KELLY, 1977; BELINI et al., 2009; CHEN et al., 2010).

Este perfil pode ser obtido a partir da metodologia de densitometria de raios X. Os raios X consistem de uma radiação eletromagnética penetrante e invisível a olho nu, e quando atravessam a madeira, há uma interação, na qual parte dos fótons de raios X é removida do feixe incidente numa quantidade proporcional à massa específica da madeira, da espessura da amostra e do número de fótons incidentes (SIQUEIRA, 2004). Segundo Chen et al. (2010), a técnica de densitometria de raios X para determinação da massa específica e do perfil de densidade dos painéis de madeira tem se destacado devido à precisão, ao detalhamento e a praticidade da análise, demonstrando alta resolução espacial.

3.3. Inovações para painéis de madeira

Vários materiais, incluindo a madeira, vêm sendo estudados para a produção de painéis de partículas. Estes materiais normalmente são obtidos a partir de resíduos de processos industriais, florestais ou agrários, sendo, portanto, uma boa alternativa para um melhor aproveitamento de resíduos, que muitas vezes são descartados de forma incorreta ou não possuem um destino adequado e nenhum valor agregado (FERREIRA, 2013).

Além destes, pode-se citar também a utilização de adesivos alternativos aos usualmente empregados, assim como produtos preservantes de madeira e também a adição de produtos nanomateriais aos painéis, que vem sendo alvo de estudos nos últimos anos, especialmente em nível internacional.

3.3.1. Uso de nanopartículas

Deve-se ter em mente que mudanças incomuns nas propriedades de um sólido podem ocorrer quando o tamanho de uma partícula ou o tamanho dos grãos é reduzido para a escala nanométrica (TAGHIYARI, 2014). Nanomaterial artificial é um nanomaterial sintetizado para uma finalidade específica e pode ser encontrado de várias formas diferentes. Pode ser subdividido em tipos orgânicos e inorgânicos, com o antigo carbono incluído em si e estruturas poliméricas com nano características específicas. Os inorgânicos incluem metais, óxidos de metais e metalóides, argilas e um subconjunto específico de compostos conhecidos como pontos quânticos (SABDIN, 2010).

Quanto à madeira e produtos derivados dela que têm natureza biológica, nanopartículas de metal e sua alta condutividade térmica foram relatadas para reduzir o tempo de prensagem a quente, o qual é tido como um gargalo na maioria das fábricas de compósitos, assim como melhoraram as propriedades físicas, mecânicas e de resistência ao fogo; nanopartículas de cobre foram relatadas para diminuir a permeabilidade de gases e líquidos; e nano-fibras de wollastonita aumentaram a condutividade térmica da esteira compósita e melhoraram as propriedades de resistência ao fogo (TAGHIYARI, 2014).

A wollastonita é um mineral de silicato de cálcio e aumenta o crescimento das plantas, assim como reduz os efeitos de certos patógenos (FERNANDEZ-PURATICH & OLIVER-VILLANUEVA, 2014), incluindo fungos (AITKEN, 2010). Wollastonita é conhecida por ser um material mineral não tóxico que não é perigoso para os seres humanos ou animais selvagens. Não há evidências de que a wollastonita represente um perigo para a saúde, mas são necessários mais estudos para os trabalhadores expostos à pó de wollastonita durante longos períodos antes que os riscos para a saúde possam ser avaliados na íntegra (HUUSKONEN et al., 1983). As nano-fibras de wollastonita melhoraram a estabilidade dimensional em madeiras sólidas (HAGHIGHI et al., 2014) e quando misturadas ao adesivo ureia-formaldeído aumentaram significativamente os coeficientes de condutividade térmica em painéis MDF (TAGHIYARI et al., 2014) devido à sua alta condutividade térmica (TAGHIYARI et al., 2013).

Por saber que o coeficiente de condutividade térmica da madeira é bastante baixo (TAGHIYARI et al., 2013), tem-se como alvo de estudos em projetos de pesquisa a condutividade térmica de nano-fluidos contendo nanopartículas metálicas dispersas. O aumento desta em fluidos comuns quando pequenas quantidades de nanopartículas metálicas e outras foram dispersas nestes, tem sido relatado por muitos pesquisadores (SABER et al., 2013). A possibilidade de obter uma condutividade térmica melhorada na estrutura de madeiras e materiais compósitos de madeira ocorre à mente.

A maioria dos metais são bons condutores de calor, pois os átomos podem ser definidos através de um modo de vibração gerando uma excitação térmica muito facilmente, e com as propriedades térmicas das nanopartículas abriram novas possibilidades para a melhoria na transferência de calor quando adicionadas à madeira compósita misturadas na resina. A condutividade térmica do painel de madeira será mais elevada, diminuindo o tempo de prensagem. Como as partículas são de tamanho nanométrico, espera-se que as operações de serrar e pregar se tornem mais fáceis (KUMAR et al., 2012).

Uma das características da madeira é a sua potencialidade de absorção de água quando imersa ou mesmo em contato com áreas úmidas. A fácil transferência de vapor de água e líquido através dela é devido à sua estrutura porosa contínua. Isso afeta materiais compósitos de madeira de diferentes aspectos. Em primeiro lugar, as dimensões

dos painéis de madeira se alteram devido ao fenômeno chamado inchamento em espessura. O inchamento não só tem efeitos secundários indesejáveis no *design* e dimensões da peça compósita de madeira que é utilizada na estrutura, mas também as aparas e fibras de madeira perdem a sua integridade por micromovimentos devido ao inchaço. Em segundo lugar, a água quebra as ligações de resina que prenderam as aparas de madeira ou as fibras juntas na matriz, diminuindo novamente a resistência global da matriz compósita (TAGHIYARI et al., 2015a).

Sabdin (2010) cita pesquisas realizadas por Hanz Joachim Denzer e Oliver Frederik Klaeusler com foco em uma película composta por nanopartículas, uma resina, um material de superfície ativa e um polimérico dispersante. A película pode ser usada em objetos de madeira, incluindo mobiliário, portas e pisos para melhorar a resistência a arranhões. Além disso, eles também revelam que nanopartículas de sílica, óxido de titânio e óxido de zinco aplicadas na superfície de paredes de madeira melhoram a resistência à estabilidade química e a capacidade de repelir e dispersar a água, óleo, bactérias, poeira orgânica, eletricidade, magnetismo e luz. Para a aplicação, as nanopartículas são pulverizadas sobre a superfície do corpo.

O inchamento em espessura é, então, um fator dos painéis à base de madeira que tem sido objeto de estudos para sua redução. Uma opção é explorar as soluções que a nanotecnologia pode oferecer. O tamanho reduzido das nanopartículas dos compostos nanotecnológicos faz com que elas penetrem profundamente na madeira, alterando efetivamente a química da superfície resultando em uma elevada proteção contra a umidade (MANTANIS & PAPADOULOS, 2010).

A resina ureia-formaldeído tem sido amplamente utilizada pela indústria de painéis à base de madeira por mais de 100 anos, devido ao seu bom desempenho na produção por possuir alta reatividade e ter baixo custo. Suas desvantagens são a baixa resistência à umidade e a emissão de formaldeído. Hoje em dia, a tecnologia oferece a possibilidade de utilização de aditivos com dimensões na escala nanométrica. Tais materiais parecem promissores porque nanopartículas possuem grandes áreas de superfície e podem incorporar novas propriedades ou até mesmo modificar propriedades importantes das resinas nas quais são introduzidas, como a reatividade. Especialmente a adição de nanopartículas de sílica em resinas ureia-formaldeído, tem sido relatada para melhorar as propriedades mecânicas da resina nos painéis, como citado por Roumeli et al. (2012) em seu trabalho.

