


unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANA PAULA SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO NAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PAINÉIS DE FIBRAS DE MADEIRA**

Guaratinguetá - SP
2018

ANA PAULA SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO NAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PAINÉIS DE FIBRAS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Conselho de Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica na área de materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos.

Coorientador: Prof. Dr. Higor Rogério Favarim.

Guaratinguetá - SP
2018

S586a Silva, Ana Paula Santos da
Análise da influência da adição de nanopartículas de ZnO nas propriedades físico-mecânicas e de transferência de calor em painéis de fibras de madeira / Ana Paula Santos da Silva – Guaratinguetá, 2018.
96 f : il.
Bibliografia: f. 89-96

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof.^a Dr.^a Criatiane Inácio de Campos
Co-Orientador: Prof. Dr. Higor Rogério Favarim

1. Painéis de madeira. 2. Eucalipto. 3. Nanotecnologia. I. Título.

CDU 624.011.1(043)


Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

ANA PAULA SANTOS DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

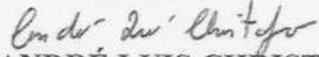
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.^a. Dr.^a. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^a. Dr.^a. **CRISTIANE INACIO DE CAMPOS**
Orientadora / UNESP/Itapeva


Prof. Dr. **JULIO CESAR MOLINA**
UNESP/Itapeva


Prof. Dr. **ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**
UFSCar/São Carlos

Fevereiro de 2018

DADOS CURRICULARES

ANA PAULA SANTOS DA SILVA

NASCIMENTO	08.02.1993 – ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	Iracema Santos de Oliveira Silva Andre Luis Pires da Silva
2011/2015	Curso de graduação em Engenharia Industrial Madeireira – Universidade Estadual Paulista - Câmpus Experimental de Itapeva.
2016/2018	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho de modo especial, à
minha mãe Iracema.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por todos os dias ter uma nova oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento, agradeço sempre pelo trabalho e estudo.

Agradeço a minha família por ser tão importante para mim e por auxiliar em todas as etapas da minha vida. Agradeço ao Renato e sua família por todo seu carinho e atenção.

Um enorme agradecimento em especial a minha mãe Iracema por estar ao meu lado todas as horas com seu amor e carinho incondicional, a cada momento de dúvida sempre estava lá com uma palavra amiga e um pensamento reconfortante.

Agradeço imensamente à minha orientadora professora Cristiane pela oportunidade de trabalharmos juntas na pesquisa e no desenvolvimento do trabalho, pela amizade, por sua dedicação e por todas as nossas conversas que sempre serão muito importantes. O meu mais sincero obrigada!

A aluna Maria Fernanda que me ajudou na produção dos painéis com muita dedicação, sem a sua ajuda não conseguiria concluir a produção dessa forma. Ela esteve sempre presente no trabalho.

Agradeço ao Bruno Ferreira pelo auxílio nas análises do trabalho, considerações finais e pela amizade construída através dos anos.

Um grande agradecimento ao professor Higor como coorientador que fez todo o possível para ajudar no trabalho, com as correções e principalmente nas etapas do desenvolvimento das nanopartículas.

Agradeço a aluna Luana Oliveira pelo auxílio no trabalho na etapa de produção de nanopartículas.

Agradeço ao professor Alexandre pela contribuição com o trabalho na etapa de amostragem de temperatura através do sistema de aquisição de dados, deixo meu agradecimento pela paciência nas explicações.

Deixo aqui meu agradecimento a minha amiga Bruna que desde o início da graduação esteve sempre presente na minha vida, compartilhando os momentos de alegria. Agradeço a minha amiga Maiara pelo apoio fora da pesquisa que com toda certeza fez a diferença.

Queria agradecer ao Felipe pelo auxílio desde sempre, com o trabalho de graduação e agora com o mestrado. Sempre disposto a ajudar de todas as formas, quero sempre dizer meu muito obrigada, e em qualquer situação pode contar comigo.

Agradeço aos meus alunos da Etec Dario Pacheco por me proporcionar melhor desenvolvimento nas explicações dos diversos assuntos, me acolher no primeiro ano de trabalho e pela amizade que sempre vai permanecer.

A empresa Eucatex de Salto-SP que contribuiu de forma significativa com o trabalho em todas as formas, no início e no desenvolvimento do processo de produção de painéis com matérias-primas. À empresa muito obrigada!

Agradeço a todos os funcionários da Unesp de Itapeva que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Um agradecimento a fundação Capes pela bolsa de mestrado para o desenvolvimento da pesquisa.

SILVA, A. P. S. **Análise da influência da adição de nanopartículas de ZnO nas propriedades físico-mecânicas e de transferência de calor em painéis de fibras de madeira.** 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

RESUMO

O segmento de painéis à base de madeira tem se destacado no setor madeireiro pelo uso de tecnologia moderna em seus equipamentos e uso mais racional da matéria-prima. No entanto, a busca por produtos melhores e mais competitivos é constante tendo em vista o mercado ser bastante exigente. Sendo assim, definiu-se como objetivo deste estudo a adição de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) na fabricação de painéis de fibras de média densidade e avaliar as influências das mesmas nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos com dois adesivos comerciais e ainda verificar a influência das nanopartículas na transferência de calor durante o processo de prensagem. Os painéis foram produzidos com adição de 0,5% e 1% de nanopartículas com base no peso seco de fibras e painéis testemunha com resina ureia-formaldeído (UF) e melamina-formaldeído (MF) e, os mesmos caracterizados a partir da ABNT NBR 15.316-2:2015. Durante o processo de prensagem através de sistema de aquisição de dados acoplado a um termopar foram obtidas as variações de temperatura do colchão ao longo dos dez minutos do ciclo de prensagem. A partir dos resultados pode-se concluir que o uso das nanopartículas na proporção de 0,5% de nanopartículas não indicou grandes interferências nas propriedades físico-mecânicas dos painéis estudados. A adição de 1% de nanopartículas tanto nos tratamentos com MF e UF interferiu de forma negativa na interação com o adesivo e, assim, reduziu as propriedades físicas e mecânicas dos painéis e, auxiliou a transferência de calor a partir do segundo ciclo de prensagem.

PALAVRAS-CHAVE: MDF. Eucalipto. Caracterização física. Caracterização mecânica.

SILVA, A. P. S. **Analysis of the influence of the addition of ZnO nanoparticles in the physico-mechanical properties and heat transfer in wood fiberboards.** 2018. 96 f. Dissertation (Master degree in Mechanical Engineering) – School of Engineering of Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2018

ABSTRACT

The wood-based panels stood out in the wood segment by the use of modern technology in their equipment and more rational use of the raw material. However, the demand for better and more competitive products is constant, given that the market is quite demanding. Thus, the aim of this study was to add zinc oxide (ZnO) nanoparticles in the production of medium density fiberboards and to evaluate their influence on the physical and mechanical properties of the panels produced with two commercial adhesives and to verify the influence of nanoparticles on the heat transfer during the pressing process. The panels were produced with 0.5% and 1% of nanoparticles based on the dry weight of fibers and control panels with urea-formaldehyde (UF) and melamine-formaldehyde resin (MF) and characterized by ABNT NBR 15.316-2:2015. During the pressing process through a data acquisition system coupled to a thermocouple, the temperature variations of the mattress were obtained during the ten minutes of the pressing cycle. From a preliminary analysis of the results it can be concluded that the use of nanoparticles in the proportion of 0.5% of nanoparticles did not indicate large interferences in the physical-mechanical properties of the panels studied. The addition of 1% of nanoparticles in both MF and UF treatments interfered negatively in the interaction with the adhesive and thus reduced the physical and mechanical properties of the panels and assisted the heat transfer from the second pressing cycle.