A parafina tem como finalidade aumentar a resistência à umidade e reduzir o inchamento em espessura, proporcionando uma maior estabilidade dimensional. Mantanis & Papadoulos (2010) realizaram um estudo com chapas de MDP, OBS e MDF e um composto nanotecnológico denominado SurfaPore™ W, cuja formulação contém três tamanhos diferentes de nanopartículas. Para a realização dos testes foi adicionado à esse composto uma nano-emulsão de parafina e com isso foram obtidos resultados de inchamento para MDP de 7,56% nos painéis tratados.

Em um estudo de Taghiyari & Nouri (2015), ao utilizar nano-wollastonita (NW) em gel misturadas à resina ureia-formaldeído em painéis MDF com 8mm de espessura, esta diminuiu significativamente a absorção de água e inchamento em espessura, tanto quando aplicado internamente como com tratamento em superfície. O menor inchamento em espessura (24h), foi visto em NW-10% (22%). A aplicação interna de wollastonita teve impacto menos decrescente na absorção de água e inchamento de espessura do que na aplicação de superfície. O menor aumento de espessura na aplicação em superfície foi observado em NW-20% (15%).

Painéis aglomerados com resina ureia-formaldeído adicionados de nanopartículas de sílica (SiO₂) em 4%, produzidos por Valle (2015), obtiveram um inchamento de 36,46%, se comparado ao tratamento controle (62,42%) houve uma redução de mais de 50%, e ambos os tratamentos não tiveram adição de parafina.

Ao produzir painéis MDF com nanopartículas de organo-silano (NOS) na forma líquida, Taghiyari et al. (2015) encontraram uma redução significativa no inchamento em espessura. O menor valor foi observado no

tratamento com NOS-150 (150 g de NOS por kg de fibras secas de madeira), que resultou em 17%. O inchamento diminuiu gradualmente à medida que o teor de NOS aumentou de 50 g/kg (27%) de fibra de madeira para 150 g/kg (17%), mostrando uma relação direta entre o conteúdo de NOS e os declínios em inchamento.

Taghiyari et al. (2013) ao adicionarem nanopartículas de wollastonita (CaSiO_3) em painéis particulados, obtiveram resultados em que a absorção de água e o inchamento em espessura reduziram significativamente. Em contrapartida, os valores de MOR (Módulo de Ruptura), adesão interna e dureza se mostraram inferiores com relação às chapas sem nanopartículas.

Um estudo realizado por Taghiyari & Bibalan (2013) com adição de nanopartículas de cobre em chapas de MDP resultou em valores de MOR entre 11,55 e 12,19 MPa conforme a concentração de nanopartículas. Roumeli et al. (2012) em seu estudo utilizando nanopartículas de sílica em chapas de MDP encontrou resultados para MOR de 14,52 a 15,09 MPa.

Taghiyari & Nouri (2015), ao tratarem MDF com nano-wollastonita encontraram efeitos crescentes sobre o MOR e o MOE medidos. O maior valor de MOR foi observado quando 5% de NW foram utilizados como tratamento de superfície (19,44 MPa). A aplicação superficial de NW também resultou no maior MOE quando utilizado a 20% (2530 MPa).

Já em um estudo com nano-organo-silano (NOS) e resina ureia-formaldeído em painéis MDF, as nanos causaram um efeito degradante sobre todas as propriedades mecânicas das chapas tratadas. O MOR diminuiu em 76% no tratamento com NOS-150 (4 MPa) em comparação com o espécime de controle (17 MPa). A razão para o declínio nas propriedades mecânicas foi a diminuição do conteúdo de fibra de madeira de espécimes tratados com NOS. Em regra, a densidade das placas produzidas deve ser de cerca de 0,65-0,68 g/cm³ no Irã para ser compatível com as normas, bem como os anseios do mercado comercial; assim, a quantidade de NOS-suspensão utilizada para cada tratamento (50, 100 e 150 g/cm³) foi subtraída das fibras de madeira secas de modo a manter a densidade das placas constante a 0,67 g/cm³. Portanto, o volume de fibras de madeira diminuiu à medida que o teor de NOS aumentou, o que resultou em menos compressão entre as fibras de madeira na matriz MDF (TAGHIYARI et al., 2015).

Rangavar & Hoseiny (2015), ao tratarem painéis aglomerados com resina ureia-formaldeído e nanopartículas de cobre notaram um aumento no valor do MOR (12,41 MPa) dos painéis tratados (6% de nano-cobre) com relação às chapas de controle (11,05 MPa) e obtiveram o melhor resultado de ligação interna para os painéis tratados com 8% de nano-cobre (0,32 MPa). O MOE também teve seu maior valor com 6% de nano-cobre (1480,51 MPa). Taghiyari & Bibalan (2013) em seus estudos obtiveram valores de MOE de 1844,53 e 1741,15 MPa para MDP tratado com nanopartículas de cobre.

Para o ensaio de ligação interna, Taghiyari & Bibalan (2013) encontraram valores de 0,48 MPa. Kumar et al. (2012), ao tratarem MDF com nanopartículas de óxido de alumínio encontraram valores para adesão interna de 0,89 MPa. Roumeli et al. (2012) ao tratarem MDP com nanopartículas de sílica, chegaram a valores de adesão interna de 0,72 MPa. Painéis MDF tratados com nano-wollastonita obtiveram a maior ligação interna no tratamento em NW-15% (0,55 MPa), mostrando 63% de aumento em comparação com os espécimes de controle (TAGHIYARI & NOURI, 2015).

Materiais compósitos de madeira oferecem a vantagem de proporcionar uma estrutura homogênea para serem usados em muitas aplicações. No entanto, a sua natureza biológica faz com que sofra de várias deficiências, tais como a suscetibilidade a agentes biológicos de degradação da madeira, absorção de água e inchamento em espessura, risco de incêndio, etc. Uma breve visão geral do projeto de pesquisa realizada sobre a utilização de nanomateriais em compósitos de madeira comprova numerosas potenciais aplicações da nanotecnologia nesta indústria. O uso de

nanomateriais metálicos e minerais com alto coeficiente de condutividade térmica ajuda a melhorar a condução de calor e cura da resina, resultando em uma diminuição significativa na permeabilidade de gás e líquido. A propriedade repelente à água de algumas nanopartículas minerais (NZ) também pode dificultar a penetração de água e vapor na matriz compósita de madeira; em última análise, a vida útil das peças utilizadas no mobiliário ou estrutura iria aumentar significativamente (TAGHIYARI et al., 2015).

3.3.2. Nanopartículas de Dióxido de Titânio (TiO₂)

O TiO₂ é um óxido metálico e semicondutor, encontrado nas formas alotrópicas, brookita, anatase e rutilo. As formas cristalinas anatase e rutilo são as mais utilizadas e comercializadas como pigmento branco para a aplicação em tintas, fibras sintéticas, plásticos, papel, vidro, esmaltes, cerâmica, etc (MARCONE, 2011).

Há vários métodos para sintetização de nanopartículas ou nanoestruturas de TiO₂ nas formas esférica, de bastões, nanotubos ou fios, podendo-se citar os métodos de eletrodeposição, da oxidação direta, hidrotermal e o sol-gel (CHEN & MAO, 2007).

O método sol-gel tem sido bastante aplicado para a sua síntese e baseia-se na reação de hidrólise de um alcóxido de titânio (precursor), em meio ácido que na presença de água, sofre primeiramente a hidrólise, seguida de polimerização, nucleação e crescimento dos cristais (CRISAN et al., 2007). Dióxido de titânio em forma nanoestruturada tem atraído bastante interesse em várias áreas de pesquisa na ciência dos materiais por possibilitar vários tipos de aplicações, sendo empregado em vários ramos da indústria. Essas aplicações são baseadas em suas propriedades elétricas e óticas. Além disto, é um material transparente e possui alto índice de refração (BRANDÃO, 2008).

Algumas aplicações do TiO₂ são como aditivos na indústria de alimentos (FROST et al., 2001), em produtos cosméticos e farmacêuticos, com destaque para a aplicação em cremes solares para a absorção dos raios UV (SALVADOR et al., 2000) e em tintas e papéis (revestimentos) para repelir a água, e, outro destaque está na área de dispositivos semicondutores.

O TiO₂ é interessante, pois em alguns polímeros, tem a capacidade de degradar fotocataliticamente a matéria orgânica, enquanto em outros polímeros, serve para retardar o foto-envelhecimento do polímero através da absorção de luz UV⁶. Além disso, há um grande interesse em torno do desenvolvimento de nanocompósitos com nanopartículas de TiO₂, e isto está fundamentado nas características positivas destes, tais como: performance mecânica, comportamento dielétrico, propriedades óticas, propriedades de permeação e separação, propriedades térmicas, dentre outras. Por isso, vários autores têm enfatizado as questões ambientais e de segurança destes nanocompósitos constituídos de polímeros orgânicos e TiO₂. Essas nanopartículas são consideradas como não-tóxicas e por isso filmes de nanocompósitos polímero/nanopartículas de TiO₂ foram intitulados de ambientalmente corretos por alguns autores (REIJNDERS, 2009).

Diante disso, o TiO₂ é um dos óxidos binários mais importantes para aplicações tecnológicas. O motivo pelo qual este material pode ser utilizado em uma vasta gama de aplicações se deve as suas propriedades elétricas, óticas e estruturais únicas, que podem ser modificadas com relativa facilidade, a sua alta estabilidade sobre condições adversas de temperatura, umidade e pH, além de ser um material atóxico e simplesmente sintetizado em várias formas através de diferentes métodos (CHEN & MAO, 2007).

Diante de todos os benefícios que o TiO_2 pode trazer, ainda assim há na literatura uma carência de dados sobre propriedades de painéis de partículas produzidos com adição de TiO_2 que possam auxiliar na discussão deste estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Matérias-primas

Para a manufatura dos painéis do presente estudo foram utilizadas partículas de madeira, de menor granulometria nas camadas externas e maior granulometria na camada interna, provenientes da espécie *Eucalyptus grandis*, coladas com resina à base de ureia formaldeído com teores de sólidos de 66 a 68% (camada interna) e de 64 a 66% (camadas externas), emulsão de parafina (concentração de 50%), cloreto de amônia (catalisador) e dióxido de titânio (TiO₂) Ti-Pure® R-706 da DuPoint em pó (tamanho médio de partícula = 0,36 µm) cedidos por uma indústria de painéis localizada no município de Botucatu-SP; e nanopartículas (< menor que 25 nm) de dióxido de titânio em pó, no formato anatase, adquiridas da empresa *Sigma-Aldrich*.

Todas as matérias-primas mencionadas foram alocadas junto ao Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira – LLAPAM do Departamento de Ciências Florestais – LCF da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, localizado em Piracicaba-SP, no qual os painéis do presente estudo foram produzidos.

4.2. Delineamento Experimental

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, constituído por 8 tratamentos, com 4 repetições por tratamento, totalizando 32 painéis produzidos experimentalmente (Tabela 1).

Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 650,0 kg/m³ e dimensões nominais de 400 x 400 x 15,7 mm. Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos painéis foram realizadas análises de variância e, posteriormente, testes de médias de Tukey, a um nível de 95% de probabilidade. Os valores médios de cada propriedade físico-mecânica avaliada, por tratamento, foram comparados com os requisitos estipulados pela norma NBR 14810 (ABNT, 2013), possibilitando inferir sobre a qualidade dos painéis produzidos.

Tabela 1. Delineamento experimental

Tratamentos	Nano-TiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Parafina (%)
T1	0	0	0
T2	0	0	1 CE; 0,8 CI
T3	1	0	1 CE; 0,8 CI
T4	3	0	1 CE; 0,8 CI
T5	5	0	1 CE; 0,8 CI
T6	1	0	0
T7	0	3	0
T8	0	5	0

CE = camada externa; CI = camada interna

4.3. Produção dos painéis

4.3.1. Preparação das partículas

Para adequação do teor de umidade foi realizada a secagem das partículas numa estufa laboratorial, dotada de renovação e circulação forçada de ar, a temperatura de 90°C. A secagem foi finalizada quando as partículas atingiram teor de umidade entre 3 e 5%.

Após a secagem, as quantidades necessárias de partículas para as camadas externa e interna de cada painel foram pesadas separadamente e destinadas a encolagem.

4.3.2. Preparação e aplicação do adesivo, TiO₂, nano-TiO₂ e parafina

O teor de adesivo à base de ureia-formaldeído aplicado nas partículas das camadas externas foi de 15% de sólidos e nas partículas da camada interna foi de 11%, baseado na massa de partículas a 0% de umidade.

Solução de cloreto de amônia foi adicionada ao adesivo numa proporção de 2,1% de sólidos (camada externa) e de 1,4% (camada interna), baseada na massa de adesivo utilizado em cada caso.

Ao adesivo, nos casos dos tratamentos T3, T4 e T5 (Tabela 1), foram adicionadas as nanopartículas de TiO₂, respectivamente, na proporção de 1%, 3% e 5%, calculada sobre a massa total do adesivo na forma líquida. Para o tratamento T6 foram adicionadas nano-TiO₂ na proporção de 1% sem acréscimo de parafina.

Emulsão de parafina foi aplicada sobre as partículas na quantidade de 1% (camada externa) e de 0,80% (camada interna) nos tratamentos T1, T3, T4 e T5 (Tabela 1), calculada sobre a mesma base citada para o adesivo. O adesivo depois de preparado foi aplicado por meio de uma encoladeira do tipo tambor rotativo (Figura 3), no interior da qual encontrava-se acoplada uma pistola à ar comprimido, dotada de caneco superior, utilizada para aspersão dos líquidos sobre as partículas. Logo após a aplicação do adesivo e do mesmo modo deste, aplicou-se a emulsão de parafina sobre as partículas de madeira, apenas trocando-se o caneco da pistola por outro com o novo conteúdo.

E para os tratamentos T6 e T7, ao adesivo, foi adicionado TiO₂ em pó, respectivamente, na proporção de 3% e 5%, calculada sobre a massa total do adesivo na forma líquida, sem acréscimo de parafina.

Figura 3. Encoladeira utilizada para dispersar adesivo e parafina nas partículas de madeira

Tanto as nano-TiO₂ quanto o TiO₂ em pó foram misturados ao adesivo através de um agitador magnético (Figura 4). Para cada proporção, a mistura foi homogeneizada durante 5 minutos, até se notar que não havia mais grumos acumulados.

Figura 4. Agitador magnético utilizado para homogeneizar adesivo e aditivos

4.3.3. Formação do colchão de partículas e prensagem dos painéis

A massa de partículas impregnadas de adesivo e aditivos conforme cada caso já descrito, calculada para obter um painel com massa específica nominal de 650,0 kg/m³, foi depositada manualmente sobre uma caixa de madeira, formadora do colchão, com dimensões de 400 mm de aresta interna e 200 mm de altura, da seguinte maneira: inicialmente depositou-se 20% da massa total de partículas (granulometria entre 35 e 60 *mesh*) para formar a camada

inferior externa (Figura 5a), seguidos de 60% de partículas (granulometria entre 9 e 16 *mesh*) para formar a camada interna (Figura 5b) e os restantes 20% de partículas (granulometria entre 35 e 60 *mesh*) para formar a camada superior externa. Desta forma, o colchão foi constituído por três camadas de partículas de madeira, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 5. Disposição das partículas para formação do colchão. **(a)** camada externa e **(b)** camada interna

Depois de formado, o colchão de partículas foi levado para uma prensa hidráulica manual a fim de efetuar uma pré-prensagem a frio (Figuras 6a e 6b), com a finalidade de proporcionar melhor conformação e minimizar a perda de partículas.