KEYWORDS: MDF. Eucalyptus. Physical characterization. Mechanical characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão do setor florestal em dois grupos principais segundo a ABIMCI.....	22
Figura 2- Localização das empresas produtoras de painéis.....	23
Figura 3 – Disposição de lâminas nos painéis compensados.	25
Figura 4 - Painel MDP com destaque para a composição em camadas.	27
Figura 5 – Distribuição das lacas entre as camadas constituintes do painel OSB.....	27
Figura 6 – MDF cru com diversas espessuras.	29
Figura 7 – Fluxograma de produção de painéis de fibras em escala industrial.	30
Figura 8 – Aspectos macroscópicos da madeira em uma seção transversal do tronco de uma árvore.....	33
Figura 9 – Diferença da seção transversal da madeira de coníferas (esquerda) e a seca transversal da madeira de folhosas (direita).	34
Figura 10 – Estrutura de ligação melamina-formaldeído.	36
Figura 11 – Painel MDF Fire.....	40
Figura 12 – Painéis da linha Plus.	40
Figura 13 - Diagrama de bloco ilustrativo do procedimento de síntese.....	48
Figura 14 – Solução do início do desenvolvimento de nanopartículas.	48
Figura 15 – Sequência de secagem do material.....	49
Figura 16 – Sequência de preparação do material: (a) Material após o processo de queima inicial. (b) Acondicionamento em cadinhos.	49
Figura 17 – Nanopartículas de óxido de zinco.	49
Figura 18 - Formação de grumos da mistura da parafina com o adesivo.....	53
Figura 19 - Secagem das fibras em estufa.	54
Figura 20 - Mistura de materiais no adesivo.	54
Figura 21 – Encoladeira para a aplicação de adesivo em laboratório.	55
Figura 22 - Caixa formadora com lote de fibras já na posição para a pré-prensagem.	55
Figura 23– Etapa de pré-prensagem.	56
Figura 24 – Colchão de fibras após a pré-prensagem.....	56
Figura 25 – Prensa hidráulica para o processo de prensagem.	57
Figura 26 – Painéis produzidos com melamina-formaldeído após o esquadrejamento: (a) sem adição de nanopartículas; (b) com adição de 0,5 % de nanopartículas.	57
Figura 27 - Painéis produzidos com ureia-formaldeído após o esquadrejamento: (a) sem adição de nanopartículas; (b) com adição de 0,5 % de nanopartículas.	58

Figura 28 – Painéis produzidos com adição de 1% de nanopartículas: (a) Painéis produzidos com melamina-formaldeído; (b) painéis produzidos com ureia-formaldeído.	58
Figura 29 - Pesagem e identificação dos corpos de prova.....	59
Figura 30- Ensaio de flexão estática: corpo de prova acoplado no equipamento.....	62
Figura 31 - Os componentes do sistema DAQ.	64
Figura 32 – Termopar tipo K utilizado no processo.....	64
Figura 33 - Dispositivo DAQ utilizado para medição da temperatura.	64
Figura 34 – Conjunto realizando medições no processo de prensagem.	65
Figura 35 – Posicionamento do termopar no colchão de fibras.	65
Figura 36– Resultados dos tratamentos para o ensaio de densidade.	68
Figura 37 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas na densidade dos painéis para os adesivos MF e UF.	69
Figura 38 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de teor de umidade.	70
Figura 39 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no teor de umidade para os adesivos MF e UF.....	71
Figura 40 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de inchamento 24h.	71
Figura 41 - Gráfico de interação para a adição de nanopartículas no inchamento em espessura 24h dos painéis para os adesivos MF e UF.	73
Figura 42 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de módulo de ruptura.	74
Figura 43 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no módulo de ruptura dos painéis para os adesivos MF e UF.	76
Figura 44- Resultados dos tratamentos para o ensaio de módulo de elasticidade.	76
Figura 45 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no módulo de elasticidade dos painéis para os adesivos MF e UF.	78
Figura 46 - Difratoograma para a amostra de nanopartículas de óxido de zinco.	79
Figura 47 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis sem adição de nanopartículas produzidos com UF.	80
Figura 48 – Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 0,5% de nanopartículas produzidos com UF.....	82
Figura 49 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 1 % de nanopartículas produzidos com UF.....	83
Figura 50 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis sem adição de nanopartículas produzidos com MF.	84

Figura 51- Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 0,5% de nanopartículas produzidos com MF. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Consumo de painéis à base de madeira no mundo entre 1995 e 2012.	24
Tabela 2 – Classificação de painéis de fibras de média densidade por densidade.	28
Tabela 3 – Processo de produção MDF.....	31
Tabela 4 – Características do cerne e do alburno de dois clones de <i>Eucalyptus urograndis</i> . ..	35
Tabela 5 - Insumos empregados na produção dos painéis.....	51
Tabela 6- Valores médios obtidos através dos testes físicos.	67
Tabela 7 - Valores médios obtidos através dos testes mecânicos.....	74
Tabela 8 - Variação de temperatura no decorrer da prensagem para os tratamentos.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
CPA	<i>Composite Panel Association</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
HDF	<i>High Density Fiberboard</i>
EGP	<i>Edge Glued Panel</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
REMADE	Revista da Madeira
UF	Ureia formaldeído
MF	Melamina formaldeído
FF	Fenol formaldeído
ZnO	Óxido de zinco
Min	Minutos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 OBJETIVO GERAL	21
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 SEGMENTO MADEIREIRO DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS	22
3.2 PAINÉIS A BASE DE MADEIRA	24
3.2.1 Painéis de lâminas	25
3.2.2 Painéis de partículas	26
3.2.3 Painéis de fibras	28
3.3 PAINÉIS MDF	29
3.3.1 Processo produtivo	30
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF	33
3.4.1 Madeira	33
3.4.1.1 Madeira de eucalipto	31
3.4.2 Adesivo	35
3.4.2.1 Ureia-formaldeído	35
3.4.2.2 Melamina-formaldeído	36
3.4.2.3 Fenol-formaldeído	33
3.4.2.4 Resorcinol formaldeído	34
3.4.3 Aditivos	38
3.4.3.1 Parafina	35
3.4.3.2 Catalisador	36
3.4.3.3 Inseticidas, Retardante de fogo, outros	36
3.5 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS	41
3.5.1 Nanopartículas	41
3.5.1.1 Métodos de obtenção de nanopartículas	38
3.5.1.2 Uso de nanopartículas em painéis à base de madeira	40
3.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE PRENSAGEM	45
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS A PARTIR DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1 MATERIAIS PARA A PRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS	47

4.2 MÉTODO PARA A PRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS	47
4.3 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO.....	50
4.4 MATERIAIS PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF	50
4.5 MÉTODOS PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF	51
4.5.1 Formulação dos painéis	51
4.5.2 Estudos preliminares para a produção de painéis.....	52
4.5.3 Processo de produção definitivo dos painéis MDF	53
4.6 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL MDF	58
3.6.1 Testes físicos	59
4.6.1.1 Determinação da densidade.....	55
4.6.1.2 Determinação do teor de umidade.....	56
4.6.1.3 Determinação do inchamento por 24h.....	56
4.6.2 Testes mecânicos	61
4.6.2.1 Determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade.....	57
4.7 MÉTODO PARA A ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
4.8 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO PAINEL DURANTE O PROCESSO DE PRENSAGEM	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1 RESULTADOS DOS TESTES FÍSICOS DOS PAINÉIS MDF PRODUZIDOS COM <i>Eucalyptus grandis-híbrido</i> H103.	67
5.1.1 Ensaio de densidade.....	67
5.1.2 Ensaio de teor de umidade.....	69
5.1.3 Ensaio de inchamento em espessura por 24h	71
5.2 RESULTADOS DOS TESTES MECÂNICOS DOS PAINÉIS MDF PRODUZIDOS COM <i>Eucalyptus grandis-híbrido</i> H103.	74
5.2.1 Determinação da resistência à flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade).....	74
5.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO.....	78
5.4 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	79
5.4.1 Análise de temperatura dos painéis produzidos com UF	80
5.4.2 Análise de temperatura dos painéis produzidos com MF.....	83
6 CONCLUSÕES	86

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

O segmento florestal madeireiro vem apresentado crescente expansão há várias décadas com destaque para a indústria de papel e celulose, de processamento mecânico da madeira e também de painéis à base de madeira reconstituída.