Figura 6. **(a)** Pré-prensagem a frio; **(b)** Colchão após a pré-prensagem

Posteriormente, nas laterais do colchão de partículas foram inseridos separadores de aço, com espessura nominal de 15,7 mm, e então o mesmo foi levado para ser prensado numa prensa hidráulica motorizada (Figura 7a), dotada de controle automático de temperatura, pressão e tempos de abertura e fechamento dos pratos, para consolidação do painel.

Os parâmetros do ciclo de prensagem dos colchões foram os seguintes: 35 kgf/cm² de pressão, temperatura de 180°C e tempo total de 10 minutos (01 minuto para o fechamento da prensa até atingir a pressão estipulada, 08 minutos sob a pressão estipulada e 01 minuto para a abertura da prensa).

Após a prensagem, os painéis já consolidados foram retirados da prensa, resfriados à temperatura ambiente (Figura 7b) e depois depositados em sala climatizada sob temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Figura 7. (a) Prensa hidráulica motorizada; (b) Painéis após a prensagem

4.4. Obtenção dos corpos de prova e avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Inicialmente, após atingir massa constante no interior da sala climatizada, os painéis foram esquadrejados em serra circular, retirando-se 10 mm de cada um de seus lados com a finalidade de evitar efeitos de borda.

Posteriormente, foram retirados dos painéis os corpos-de-prova (CP) conforme o esquema apresentado na Figura 8, os quais destinaram-se à avaliação das seguintes propriedades: massa específica, teor de umidade, inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, taxa de não retorno em espessura (TNRE), módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática, resistência ao arrancamento de parafusos (face e topo) e resistência à tração perpendicular (ligação interna - LI).

As dimensões dos CP, a condução dos ensaios e o cálculo dos valores das propriedades foram baseados nas prescrições da norma NBR 14810 (ABNT, 2013).

Figura 8. Esquema da retirada dos corpos de prova dos painéis. Legenda: IE = inchamento em espessura; TNRE = taxa de não-retorno em espessura; TU = Teor de Umidade; LI = ligação interna; MOR = módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; AP_s = arrancamento de parafuso – superfície; AP_t = arrancamento de parafuso – topo. Fonte: própria autora.

4.4.1. Ensaios Físicos e Mecânicos

Os ensaios físico-mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados – LEMMAD do LCF.

As massas específicas dos CP destinados a todos os ensaios anteriormente mencionados foram determinadas. Para tanto, foram obtidas as suas respectivas massas, por meio de balança de precisão, e suas dimensões (largura, comprimento e espessura) com paquímetro. Multiplicando as dimensões dos CP foram obtidos os seus volumes. Posteriormente, a massa específica de cada CP foi obtida pela divisão da sua massa pelo volume correspondente.

Por sua vez, a massa específica de cada painel foi obtida através da média da massa específica de todos os CP retirados do mesmo.

Para os ensaios de inchamento em espessura após 24 horas de imersão foi utilizado um recipiente com água destilada e o dispositivo sugerido pela norma adotada para manter os CP's submersos, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9. Recipiente e dispositivo para manter os CP's submersos na água

Os mesmos CP's utilizados para o ensaio de inchamento em espessura (IE), após serem retirados da água e terem suas espessuras medidas para o cálculo do IE, foram colocados novamente em ambiente climatizado (temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$) e assim permaneceram por cerca de 30 dias. Suas massas foram pesadas periodicamente até permanecerem constantes. Com sua estabilização foi então medida novamente a espessura de cada CP e através da Equação 1 se obteve a TNRE.

$$TNRE = \frac{e_f - e_i}{e_i} * 100 \quad (1)$$

Onde:

TNRE = taxa de não retorno em espessura (%);

e_f = espessura final do CP, determinada após a 2.a climatização que foi realizada depois da imersão por 24 horas em água (mm);

e_i = espessura inicial (original) do CP, determinada após a 1.a climatização e antes da submersão em água (mm).

Para a realização dos ensaios mecânicos foi utilizada uma máquina universal de ensaios com capacidade para aplicação de força de até 30 toneladas, dirigida por um sistema eletromecânico controlado por computador, instrumentada com células de carga cambiáveis e sensores do tipo LVDT (linear variable differential transformer) conectados a um programa específico para aquisição de dados.

A Figura 10 ilustra os ensaios mecânicos que foram realizados com os CP obtidos dos painéis.

Figura 10. (a) Ensaio de Flexão Estática; (b) Ensaio de Tração Perpendicular (ligação interna); (c) Ensaio de arrancamento de parafuso - topo; (d) Ensaio de arrancamento de parafuso - superfície

4.4.2. Obtenção dos perfis densitométricos dos painéis por atenuação de raios X

Para obtenção dos perfis densitométricos dos painéis aglomerados foram utilizados os mesmos corpos de prova que seriam posteriormente ensaiados para ligação interna, sendo quatro corpos de prova por painel, totalizando 16 por tratamento, com espessura correspondente à espessura original dos painéis, comprimento de 50 mm e largura de 50 mm.

Os perfis densitométricos dos painéis foram obtidos em densitômetro, pertencente ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras – LAIM do LCF, no qual os corpos de prova foram encaixados em um suporte metálico e transferidos para um compartimento blindado interno ao equipamento. Em seguida deu-se a calibração

automática do equipamento e a varredura contínua ao longo da espessura dos corpos de prova. Os feixes de raios X que atravessaram as amostras foram transformados em valores pontuais de densidade, obtidos a cada 20 μm , pelo programa QMS. A partir dos valores de densidade, foi originado um arquivo no formato DAT contendo o relatório da análise. Com os dados quantitativos dos perfis, foram obtidos os valores de: (i) densidade média do perfil; (ii) densidades médias das faces exteriores; e (iii) massa específica média do miolo (região central do painel), conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11. Definição do perfil de densidade ao longo da espessura do painel aglomerado. ME_P = Massa específica média do perfil; ME_{Fi} = Massa específica média da face inferior; ME_M = Massa específica média do miolo; ME_{Fs} = Massa específica média da face superior. Fonte: Adaptado de Wong et al. (1998).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Massa específica e teor de umidade dos painéis

Os valores médios de massa específica e teor de umidade dos painéis de cada tratamento encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios de massa específica e teor de umidade dos painéis

Tratamento	Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Umidade (%)
T1	649,65 a (11,48)	9,8 a (0,15)
T2	648,01 a (22,90)	9,6 a (0,10)
T3	649,60 a (16,07)	9,7 a (0,08)
T4	650,48 a (22,10)	9,7 a (0,14)
T5	655,91 a (22,12)	9,8 a (0,13)
T6	636,31 a (15,43)	9,6 a (0,11)
T7	632,97 a (20,47)	9,7 a (0,10)
T8	641,38 a (22,02)	9,7 a (0,13)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

Através da análise de variância efetuada para as variáveis massa específica e teor de umidade dos painéis (ANEXO A, Tabelas 8 e 9, respectivamente), verificou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos. Esses resultados indicam que a adição de parafina isoladamente e a adição desta em conjunto com as nanopartículas de TiO₂ na manufatura dos painéis não tiveram efeito significativo sobre ambas as propriedades avaliadas, assim como nano-TiO₂ e TiO₂ em pó adicionados sem parafina também não influenciaram essas propriedades.

Observa-se que os valores médios da massa específica dos painéis de todos os tratamentos foram muito próximos do valor nominal planejado (650 kg/m³), demonstrando ter sido bem conduzida a etapa de produção dos mesmos. A norma NBR 14810 (ABNT, 2013) define que o painel de partículas, para ser enquadrado na classe de “média densidade”, deve apresentar valores que se encontram entre 551 e 750 kg/m³. Sendo assim, observa-se na Tabela 2 que os painéis de todos os tratamentos se enquadraram nesta classe.

A norma em referência estipula que o teor de umidade dos painéis de média densidade pode variar entre 5 e 13%. Nota-se que os teores de umidade dos painéis de todos os tratamentos (Tabela 2) foram muito próximos e, além disso, encontram-se dentro da faixa estipulada na norma.

5.2. Inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura dos painéis

Os valores médios de inchamento em espessura dos painéis de partículas após vinte e quatro horas de imersão em água, para cada tratamento, e de taxa de não-retorno em espessura estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios de inchamento em espessura (IE) e taxa de não-retorno em espessura (TNRE) dos painéis após 24h de imersão em água

Tratamento	IE 24h (%)	TNRE (%)
T1	23,91 b (7,8)	17,06 a (7,2)
T2	16,46 a (17,48)	15,67 a (17,2)
T3	22,21 ab (10,3)	18,24 a (9,8)
T4	20,42 ab (9,0)	17,62 a (8,8)
T5	20,60 ab (12,5)	16,73 a (9,3)
T6	28,35 c (5,5)	21,34 b (6,5)
T7	31,61 c (6,1)	20,54 b (8,5)
T8	31,13 c (6,2)	20,26 b (8,6)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

A análise de variância realizada para variável IE (Anexo A, Tabela 10) indicou que houve diferença significativa entre os tratamentos. Subsequentemente, através do teste de *Tukey*, verificou-se que o valor médio do IE dos painéis dos tratamentos T1 e T2 diferiram significativamente entre si, o valor médio do IE dos painéis do tratamento T1 (sem adição de parafina e sem nano-TiO₂) foi superior ao dos painéis do tratamento T2 (com adição de apenas parafina). Esses resultados evidenciam a eficiência da adição de parafina, no sentido de reduzir significativamente o IE, e por esse motivo tal prática é adotada corriqueiramente pela indústria de painéis de madeira reconstituída em geral.

Para verificar se houve uma interação entre as nanos e a parafina produziu-se o tratamento T6 (1% nano sem parafina), o qual revelou um resultado mais elevado, diferindo estatisticamente de todos os tratamentos anteriores, portanto a parafina minimizou o efeito prejudicial das nanos, demonstrando que mesmo em pequena porcentagem a inclusão destas não contribui para a melhoria do IE.

Os tratamentos T6 (1% nano-TiO₂ e sem parafina), T7 e T8 (sem parafina e duas diferentes proporções de TiO₂ em pó) diferiram significativamente de todos os demais tratamentos para o IE24h e para o TNRE (ANEXO B, Tabela 19), porém, não diferiram entre si, evidenciando que tanto nano quanto TiO₂ em pó adicionados aos painéis, isoladamente, não proporcionaram efeito de melhoria na propriedade de inchamento, resultando em valores muito acima do estipulado pela norma.

Um fator que pode ter influenciado nos resultados obtidos foi a forma de homogeneização entre a resina e o aditivo. Tanto a nano-TiO₂ quanto o TiO₂ estavam em pó e foram misturados ao adesivo através de um agitador magnético por um tempo pré-determinado. O tempo ou o modo de mistura podem não ter sido os mais adequados, o que acabou resultando em uma homogeneização não muito perfeita, mesmo que a olho nu não se enxergassem grumos.

A NBR14810 (ABNT, 2013) estipula em 18% o valor máximo permitido para o IE dos painéis de partículas de média densidade do tipo P2. Deste modo, verifica-se na Tabela 3 que somente os painéis do tratamento T2 (com adição apenas de parafina) apresentaram valor médio inferior ao máximo estipulado pela norma, sendo que os demais extrapolaram e não puderam atendê-la.

5.3. Flexão Estática

Os valores médios MOR e MOE à flexão estática dos painéis estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios de MOR e MOE à Flexão dos painéis

Tratamento	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T1	14,6 a (8,9)	1961,7 a (12,5)
T2	14,5 a (10,6)	2121,5 a (15,3)
T3	14,5 a (4,8)	1946,5 a (5,7)
T4	15,5 a (9,0)	2052,3 a (7,5)
T5	15,6 a (5,8)	2056,9 a (7,1)
T6	16,9 a (8,9)	2298,4 a (8,3)
T7	15,3 a (9,1)	2183,0 a (8,9)
T8	15,1 a (9,4)	2138,5 a (5,8)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

A NBR 14810 (ABNT, 2013) especifica valor mínimo de MOR como sendo 11 MPa para painéis com espessura entre 13 e 20 mm indicados para uso não estrutural em ambiente seco. Os resultados, portanto, atenderam o valor normativo.

A análise de variância a um nível de significância de 5% (ANEXO A, Tabela 11) mostrou que não houve diferença estatística entre a presença ou não das nano-TiO₂ e do TiO₂ em pó nas chapas, onde os valores obtidos são estatisticamente iguais para a determinação do MOR.

Quanto ao módulo de elasticidade, a norma brasileira especifica valor mínimo de MOE 1600 MPa para painéis com espessura entre 13 e 20 mm não estruturais e para uso interno em condições secas, ficando os ensaios com valores dentro do estabelecido pela norma. Realizou-se a análise de variância a um nível de significância de 5% (ANEXO A, Tabela 12), e os resultados mostraram que não houve diferença estatística entre as chapas produzidas com e sem a presença de nanopartículas para a determinação do MOE.

5.4. Ligação Interna

Os valores médios de ligação interna dos painéis, para cada tratamento, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios para Ligação Interna

Tratamento	LI (MPa)
T1	0,51 ab (13,4)
T2	0,51 ab (21,9)
T3	0,51 ab (15,9)
T4	0,54 a (16,7)
T5	0,49 ab (19,7)
T6	0,41 b (10,8)
T7	0,73 c (8,5)
T8	0,74 c (8,5)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

A análise de variância realizada para a resistência da ligação interna dos painéis (ANEXO A, Tabela 13) mostrou que houve diferença estatística entre os tratamentos. Os maiores valores médios encontrados foram para os tratamentos T7 e T8 (3 e 5% de TiO_2 em pó sem parafina, respectivamente), os quais não diferiram entre si, mas, diferiram estatisticamente de todos os demais.

Há autores, como Reijnders (2009), que citam como pontos positivos melhorias nas performances mecânicas de nanocompósitos com TiO_2 . Pereira (2007), em seu dossiê técnico sobre adesivos, cita alguns recheios (materiais não adesivos que melhoram as propriedades de trabalho, força, ou outras qualidades da colagem do adesivo), dentre alguns mais usados estão pó de madeira, sílica, dióxido de titânio e alumina.

Portanto, o TiO_2 acabou influenciando na composição do adesivo, melhorando as propriedades de ligação e colagem, aumentando significativamente a adesão interna dos painéis ensaiados.

Mesmo diferindo estatisticamente entre os tratamentos, todos os painéis apresentaram valores inseridos dentro dos limites para a norma brasileira NBR 14810 (ABNT, 2013), na qual a adesão interna não deve ser inferior a 0,35 MPa.