Os painéis à base de madeira apresentam grande aplicação na construção civil e indústria moveleira com destaque para os painéis particulados e painéis de fibra. A indústria de painéis à base de madeira conquistou mercado no Brasil, especialmente, na década de 1990 com a implantação de novas unidades fabris e novos produtos como os painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*) que teve a primeira fábrica instalada na cidade de Agudos/SP no ano de 1997.

A produção dos painéis MDF é realizada através de prensas contínuas com a adição de adesivos e calor. Os adesivos normalmente empregados pelas indústrias do setor são a ureia-formaldeído e a melamina-formaldeído, dependendo do ambiente onde serão empregados.

As características principais dos painéis produzidos com fibras são sua melhor usinagem e acabamento no desenvolvimento de produtos e suas aplicações podem ser em peças retas, curvas, com baixo relevo e entalhes.

Nos painéis MDF existem alterações que podem resultar em problemas associados à sua utilização. Em condições mais agressivas de umidade podem ocorrer alterações dimensionais gerando diminuição da resistência mecânica. Outro fator que deve ser considerado é o ataque de organismos xilófagos, que consomem os painéis resultando em diminuição de massa e deterioração do material, comprometendo a vida útil do produto final.

Para diminuir os possíveis aspectos negativos das chapas outros materiais podem ser adicionados durante o processo de fabricação, materiais como a parafina que auxilia na diminuição de inchamento dos painéis. Além dos produtos utilizados comercialmente atualmente, novos estudos surgem com o objetivo de melhorar as propriedades dos painéis quanto ao desempenho físico-mecânico e, também, visando maior durabilidade do produto.

Neste contexto, as nanopartículas também são exemplos de materiais que vem apresentando bons resultados com diminuição de inchamento e perda de massa dos painéis em pesquisas realizados em nível nacional e internacional. Outro aspecto relevante para as nanopartículas metálicas refere-se ao seu bom comportamento nos painéis à base de madeira durante o processo de prensagem, pois as mesmas auxiliam na transferência de calor.

Neste trabalho foram adicionadas nanopartículas de óxido de zinco na produção dos painéis MDF para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos mesmos, com adição de

nanopartículas em duas porcentagens e com dois tipos de adesivos diferentes para realizar a comparação com painéis testemunha (sem adição de nanopartículas). A proposta da adição de nanopartículas também visou avaliar o desempenho das mesmas quanto a transferência de calor durante o processo de prensagem, e assim, avaliar se a adição em diferentes proporções com diferentes adesivos tem influência efetiva nesta etapa do processo produtivo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação foi dividida em cinco partes, sendo elas:

CAPÍTULO 01 – Introdução – uma breve apresentação do segmento florestal, a indústria de painéis com relação aos painéis de fibras, possíveis alterações nos painéis MDF que podem existir decorrentes a sua utilização, possíveis materiais adicionados para melhorar o desempenho dos mesmos, nanopartículas e breve apresentação do trabalho.

CAPÍTULO 02 – Revisão bibliográfica – apresenta o segmento madeireiro, painéis à base de madeira, materiais utilizados para a produção de painéis à base de madeira e o processo produtivo dos painéis. Definição de nanopartículas e sua aplicação nos produtos engenheirados de madeira.

CAPÍTULO 03 – Materiais e métodos – relata os materiais, equipamentos utilizados, a metodologia utilizada para cada etapa do trabalho, a metodologia empregada para a caracterização dos painéis nos testes físicos e mecânicos com base no documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 e a análise estatística dos resultados a partir do *software* livre R.

CAPÍTULO 04 – Resultados e Discussões – traz os resultados obtidos nos testes realizados e as discussões com base nos estudos bibliográficos e documentos normativos.

CAPÍTULO 05 – Conclusões – finaliza a dissertação com as conclusões finais do trabalho, embasadas nos resultados obtidos e na literatura do assunto.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi a caracterização de painéis MDF produzidos com fibras de eucalipto adicionando-se nanopartículas de óxido de zinco na fabricação de modo a avaliar o desempenho das mesmas nas propriedades físico-mecânicas destes painéis e, também avaliar a influência das mesmas na transferência de calor durante o processo de prensagem.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a)** Avaliar a viabilidade da adição das nanopartículas de óxido de zinco em duas diferentes porcentagens em painéis MDF;
- b)** Avaliar o desempenho físico-mecânico dos painéis MDF em comparação a produtos comerciais e documentos normativos;
- c)** Analisar da variação de temperatura durante o processo de prensagem e, possível influência da adição de nanopartículas de óxido de zinco.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

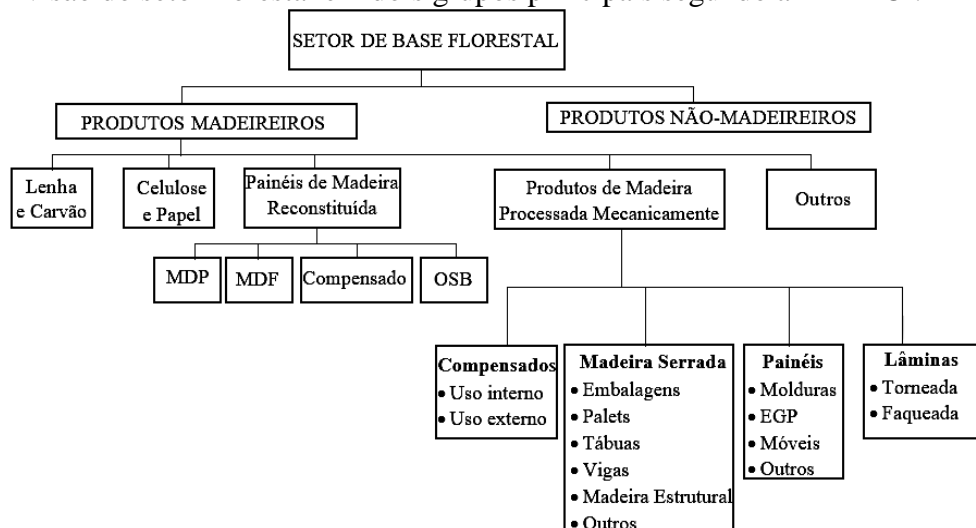
3.1 SEGMENTO MADEIREIRO DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2014) o setor florestal pode ser subdividido em dois grandes grupos de produtos:

- Não madeireiros;
- Madeireiros.

No grupo de produtos não madeireiros destacam-se produtos não lenhosos como frutas, óleos, resinas, bambu, entre outros. O grupo de produtos madeireiros abrange os produtos de madeira processada mecanicamente, polpa celulósica e papel, painéis reconstituídos, dentre outros. No grupo dos produtos de madeira processada mecanicamente destaca-se a madeira serrada, lâminas e chapas de madeira. A Figura 1 apresenta os dois grandes grupos de produtos do setor florestal e suas derivações como proposto pela ABIMCI (2014).

Figura 1 – Divisão do setor florestal em dois grupos principais segundo a ABIMCI.



Fonte: Adaptado de ABIMCI, 2014.