5.5. Arrancamento de parafuso

Os valores médios de arrancamento de parafuso na superfície (AP superfície) e no topo (AP topo) dos painéis, para cada tratamento, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Valores médios para arrancamento de parafuso em superfície e em topo

Tratamento	AP Superfície (N)	AP Topo (N)
T1	1458,7 a (20,1)	1235,0 a (17,3)
T2	1445,9 a (19,1)	1217,3 a (13,9)
T3	1452,6 a (16,4)	1170,1 a (18,1)
T4	1463,0 a (13,3)	1201,3 a (10,4)
T5	1504,1 a (10,5)	1355,8 a (9,6)
T6	1547,0 a (14,2)	1361,9 a (14,8)
T7	1534,7 a (10,3)	1526,8 b (13,8)
T8	1567,2 a (8,7)	1634,7 b (14,9)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

Por meio da análise de variância realizada para o arrancamento de parafuso, tanto de topo como de superfície (ANEXO A, Tabelas 14 e 15, respectivamente), constata-se que não houve diferença significativa para superfície, porém para topo os tratamentos T7 e T8 (3 e 5% de TiO_2 em pó sem parafina) diferiram significativamente dos demais, mas, foram equivalentes entre si.

O ensaio de arrancamento de parafuso na superfície, normalmente, tende a apresentar valores superiores de resistência em relação ao topo, devido, principalmente, ao fato do parafuso fixado no topo localizar-se exclusivamente na camada central do painel, onde geralmente ocorre a menor densificação. Esta relação foi evidenciada para os painéis de todos os tratamentos, com exceção dos painéis do tratamento T7 e T8 que, assim como para o ensaio de ligação interna, apresentaram aqui valores superiores aos demais.

Pode-se citar aqui, assim como aconteceu para o ensaio de adesão interna, o que Reijnders (2009) e Pereira (2007) relatam sobre as propriedades mecânicas e de força do TiO_2 e de nanos- TiO_2 , evidenciando assim o aumento no valor de resistência ao arrancamento de parafuso de topo.

A antiga NBR 14810 (ABNT, 2006), que se encontrava vigente até o final do ano 2013, estipulava valores mínimos de resistência ao arrancamento de parafusos iguais a 1.020 N (face) e 800 N (topo), para painéis do Tipo 2, na faixa de espessura entre 14 mm e 20 mm. Sendo assim, os valores médios dos painéis de todos os tratamentos atenderiam plenamente a antiga norma.

5.6. Perfil de Densidade

Os valores médios de massa específica dos painéis MDP, obtidos pelo método de atenuação de raios X, para o perfil, faces e miolo, de cada tratamento, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios de perfil, faces externas e miolo obtidos por atenuação de raios X

Tratamento	Massa específica (kg/m ³)		
	Perfil	Faces externas	Miolo
T1	608,17 a (2,27)	603,49 a (3,14)	581,48 a (2,33)
T2	613,88 a (2,62)	599,70 a (4,85)	590,68 a (2,36)
T3	611,75 a (1,76)	612,04 a (2,15)	587,93 a (1,96)
T4	616,39 a (2,37)	624,82 a (2,02)	589,42 a (3,23)
T5	616,86 a (2,56)	623,36 a (2,11)	593,49 a (3,25)
T6	611,94 a (2,0)	609,62 a (1,56)	586,75 a (1,62)
T7	614,30 a (2,21)	611,72 a (1,26)	585,32 a (1,78)
T8	612,74 a (2,0)	616,63 a (1,30)	589,22 a (1,16)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação.

De acordo com a análise de variância efetuada para as massas específicas do perfil de densidade, faces externas e miolo dos painéis (ANEXO B, Tabelas 16, 17 e 18, respectivamente), verifica-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos para nenhuma das variáveis analisadas.

Os perfis dos painéis tiveram formatos de letra “M”, apresentando maiores valores de massa específica nas faces e menores valores no miolo (Figura 12). Este formato é característico para painéis de madeira e exerce influência sobre quase todas as propriedades físicas e mecânicas (SICOPLAN, 1996; SUZUKI; MIYAMOTO, 1998; ELEOTÉRIO, 2000; AYRILMIS et al., 2012).

Figura 12. Perfis de densidade ao longo da espessura dos painéis. (a) Tratamento T1; (b) Tratamento T2; (c) Tratamento T3; (d) Tratamento T4; (e) Tratamento T5; (f) Tratamento T6; (g) Tratamento T7; (h) Tratamento T8

Conforme Wong et al. (1999), ao estudarem a formação do perfil de densidade e seus efeitos sobre as propriedades de aglomerados, produziram colchões com diferentes distribuições do teor de umidade das partículas: uniforme através do colchão e variável a partir das partículas das faces para as do miolo. Os autores constataram que a pressão de vapor formada nos colchões, durante a prensagem, com variação do teor de umidade não foi

suficientemente alta para permitir a completa penetração de calor em todo o miolo. Enquanto as faces, com maior teor de umidade, plasticizaram e densificaram, o miolo ainda se encontrava resistente à pressão. Quando o calor alcançou finalmente essa região, a maioria das partículas já havia sido comprimida, formando, como resultado, uma zona de baixa densidade. Tais painéis apresentaram perfis de densidade mais pronunciados, com maiores picos de densidade nas faces, quando comparados com aqueles de distribuição uniforme do teor de umidade das partículas.

Tem-se que foi adicionado às partículas da camada externa água na quantidade de 1%, baseado no peso seco das partículas, para auxiliar na transferência de calor para o miolo, e após a encolagem a média de umidade das partículas das camadas externas foi de 11% e da camada interna de 7%; ao se utilizar este recurso o perfil se torna mais pronunciado (faces externas mais densificadas e miolo menos densificado). Neste contexto, tanto a adição de TiO_2 em pó como em nanos não influenciaram a umidade e densificação dos painéis.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos no presente estudo, conclui-se o seguinte:

Não houve diferenças significativas entre os tratamentos adotados para as propriedades massa específica, teor de umidade, MOR e MOE à flexão estática, resistência ao arrancamento de parafusos na superfície, bem como para as massas específicas médias do perfil, faces externas e miolo dos painéis determinadas pela técnica de raios x. Sendo assim, não houve influência significativa da adição das nanopartículas e do pó de TiO_2 sobre tais propriedades. Adicionalmente, verificou-se que tais propriedades dos painéis de todos os tratamentos atenderam aos requisitos da norma adotada como referência.

Diferenças significativas entre os tratamentos foram verificadas para as propriedades de inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água (IE24h), taxa de não-retorno em espessura (TNRE), resistência da ligação interna (LI) e resistência ao arrancamento de parafusos no topo dos painéis (AP-topo).

No caso do IE24h apenas os painéis produzidos sem adição de TiO_2 (nas formas de nano e pó de maior granulometria) e com adição de parafina atenderam ao requisito da norma de referência, sendo que os painéis de todos os demais tratamentos extrapolaram o valor mínimo estabelecido. Dessa maneira, a adição de TiO_2 em ambas as formas, bem como a não adição de parafina tiveram influência negativa no IE24h dos painéis.

Para a TNRE diferenças significativas foram encontradas entre os painéis produzidos com a adição de TiO_2 (nano a 1%, pó a 3% e 5%) e os painéis de todos os demais tratamentos, sendo que os primeiros equivaleram-se entre si e mostraram aumento da TNRE, algo considerado negativo.

A LI dos painéis produzidos com adição de TiO_2 em pó a 3% e TiO_2 a 5% foi estatisticamente equivalente nestes casos e significativamente superior em relação à LI dos painéis de todos os demais tratamentos, demonstrando que tais adições tiveram influência positiva sobre esta propriedade. Contudo, os painéis de todos os tratamentos atenderam ao requisito da norma de referência. Para a propriedade de AP-topo verificou-se algo semelhante ao constatado para a propriedade de LI.