O Brasil apresenta competitividade e grande participação no mercado de produtos florestais no setor de produtos madeireiros e não madeireiros, devido suas características relacionadas ao solo e clima favoráveis e do desenvolvimento tecnológico das áreas de silvicultura e manejo florestal. A atividade florestal e sua cadeia produtiva são caracterizadas pela grande diversidade de produtos, suas atividades incluem desde a produção até a transformação da madeira *in natura* em polpa celulósica, papel, painéis de madeira

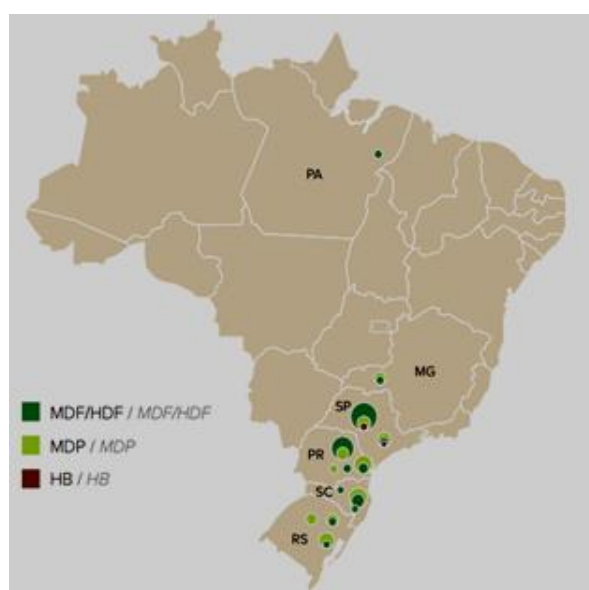
reconstituída, pisos laminados, madeira serrada, carvão vegetal, móveis, além dos produtos não madeireiros (MOREIRA; OLIVEIRA, 2016).

Os produtos do setor florestal que estão presentes no cotidiano da população vão desde os mais evidentes, como papel e móveis, até produtos de beleza, medicamentos, produtos alimentícios e roupas. Pode-se destacar também, a presença dos produtos florestais no setor de bens de consumo como indústrias gráficas, de embalagem, química, têxtil e a construção civil (IBÁ, 2016).

A produção florestal comercial também contribui para a geração de empregos na economia nacional de forma direta e indireta. Foram mais de 668 mil empregos diretos gerados pelo setor em 2013, sendo que a maior porcentagem de geração de emprego está nas atividades de beneficiamento posteriores da sua cadeia produtiva, nos processos de transformação e agregação de valor ao produto florestal (EMBRAPA, 2016).

De acordo com IBÁ (2016) um dos segmentos madeireiros com maior representatividade mundial quanto aos produtores encontra-se no setor de painéis de madeira reconstituída e pisos laminados, que ocupou o 8º lugar no *ranking* mundial. Existem no Brasil atualmente 18 unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída e/ou pisos laminados, sendo que a maior parte está localizada nas regiões Sul e Sudeste. A Figura 2 ilustra a localização das principais empresas produtoras de painéis de madeira reconstituída. A dimensão dos círculos representa o nível relativo a capacidade de produção dessas unidades.

Figura 2- Localização das empresas produtoras de painéis.



Fonte: Adaptado de IBÁ (2016).

Segundo o panorama de mercado de painéis de madeira do BNDES (2014), quanto ao desempenho por produtos florestais, pode-se observar que os grandes destaques globais são o MDF e o MDP (*Medium Density Particleboard*) (Tabela 1). O setor de painéis MDF foi o que apresentou a maior variação nas porcentagens de consumo quando comparado aos outros tipos de painéis de madeira reconstituída. Passou de 5% do consumo mundial em 1995 para 26% em 2012. O MDP, apesar de ter perdido participação no total (de 46% em 1995 para 32% em 2012), em parte por causa da concorrência com outros tipos de painéis, manteve a liderança como o principal painel de madeira consumido.

Tabela 1- Consumo de painéis à base de madeira no mundo entre 1995 e 2012.

Tipo de painel de madeira	Consumo (mil m ³)			Consumo % do total			Variações no volume (m ³) a.a	
	1995	2003	2012	1995	2003	2012	1995-2003	2003-2012
MDF	7.637	32.389	80.606	5	14	26	3.094	5.357
MDP	64.949	92.023	98.452	46	39	32	3.384	714
OSB	282	25.109	20.095	0	11	7	3.103	557
Compensados	54.630	72.508	84.017	39	30	27	2.235	1.279

Fonte: Adaptado de BNDES 2014.

Com base nos dados apresentados anteriormente, verifica-se que o segmento de painéis à base de madeira tem conquistado mercado em todo o mundo, o que mostra a necessidade de inovações e melhorias visando conquistar novas aplicações e usos.

3.2 PAINÉIS A BASE DE MADEIRA

O Brasil é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira reconstituída a partir de árvores provenientes de reflorestamento. Este fato se deve aos contínuos investimentos em tecnologia e automação das empresas e processos produtivos, além das melhorias nas práticas e operações florestais. O país apresenta empresas com grande desenvolvimento tecnológico que construíram versáteis e modernos parques industriais destinados à instalação de novas unidades, ou ainda a atualização tecnológica das plantas industriais que já estavam em funcionamento, as atualizações ocorreram na implantação de linhas contínuas de produção, de impregnação, de revestimento e de pintura (IBÁ, 2015).

As espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* tropicais surgiram como boas alternativas para produção de painéis à base de madeira, tendo em vista a necessidade de uso de madeiras com características diferenciadas em relação àquelas tradicionalmente empregadas para essa

finalidade e, por seu rápido crescimento para abastecer a indústria de painéis (IWAKIRI *et al.*, 2001).

Os painéis à base de madeira caracterizam-se pela sua variabilidade física e propriedades mecânicas. Os principais tipos de painéis produzidos mundialmente são chapas compostas de partículas, painéis de fibras de alta densidade (HDF – *High Density Fiberboard*) e painéis de fibras de média densidade (MDF), e outros painéis compósitos, tais como painel compensado e chapa de fibra dura (*Hardboard*) (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2011).

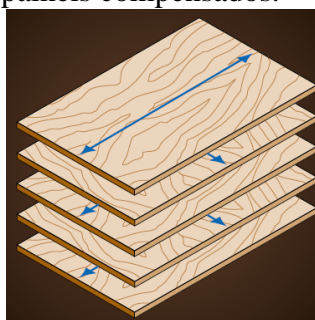
Dentro do segmento de painéis à base de madeira pode-se destacar três grupos principais: os laminados, particulados e de fibras.

3.2.1 Painéis de lâminas

No grupo dos painéis laminados pode-se destacar o painel compensado, o LVL (*Laminated Veneer Lumber*), EGP (*Edge Glued Panel*), CLT (*Cross Laminated Timber*).

O painel compensado é produzido a partir de lâminas de madeira dispostas perpendicularmente e em número ímpar. A conformação deste painel garante tanto melhor estabilidade dimensional como melhor distribuição da resistência nos sentidos longitudinal e transversal (IWAKIRI, 2005; APA, 2010). Pode-se observar na Figura 3 um exemplo da distribuição das lâminas de madeira na composição do painel.

Figura 3 – Disposição de lâminas nos painéis compensados.



Fonte: APA, 2010.

Ainda dentro do grupo dos painéis laminados pode-se citar o LVL que é a abreviação de *Laminated Veneer Lumber*, e tem o significado de painel de lâminas paralelas. É um material composto de lâminas de madeira orientadas na mesma direção e unidas por adesivo, utilizado com grande versatilidade em soluções, principalmente estruturais, onde grande resistência à flexão é requerida (PALMA; BALLARIN, 2011).

Dentro desse grupo, mais recentemente surgiu a madeira laminada cruzada, em inglês *Cross Laminated Timber* (CLT). É um painel de madeira que é composto de camadas de lâminas de madeira maciça dispostas em sentido oposto e alternado, entremeadas de adesivo estrutural e à prova d'água e submetidas a grande pressão. O CLT é cada vez mais utilizado em elementos de pavimento, elementos de edifícios residenciais e como placas de convés em construções de pontes (GÜLZOW, 2010).

E, por fim, ainda neste segmento de painéis laminados, pode-se citar o EGP, cuja sigla que significa em inglês significa *Edge Glued Panel*. Este painel é composto de sarrafos colados lateralmente e nos topos são unidos através “*finger joints*”. Após a obtenção de sarrafos em medidas padrões, as peças serradas passam por processo de aplainamento com o objetivo de homogeneizar a largura e a espessura dos sarrafos. A junção lateral de sarrafos pode ser feita através da colagem lateral, ou por sistema de “amarração”, que consiste em aplicação de fios de nylon com cola “*hot melt*”, aplicados no sentido perpendicular aos sarrafos (IWAKIRI, 2005).

3.2.2 Painéis de partículas

Um dos exemplos de painéis particulados são os painéis MDP, uma evolução dos painéis de madeira aglomerada, os quais possuem três camadas, sendo as camadas das faces com partículas menores e uma camada com partículas maiores no centro do painel. A matéria-prima utilizada tipicamente no Brasil é madeira de reflorestamento de Pinus e Eucalipto (MESQUITA *et al.*, 2016). As partículas são aglutinadas e compactadas entre si com resina sintética por meio da ação conjunta de pressão e calor em prensa contínua (IBÁ, 2015).

O MDP é principalmente empregado na produção de móveis, tais como armários, prateleiras e divisórias e de forma secundária, em pisos de madeira (SILVA *et al.*, 2013). A Figura 4 apresenta o perfil do painel MDP com a distribuição de camadas com diferentes tamanhos de partículas.

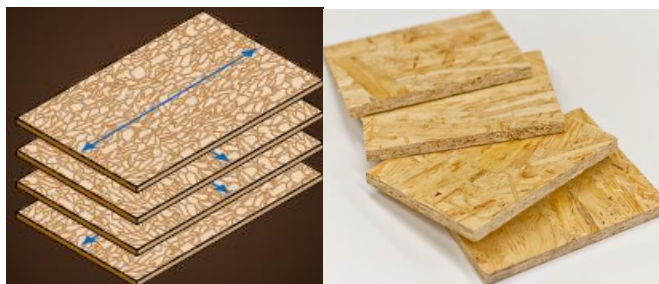
Figura 4 - Painel MDP com destaque para a composição em camadas.



Fonte: Site Dell Ano, 2015.

Outro painel particulado é o OSB. A sigla OSB significa *Oriented Strand Board*, ou seja, painel de lascas orientadas, com distribuição de lascas de madeira perpendiculares semelhante a orientação do painel compensado, para a criação de um painel resistente. O OSB é composto por lascas de madeira de forma rectangular dispostas em camadas perpendiculares uma à outra (Figura 5). A união das lascas do OSB é realizada através de adesivos termofixos. Cerca de 85 a 90% da árvore proveniente de reflorestamento é utilizada para a produção dos painéis estruturais, e o restante casca e serragem podem ser convertidos em energia (APA, 2010).

Figura 5 – Distribuição das lascas entre as camadas constituintes do painel OSB.



Fonte: APA, 2010.

A aplicação do painel OSB destina-se principalmente como base para paredes, pisos e forros em construções residenciais; embalagens; pallets; estandes para exposição; armações para mobília; tapumes e divisórias; *decks* e plataformas; paredes de carrocerias de caminhões; almas para vigas estruturais em “I”, entre outros (IWAKIRI, 2005).

No grupo dos painéis particulados produzidos do Brasil destacam-se o MDP e OSB, que possuem grande aplicação na indústria moveleira e construção civil respectivamente.

3.2.3 Painéis de fibras

Os painéis de fibras de madeira se caracterizam como um produto de estrutura altamente homogênea e isotrópica, devido ao seu processo de produção. A utilização de fibras de madeira individualizadas e sua deposição de forma aleatória ao plano da chapa conferem ao produto grandes vantagens em termos de homogeneidade das propriedades. Os painéis de fibras podem ser destinados a uma ampla gama de aplicações, tais como: painéis de isolamento térmico e acústico; divisórias internas; móveis; portas; molduras; revestimentos em geral; entre outros, em função da densidade do painel e do processo de produção (MENDES *et al.*, 2005).

Uma das formas de classificação dos painéis de fibras é através de sua densidade. A Tabela 2 apresenta a classificação das chapas de fibras de acordo com o documento normativo NBR 15316-2:2015.

Tabela 2 – Classificação de painéis de fibras de média densidade por densidade.

Espessura (mm) \ Densidade(kg/m ³)	> 800	651 a 800	631 a 650	551 a 630	450 a 550
	≤ 6,0	HDF	MDF	-	-
> 6,0 a 9,0	HDF	MDF	<i>Light</i>	<i>Light</i>	-
> 9,0 a 12,0	-	MDF	<i>Light</i>	<i>Light</i>	<i>Ultralight</i>
> 12,0 a 19,0	-	MDF	<i>Light</i>	<i>Light</i>	<i>Ultralight</i>
> 19,0 a 30,0	-	MDF	MDF	<i>Light</i>	<i>Ultralight</i>
> 30,0	-	MDF	MDF	<i>Light</i>	<i>Ultralight</i>

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15316-2: 2015.

Os painéis de fibras com densidade superior a 800 kg/m³ são os painéis *High Density Fiberboard* (HDF), ou ainda, painéis de fibras de alta densidade. As fibras de madeira são encoladas e compactadas entre si por meio da resina sintética e ação conjunta de pressão e calor através da prensa contínua em indústrias do setor. O HDF é um painel homogêneo, com excelente estabilidade dimensional, de superfície uniforme, lisa e com espessura de até 9 mm. Os painéis HDF são indicados para a fabricação de móveis em fundo de armários e gavetas, para embalagens de produtos de diversas indústrias, artesanatos em geral e brinquedos. Na construção civil é utilizado em pisos laminados, divisórias e portas (IBÁ, 2015).

O painel *hardboard* também denominado como chapa dura é produzido em uma ampla variedade de espessuras (GRANUM; EUSTIS, 1999). As empresas de chapa dura transformam troncos de eucalipto em cavacos e, posteriormente, em processos industriais a produção de fibras de madeira. As fibras são diluídas em água produzindo uma pasta, a qual é depois filtrada e comprimida para formar os painéis (MORABITO; BELLUZZO, 2006).

A chapa dura é um painel cujas características principais são a alta densidade e a resistência física, que proporcionam acabamentos de alto padrão para o produto. A chapa dura pode ser trabalhada de diversas formas: estampada, curvada, moldada, usinada, cisalhada e pintada (IBÁ, 2015).

Outro exemplo de chapa de fibra é a chapa isolante, que é um painel de baixa densidade. Produzidos pelo processo úmido e sem prensagem, estes são classificados como S-0-S, ou seja, duas faces com marca de tela (nenhuma face lisa) (IWAKIRI, 2005).

Os painéis de fibra isolante são materiais promissores que fornecem baixa condutividade térmica. Se comparados com outros materiais isolantes comerciais atuais utilizados para construções, como espumas plásticas e lãs minerais, os painéis possuem propriedades superiores se expostos ao calor (KAWASAKI *et al.* 2006).

3.3 PAINÉIS MDF

O MDF (*Medium Density Fiberboard*) é um produto de madeira engenheirado formado por fibras de madeira, obtidas através do desfibrador. A formação dos painéis de fibra ocorre através da combinação da aplicação de adesivos, temperatura e prensagem contínua. O processo de fabricação de MDF nas indústrias do setor é altamente automatizado (Piekarski *et al.* 2014). A Figura 6 representa o painel MDF com diversas espessuras.