A adição de TiO_2 não teve influência significativa sobre várias propriedades e teve efeito significativamente negativo sobre o IE24h e TNRE. Embora tenha trazido benefício significativo para LI e AP-topo, esses benefícios não seriam tecnicamente necessários, pois, tais propriedades dos painéis produzidos sem a adição daquele composto atenderam aos requisitos da norma de referência. Sendo assim, por representar aumento de custo de produção sem obter benefícios tecnicamente justificáveis, uma eventual adição de TiO_2 na produção de painéis MDP em escala industrial, nas formas e proporções adotadas no presente estudo, não seria viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. **ABIPA**, Disponível em: < <http://www.abipa.org.br/>> Acesso em: 24 mar. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 149 p.
- AITKEN, E. **Analyses of the effect of silicon on fusarium wilt on banana**. Horticulture Australia, Sydney, 2010.
- AYESH, A.I. & AWWAD, F. J **Nanomater. Mol. Nanotechnol.**, dx.doi.org/10.4172/2324-8777. 1000e101, 2012.
- AYRILMIS, N.; KWON, J.H.; HAN, T.H. Effect of resin type and content on properties of composite particleboard made of a mixture of wood and rice husk. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 38, p. 79-83, 2012.
- BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 343-350, 2009.
- BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de Pinus sp tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- BLAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. Panoramas de mercado: painéis de madeira. Rio de Janeiro: **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, nº 32, p 49-90, 2010.
- BRANDÃO, F.D. **Identificação, quantificação e controle de defeitos em monocristais e nanopartículas de TiO₂**. 130f. Dissertação (Mestrado em Física), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BRITO, E.O. **Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de Pinus elliotti Engelm. Var. elliotti plantado no sul do Brasil**. 1995. 123 p. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- CAI, Z.; ROSS, R.J. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: ROSS, R.J. (Ed.). **Wood handbook: wood as an engineering material**. Wisconsin: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. chap. 12, p. 1-12.
- CALEGARI, L.; HASELEIN, C.R.; HACK, C.; GATTO, D.A.; BARROS, M.V.; SANTINI, E. J. Monitoramento da temperatura no interior de chapas aglomeradas durante o processo de prensagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 157-166, 2005.
- CHEN, X.; MAO, S.S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. **Chem. Rev.**, 107, p.2891-2959, 2007.
- CHEN, S.; XIAOHONG, L.; FANG, L.; WELLWOOD, R. Digital X-ray analysis of density distribution characteristics of wood based panels. **Wood Science and Technology**, New York, v. 44, n. 1, p. 85-93, 2010.
- CRISAN, M.; BRAILEANU, A.; CRISAN, D.; TEODORESCU, V.U.; BIRJEGA, R.; MARINESCU, V.E.; MADARÁSZ, J.; POKOL, G. TiO₂-based nanopoders obtained from diferente Ti-alkoxides. **J. Thermal. Anal. Calorim.**, 88, p.171-176, 2007.

- DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- DRELISH, J. J. **Nanomater. Mol. Nanotechnol.**, 2:1, doi: 10.4172/2324-8777.1000e105, 2013.
- DURÁN, N.; MORAIS, P.C.; MATTOSO, L.H.C. **Nanotecnologia: introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação**. Editora Artliber, 208 p., 2006.
- EISFELD, C. L. **Análise da competitividade entre as indústrias de painéis de madeira: compensado, MDP e OSB no estado do Paraná**. 2009. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- ELEOTÉRIO, J.R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 2000. 121 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- EUCALIPTO – A Madeira de Eucalipto. Revista da Madeira. **REMADE**, nº 59, set 2001.
- FERNANDEZ-PURATICH, H.; OLIVER-VILLANUEVA, J.V. **Quantification of biomass and energetic value of young natural regenerated stands of *Quercus ilex* under Mediterranean conditions**. *Bosque* 35(1):65–74. 2014.
- FERREIRA, B. S. **Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de *Eucalyptus saligna* com adição de casca de noz macadâmia**. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.
- FROST, M. B.; DIJKSTERHUIS, G.; MARTENS, M. **Food Quality and Preference**, 12, p.327, 2001.
- FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MULLER, U. Cement bonded composites: a mechanical review. **Bioresource Technology**, Barking, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.
- GARCIA, F.M.; MANTIO, D.R.; SANSÍGOLO, C.A.; MAGALHÃES, P.A.D. Rendimento no desdobro de toras de Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Tauari (*Couratari guianensis*) segundo a classificação da qualidade da tora. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 468-474, 2012.
- GARDNER, D.J.; TASCIOGLU, C.; WALINDER, M.E. **Wood composite protection**, in: Wood deterioration and preservation: advances in our changing world, Goodell, B., Nicholas, D.D., Schults, T.P. (Eds.), pp. 399–419. American Chemical Society, Washington D.C., 2003.
- GONÇALVES, R. M.; MATTOS, R. L. G.; CHAGAS F. B. Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas. **BNDES**, São Paulo, 27, p.121-156, mar. 2008.
- GUZ, I.A. **J Nanomater. Mol. Nanotechnol.**, 1:1 dx.doi.org/10.4172/2324-8777.1000e103, 2012.
- HAGHIGHI POSHTIRI, A.; TAGHIYARI, H.R.; KARIMI, A.N. **Fire-retarding properties of nano-wollastonite in solid wood**. *Philipp Agric Sci* 97(1):52–59. 2014.
- HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. **Wood Science and Technology**, New York, v. 4, p. 301-312, 1970.
- HUUSKONEN, M.S.; JARVISALO, J.; KOSKINEN, H.; NICKELS, J.; RASANEN, J.; ASP, S. **Preliminary results from a cohort of workers exposed to wollastonite in a Finnish limestone quarry**. *Scand J Work Environ Health* 9(2):169–175. 1983.
- IWAKIRI, S. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. 1989. 129 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

- IWAKIRI, S.; SILVA, J. R. M.; MATOSKI, S. L. S.; LEONHADT, G.; CARON, J. Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de *Pinus* tropicais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 137-142, 2001.
- IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005, 247 p.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira aglomerada**. Slides de aula. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinassetsuo/setsuo-pma.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2016.
- JIN, J.; DAI, C.; HSU, W. E.; YU, C. Properties of strand boards with uniform and conventional vertical density profiles. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, p. 559-574, 2009.
- KELLY, M.W. **A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards**. Madison: U.S. Forest Products Laboratory, 1977. 66 p. (General Technical Report, FPL-10)
- KUES, U. Wood Production, **Wood Technology, and Biotechnological Impacts**, Universitätsverlag Gottingen. 2007.
- LI, D. J **Nanomater. Mol. Nanotechnol.**, 1:1 dx.doi. org/ 10.4172/2324-8777.1000e102, 2012.
- KUMAR, A.; GUPTA, A.; SHARMA, K. V.; NASIR, M. Use of aluminum oxide nanoparticles in wood composites to enhance the heat transfer during hot-pressing. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.71, n.2, mar. 2012.
- MACHADO, J. S. **Placas de derivados de madeira: tipos de placas e sua especificação**. Lisboa: LNEC Divisão de edições e Artes Gráficas, 2005.
- MALONEY, T.M. **Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing**. 2nd ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.
- MANNING, M.J. Wood protection processes for engineered wood products. Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products. **FPS Symp. Proc.**, Madison, WI, pp. 131–136, 2002.
- MANTANIS, G. I.; PAPADOPOULOS, A. N. Reducing the thickness swelling of wood based panels by applying a nanotechnology compound. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.68, n.2, jan 2010.
- MARCONI, G.P.S. **Avaliação da ecotoxicidade de nanopartículas de dióxido de titânio e prata**. 207f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- MARRA, A.A. **Technology of wood bonding: principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.
- MATOS, J.L.M. **Ciclo de prensa em chapas de partículas estruturais “Waferboards”**. 1988. 163p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- MATOS, J.L.M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 117 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- 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, mar. 2008.
- MENDES, L. M. ***Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 2001. 138f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- MENDES, R.F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- MOSLEMI, A.A. **Particleboard: technology**. London: Southern Illinois University, 1974. v. 2, 245p.