Figura 6 – MDF cru com diversas espessuras.



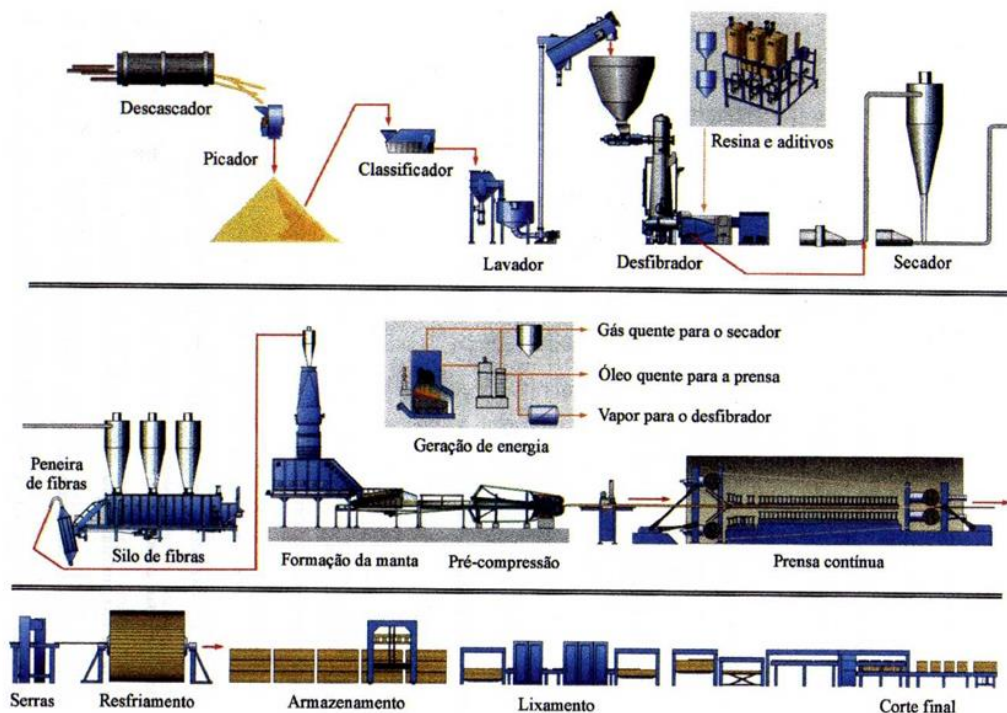
Grande parte da produção dos painéis MDF é empregada em ambientes interiores não estruturais. Possuem superfícies lisas que facilitam a usinagem de bordas onde o painel pode ser usinado como madeira maciça. O MDF é, portanto, um produto popular com demanda global crescente. Apesar do aumento da demanda mundial por painéis MDF, existem alguns problemas associados à sua utilização. Geralmente, sob condições de aumento do teor de umidade, as chapas MDF são dimensionalmente instáveis. Eles absorvem a água, o que provoca instabilidade dimensional e diminuição das propriedades de resistência (GILLAH *et al.*, 2000).

Por suas características, o MDF é amplamente utilizado na indústria moveleira em geral, para produção de móveis planejados e também para artesanatos diversos. Na construção civil é utilizado para fabricação de batentes, portas usinadas, peças torneadas como balaústres de escadas, pés de mesas e também em embalagens diversas (IBÁ, 2015).

3.3.1 Processo produtivo

De acordo com o *World Panel Industry* (2017), as tecnologias e os processos de fabricação do painel MDF são bastante similares ao redor do mundo. Assim, a Figura 7 ilustra o modelo do processo produtivo de forma industrial do painel MDF.

Figura 7 – Fluxograma de produção de painéis de fibras em escala industrial.



Fonte: Adaptado de Rivela, Moreira e Feijoo, 2007.

A Tabela 3 apresenta a descrição do processo de produção do painel MDF.

Tabela 3 – Processo de produção MDF.

(continua)	
Descrição do processo de produção do painel MDF	
Recebimento de toras e descascador	As toras são recebidas pela indústria e encaminhadas para o processo de descascamento.
Picador	No picador as toras já descascadas são transformadas em cavacos em dimensões de comprimento, largura e espessura já pré-estabelecidas pela indústria.
Alimentação	Os cavacos são armazenados no pátio de cavacos e em seguida são transportados para a indústria através de uma rosca de alimentação para homogeneizar a quantidade de material.
Peneira Grossa	Pequenas partículas (finos) e cavacos maiores que o padrão (over) são removidas dos cavacos durante processo de peneiramento. Os overs retornam para o processador e os finos podem ser vendidos como biomassa. Somente os cavacos de tamanho apropriado seguem para a lavagem.
Lavagem de cavacos	Os cavacos são lavados para remover a sujeira. Os resíduos e os materiais extraídos são tratados como efluentes. Durante a lavagem, a primeira parte é o separador de resíduos, onde uma roda giratória com pás assegura que todos os cavacos fiquem submersos e os resíduos separados e descartados. Os cavacos vão para um tanque onde serão transportados para processo de desfibramento.
Desfibrador	Após a lavagem, os finos que ainda permaneceram no processo são misturados com os cavacos no transporte misturador. Um dispositivo controla o nível de material alimentado no recipiente de vaporização e envia o sinal para o recipiente de medição para solicitar mais ou menos cavacos ou finos.
Dosagem de aditivos	Neste processo, a resina e outros aditivos são misturados com as fibras, o contato entre as fibras ocorre para a distribuição da resina. A resina utilizada geralmente utilizada para o processo é a ureia-formaldeído (UF).
Secador	A secagem de fibras ocorre no secador de tubo de ar quente, onde o ar quente é responsável pela secagem das fibras. O fluxo de ar quente evapora a umidade e conduz a fibra.

(conclusão)

Descrição do processo de produção do painel MDF	
Filtro de fibras	Após a secagem, as fibras com 7-9% de umidade passam através de um filtro de vento (Sifter). O filtro é utilizado para remover grumos de fibras ou outros materiais pesados que possam causar danos ao processo e ao produto final. A fibra seca é selecionada então depositada na esteira de formação.
Esteira de formação	A fibra seca vai para um compartimento de alimentação com uma distribuição uniforme. As fibras são uniformemente distribuídas pelo formador e tornam-se um colchão de fibras.
Pré-prensagem	O colchão de fibras é pré-comprimido para remover o ar entre as fibras e diminuir a altura do colchão.
Prensa contínua	A prensa contínua funciona em função da temperatura e da pressão. A prensa opera a cerca de 170-230 ° C e 5,2 MPa num tempo suficiente para curar a resina e a uma pressão para consolidar o colchão até uma densidade desejada, controlando as propriedades físicas do painel.
Serras	A serra diagonal corta o painel na direção transversal, os painéis produzidos pela prensa contínua são cortados e seguem para a estabilização de umidade.
Estabilização de umidade	Os painéis produzidos permanecem em repouso durante 48h, de modo que suas propriedades físicas e mecânicas sejam estabilizadas
Lixadeiras	Os painéis são lixados em ambas as superfícies para adquirir a espessura adequada. Pó de lixadeira vai é reciclado e volta para o processo de fabricação para ser usado como combustível para a usina térmica. Aproximadamente 7,4% do material é removido pela ação da lixa. Cerca de 74,8% da geração de poeira vem da ação da lixadeira.
Corte	Os painéis são serrados em dimensões de largura e comprimento comerciais. Os resíduos das laterais dos painéis é reduzido em partículas e retorna novamente para o processo.
Embalagem	Os painéis com dimensões comerciais seguem para a embalagem e expedição.

Fonte: Adaptado de Piekarski *et al.*, 2014.