- PEIXOTO, G.L.; BRITO, E.O. Avaliação da granulometria de partículas de *Pinus taeda* combinadas com adesivos comerciais para a fabricação de aglomerados. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 60-67, 2000.
- PEREIRA, L. R. **Dossiê Técnico: Adesivos**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Minas Gerais, 2007.
- 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.
- PINHEIRO, R. V. **Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira**. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- RANGAVAR, H.; HOSEINY fard, M. S. The effect of nanocopper additions in a urea-formaldehyde adhesive on the physical and mechanical properties of particleboard manufactured from date palm waste. **Mechanics of Composite Materials**, vol. 51, n. 1, March, 2015.
- REIJNDERS, L.; The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites. **Polym. Degrad. Stab.** 2009, 94, 873.
- ROUMELI, E.; PAPADOPOULOU, E.; PAVLIDOU, E.; VOURLIAS, G.; BIKIARIS, D.; PARASKEVOPOULOS, K. M.; CHRISSAFIS, K. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea-formaldehyde/nanoSiO₂ resins. **Thermochimica Acta** 527, p. 33-39, 2012.
- RUPRECHT, H.; VACIK, H.; STEINER, H.; FRANK, G. **Austrian J. For. Sci.**, 129 (2), 67. 2012.
- SABER, R.; SHAKOORI, Z.; SARKAR, S.; TAVOOSIDANA, G.H.; KHARRAZI, S.H.; GILL, P. **Spectroscopic and microscopic analyses of rod-shaped gold nanoparticles interacting with single-stranded DNA oligonucleotides**. IET Nanobiotechnol 7:42–49. 2013.
- SABDIN, S. B. **Use of nanoparticle in the wood composite to enhance the heat transfer**. 2010. 80f. Project Paper (Bachelor of Chemical Engineering) - Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Pahang, 2010.
- SALVADOR, A.; PASCUAL-MARTI, M. C.; ADELL, J. R.; REQUENI, A.; MARCH, J. G. **J. Pharm. and Biomed. Analysis**, v.22, p.301, 2000.
- SCHIMIDT, O. **Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
- SCHIMIDT, O. **Mycol. Prog.**, 6 (4), 261. 2007.
- SICOPLAN. **MDF plant: technology manual**. Brussels, 1996. v. 1.
- SILVA, G.A.; MENDES, L.M.; TRUGILHO, P.F.; MORI, F.A.; SANTOS, I.F.; PÁDUA, F.A. Efeitos de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.1, p.51-60, 2006.
- SILVA, A.P.S.; CAMPOS, C.I.; FERREIRA, B.S. Caracterização físico-mecânica de painéis de fibra com adição de nanopartículas de sílica. **XV EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**, Curitiba, 2016.
- SIQUEIRA, K.P. **Variabilidade da massa específica de *Pinus taeda* L. em diferentes classes de sítio**. 2004. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- SURDI, P.G. **Aproveitamento de resíduos do processamento mecânico de madeiras amazônicas para a produção de painéis aglomerados de alta densificação**. 200f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

- SUZUKI, S.; MIYAMOTO, K. Effect of manufacturing parameters on the linear expansion and density profile of particleboard. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 44, p. 444-450, 1998.
- TAGHIYARI, H.R. **Wood Sci. Tech.**, 46 (5), 939. 2012.
- TAGHIYARI, H.R.; MOBINI, K.; SARVARI SAMADI, Y.; DOOSTI, Z.; KARIMI, F.; ASGHARI, M.; JAHANGIRI, A.; NOURI, P. **Effects of nanowollastonite on thermal conductivity coefficient of médium density fiberboard**. J Nanomater Mol Nanotechnol, 2013.
- TAGHIYARI, H.R.; GHORBANALI, M.; TAHIR, P.M.D. **Effects of the improvement in thermal conductivity coefficient by nanowollastonite on physical and mechanical properties in mediumdensity fiberboard (MDF)**. BioResources 9(3):4138–4149. 2014.
- TAGHIYARI, H.R.; NOURI, P. Effects of nano-wollastonite on physical and mechanical properties of medium-density fiberboard. **Maderas**. Ciencia y tecnologia 17(4): 833 – 842, 2015.
- TAGHIYARI, H.R.; KARIMI, A.; TAHIR, P.Md. Organo-silane compounds in medium density fiberboard: physical and mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, vol. 26, n. 2, 2015.
- TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. 260f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. Forest Products Laboratory. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, cap. 9, p. 199-222, 1999.
- WANG, S.; WINISTORFER, P.; MOSCHLER, W.; HELTON, C. Hot-pressing of oriented strand board by stepclosure. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 3, p. 28-34, 2000.
- WONG, E.D.; ZHANG, M.; WANG, Q.; KAWAI, S. Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 44, p. 287-295, 1998.
- WONG, E.D.; ZHANG, M.; WANG, Q.; KAWAI, S. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. **Wood Science and Technology**, New York, v. 33, p. 327-340, 1999.

ANEXO A

Tabela 8. Análise de variância dos tratamentos para a variável massa específica

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	20223	2889	1.039	0.431
Residuals	24	66703	2779		

Tabela 9. Análise de variância dos tratamentos para a variável teor de umidade

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	0.1197	0.01710	1.658	0.167
Residuals	24	0.2475	0.01031		

Tabela 10. Análise de variância dos tratamentos para a variável inchamento em espessura

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	1037.0	148.14	55.61	2.69e-13*
Residuals	24	63.9	2.66		

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 11. Análise de variância dos tratamentos para a variável MOR

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	16.82	2.404	1.53	0.205
Residuals	24	37.71	1.571		

Tabela 12. Análise de variância dos tratamentos para a variável MOE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	379263	54180	1.47	0.225
Residuals	24	884510	36855		

Tabela 13. Análise de variância dos tratamentos para a variável ligação interna

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	0.3938	0.05626	23.06	3.38e-09*
Residuals	24	0.0586	0.00244		

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 14. Análise de variância dos tratamentos para a variável arrancamento de parafuso - superfície

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	57490	8213	1.376	0.26
Residuals	24	143278	5970		

ANEXO B

Tabela 15. Análise de variância dos tratamentos para a variável arrancamento de parafuso - topo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	786331	112333	10.29	6.47e-06*
Residuals	24	261927	10914		

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 16. Análise de variância dos tratamentos para a variável perfil de densidade

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	47	6.71	0.157	0.991
Residuals	24	1026	42.75		

Tabela 17. Análise de variância dos tratamentos para a variável perfil de densidade - faces externas

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	617.1	88.15	1.783	0.137
Residuals	24	1186.4	49.43		

Tabela 18. Análise de variância dos tratamentos para a variável perfil de densidade - miolo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	340.5	48.61	0.698	0.673
Residuals	24	1670.5	69.61		

Tabela 19. Análise de variância dos tratamentos para a variável taxa de não-retorno em espessura

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Amostra	7	235.09	33.58	23.94	2.31e-09*
Residuals	24	33.67	1.40		

* significativo ao nível de 5% de probabilidade