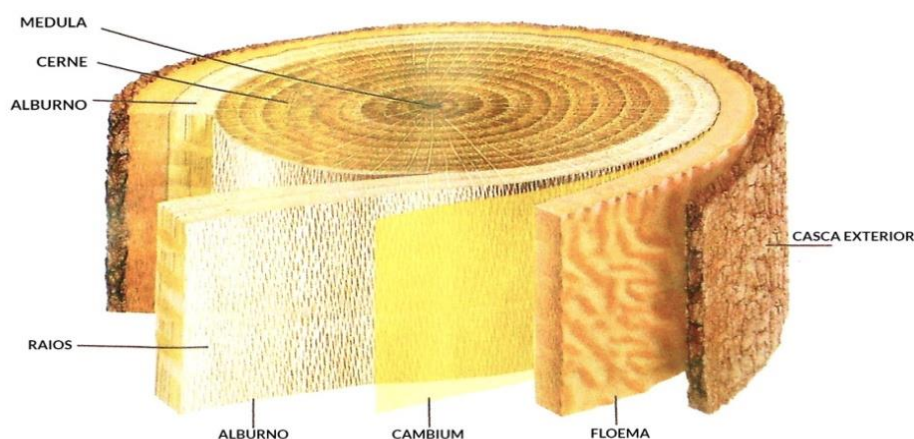
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF

A produção de painéis à base de madeira tem como característica o uso da madeira em diferentes formas, como mencionado anteriormente. Destaca-se que todo painel apresenta em sua composição o uso de alguma substância adesiva que serve de ligante para o substrato. Outro aspecto importante diz respeito as espécies de madeira utilizadas para a produção de painéis. No Brasil, as duas principais espécies são pinus e eucalipto que apresentam propriedades e características compatíveis e adequadas para a composição do produto final. Além da madeira e adesivo, outros aditivos são utilizados visando melhorar as características do painéis e, permitindo diferentes aplicações.

3.4.1 Madeira

Uma árvore possui dois campos principais, o fuste e as raízes. As raízes são as estruturas subterrâneas responsáveis pela captação de água e nutrientes e o fuste é formado pelo tronco, ramos e folhas. O tronco é composto de vários materiais presentes em camadas. Do exterior da árvore para o interior são casca exterior, casca interna, floema, cambio vascular, albúrneo e a medula (RAVEN *et al.* 1999). A Figura 8 representa os aspectos macroscópicos presentes na madeira.

Figura 8 – Aspectos macroscópicos da madeira em uma seção transversal do tronco de uma árvore.

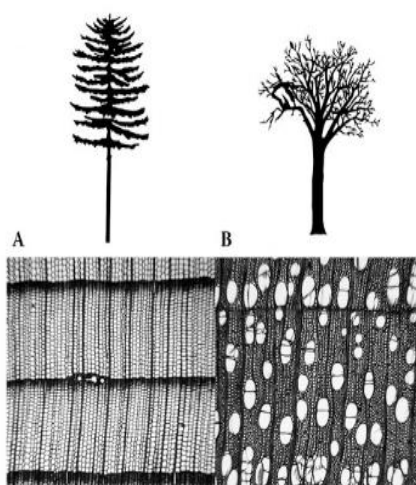


Fonte: Adaptado de Klock, (2005).

Apesar da nomenclatura, nem todas as coníferas (*softwoods*) apresentam madeira macia e leve e nem todas as madeiras de folhosas (*hardwoods*) apresentam madeira dura e pesada.

Para definir os termos botanicamente, *softwoods* são aquelas madeiras que vêm de gimnospermas (principalmente coníferas), e *hardwoods* são madeiras que vêm de angiospermas (principalmente folhosas). A maior distinção entre *softwoods* e *hardwoods* é que as folhosas possuem vasos em sua constituição, que pode ser observada na Figura 9 (ROWELL *et al.*, 2013).

Figura 9 – Diferença da seção transversal da madeira de coníferas (esquerda) e a seca transversal da madeira de folhosas (direita).



Fonte: Adaptado de Rowel, 2013.

3.4.1.1 Madeira de eucalipto

As espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* são botanicamente classificadas como dicotiledôneas, pertencentes à subdivisão das angiospermas, que têm como característica sementes protegidas pelo fruto. A caracterização como madeira de fibra curta deve-se ao pequeno comprimento de suas fibras, cerca de 1 milímetro, sendo que as dimensões das fibras podem variar em função da espécie (ALVES *et al.*, 2011). De maneira bem geral, as madeiras de folhosas são constituídas por 60% de fibras, 20% de células de parênquima e 20% de vasos (GOMIDE; COLODETTE, 2007).

Braz (2014) reportou que o volume dos vasos e as fibras são fatores importantes nas propriedades físicas e mecânicas da madeira em diferentes eucaliptos. Segundo Ferreira *et al.* (2010), os vasos que possuem elevada dimensão e com paredes delgadas são estruturas que proporcionam baixa resistência mecânica à madeira. As fibras têm como função principal a sustentação mecânica das árvores, além de correlacionar com as características físicas e químicas da madeira e contribuem na aplicação e uso final da madeira.

Na Tabela 4 são apresentadas as características do cerne e do alborno na madeira de clones de *Eucalyptus urograndis* com sete anos de idade (GOMIDE *et al.*, 2004), como a matéria prima utilizada para o trabalho.

Tabela 4 – Características do cerne e do alborno de dois clones de *Eucalyptus urograndis*.

Características	Cerne	Alborno
Densidade básica, kg/m ³	459	480
Lignina, %	27,7	23,9
Densidade básica, kg/m ³	485	484
Lignina, %	26,4	24,7

Fonte: Adaptado de GOMIDE *et al.*, 2004.

Um das características fundamentais na estrutura anatômica das madeiras de folhosas, como o eucalipto, é a presença de vasos. Nessas árvores, os vasos são responsáveis pela alta eficiência de circulação de seiva. Isso favorece o desenvolvimento e crescimento rápido da árvore, em comparação com outros tipos de árvores sem vasos (COLODETTE e GOMES *et al.*, 2015).

3.4.2 Adesivo

Uma das etapas fundamentais do processo de produção de painéis de madeira reconstituída é aplicação e colagem do adesivo, para o melhor aproveitamento do material, principalmente no setor moveleiro e no aproveitamento de peças que possuem pequenas dimensões. A tecnologia empregada para o desenvolvimento de novos adesivos é grande e diversificada, devido ao avanço da produção de adesivos, devendo, portanto, serem estudados aqueles adesivos que melhor se adaptem e interajam com os diferentes tipos de madeira de reflorestamento (LIMA *et al.*, 2008).

3.4.2.1 Ureia-formaldeído

As resinas ureia-formaldeído (UF) são as resinas mais utilizadas pelas indústrias, com maior aplicação na fabricação de compósitos à base de madeira, tais como painéis compensados de madeira, painéis de partículas e painéis de fibras. As resinas UF possuem

vantagens sobre outros adesivos, tais como: fácil manuseio, baixo custo e bom desempenho em painéis de madeira (LUBIS *et al.*, 2017).

É adicionada água no adesivo para a mistura com a resina para a produção sua produção, a água é utilizada para diminuir a viscosidade e para facilitar a pulverização do adesivo (PIZZI, 2003).

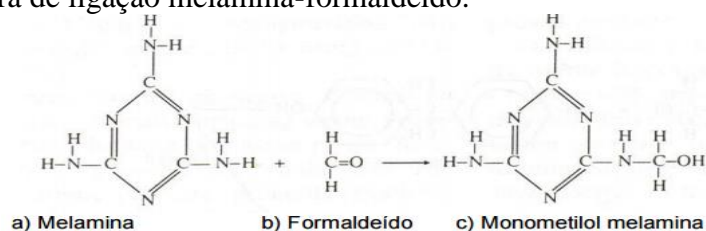
Apesar das resinas UF serem obtidas através de apenas dois reagentes principais, estas apresentam uma ampla variedade de reações e estruturas possíveis. A base química das resinas ureia-formol consiste na adição por etapas entre ureia e formol até a obtenção de uma resina de baixa massa molar. A ureia reage como uma amina e o formol reage como um glicol. Durante a formação dos produtos de reação iniciais libera-se água. O caminho da reação depende do pH, da concentração, da relação molar, da temperatura, do tempo de reação e da sequência das reações (LESSMANN, 2008).

3.4.2.2 Melamina-formaldeído

As resinas de melamina formaldeído (MF) e melamina ureia-formaldeído (MUF) estão entre os adesivos mais utilizados para painéis de madeira que são utilizados em ambientes externos e intermediários, ambientes que possuem maior contato com a umidade. Sua resistência elevada ao contato com a água é sua característica principal que a diferencia de outras resinas. Os adesivos MF são mais caros e por esta razão, são frequentemente utilizadas resinas MUF que são resinas com adição de ureia (UF) (PIZZI, 1994).

A química da resina melamina-formaldeído envolve as mesmas reações do formaldeído com os grupos amônia para a formação dos grupos metilol, os quais são condensados por pontes metilênicas como ocorrer na ureia, conforme Figura 10. No entanto, nesse caso, os grupos amônia são parte de uma estrutura cíclica de carbonos alternados com nitrogênio, chamada de melamina. Essa estrutura química, em parte melhora a estabilidade das ligações (MARRA, 1992).

Figura 10 – Estrutura de ligação melamina-formaldeído.



Fonte: Marra, 1992.

3.4.2.3 Fenol-formaldeído

As resinas fenólicas são obtidas através da policondensação de produtos da reação das substâncias fenol com o formaldeído. Resinas fenólicas foram os primeiros verdadeiros polímeros sintéticos a serem desenvolvidos comercialmente. Apesar disso, mesmo atualmente a sua estrutura está longe de ser completamente clara, porque os polímeros derivados da reação de fenol com formaldeído diferem em um aspecto importante de outros produtos de policondensação. O fenol polifuncional pode reagir com o formaldeído em ambas as posições orto e para do grupo hidroxílico. Isso significa que na condensação de produtos existem numerosos isômeros de posição para o comprimento da cadeia. O resultado foi que, embora as resinas fenólicas tenham sido desenvolvidas comercialmente já em 1908, foram as primeiras resinas sintéticas a serem desenvolvidas e têm usos industriais vastos e diferenciados, vários aspectos de sua química ainda são apenas parcialmente compreendidos (PIZZI *et al.* 2003)

3.4.2.4 Resorcinol formaldeído

O adesivos de resorcinol-formaldeído (RF) é utilizado primordialmente na fabricação de elementos estruturais, painéis para uso exterior, juntas de *finger joints* e outras estruturas exteriores de madeira. O RF produz ligações não só de alta resistência, mas também de excelente resistência à umidade e às intempéries quando expostas a condições climáticas severas (BELGACEM; PIZZI, 2016).

Resorcinol-formaldeído (RF), e a resina fenol-resorcinol-formaldeído (FRF) são empregados principalmente na fabricação de estruturas, ligações *finger joints* de madeira laminada colada e outras estruturas de madeira. Eles produzem ligações não só de alta resistência, mas também de excelente resistência à água e às intempéries quando expostas a diferentes condições climáticas. O resorcinol é um produto químico de custo elevado, desenvolvido em poucas localidades ao redor do mundo, seu alto custo é o fator determinante no emprego de RF e FRF. É por esta razão que o histórico de utilização das resinas RF e FRF está intimamente interligado, por necessidade, com a busca de uma diminuição no seu teor de resorcinol, sem perda de desempenho do adesivo (PIZZI *et al.* 2003).

3.4.2.5 Acetato de Polivinila (PVA)

O acetato de polivinila (PVA) é solúvel em água, e uma das resinas sintéticas produzidas em maior volume no mundo. Produzida pela primeira vez em 1924, por Herrman e Haehnel, pela hidrólise do poli (acetato de vinila), que é a forma de obtenção comercial utilizada atualmente (ARANHA; LUCAS, 2001).

O acetato de polivinila (PVA) é um polímeros termoplástico que ganhou ampla aceitação ao longo dos anos como matéria-prima para a indústria de adesivos de para painéis de madeira. Modificado ou não modificado e como homopolímeros ou copolímeros, apresenta uma versatilidade que o torna muito apropriados para a ligação de uma grande variedade de substratos. A aplicação na madeira tornou o adesivo PVA um dos adesivos mais utilizados na segunda metade do século XX (BELGACEM; PIZZI, 2016).

A emulsão de acetato de polivinila é utilizada principalmente em solução. Empregada na colagem de painéis de madeira, construção e decoração por causa de sua qualidade de colagem, baixo custo e características não tóxicas. No entanto, a baixa resistência à água, o calor e as baixas temperaturas, a instabilidade mecânica, a diminuição acentuada da resistência da união em condições quentes e úmidas limitam a sua aplicação (ZHAO *et al.*, 2011).

3.4.3 Aditivos

3.4.3.1 Parafina

A parafina é um aditivo essencial na fabricação de painéis de madeira compósitos, tais como painéis de fibras de média densidade (MDF). A integridade do painel é obtida pela ação da cura da resina ligando a matriz de fibras, e a parafina atuando como um agente hidrofóbico repelente de água (GRIGSBY; THUMM, 2012a).

No trabalho de Weber e Iwakiri (2015), com relação aos teores de umidade apresentados pelos painéis aglomerados, pode-se constatar que as partículas que não receberam a adição de parafina no processo produtivo, apresentaram maior higroscopicidade em relação aos demais tratamentos que receberam a aplicação de parafina durante o processo produtivo, a aplicação foi de 1% de parafina na manufatura dos painéis.

A parafina pode ser adicionada antes ou durante o processo de produção de fibras ou através da linha de aplicação. Se a parafina é utilizada como uma emulsão, pode também ser

adicionada à resina e assim injetada na linha de passagem de ar que conduzem às fibras. (ROFFAEL *et al.*, 2005).

Diferentes formas de associação da parafina com a resina podem influenciar no desempenho do painel resultando em vantagens para os fabricantes através de melhorias nas propriedades físicas dos painéis e redução de custos na produção. Porém, o aumento da quantidade de parafina aplicada deve ser realizado da forma com que ocorra melhoria na resistência do painel em contato com umidade, sem alterar as outras propriedades mecânicas do painel. (GRIGSBY; THUMM, 2012b).

3.4.3.2 Catalisador

Potenciais reduções nos custos de energia na indústria podem ser obtidas devido às temperaturas mais baixas requeridas para a cura do adesivo e o aumento da produtividade seria possível com redução nos tempos de prensagem das chapas. A menor temperatura da prensa também deve resultar em emissões mais baixas de compostos orgânicos voláteis no ambiente durante a fabricação de painéis (CONNER *et al.*, 2002).

Catalisadores ou aceleradores são produtos químicos adicionados em pequenas quantidades ao adesivo para aumentar a taxa de reação química no processo de cura ou endurecimento. Catalisadores não são consumidos na reação, enquanto os aceleradores podem ser consumidos na reação. Um exemplo de catalisador é o catalisador ácido gerado a partir de sais de amônio para curar resinas UF (Pizzi, 2003), enquanto um exemplo de um acelerador é um orto éster utilizado para acelerar a cura de resinas FF (CONNER *et al.*, 2002).

Uma das características principais das resinas a base de formaldeído aplicadas para a produção de painéis de partículas é a sua polimerização acelerada sob a influência de temperaturas elevadas e de um catalisador químico. Sais de ácidos fortes, usualmente cloreto de amônio NH_4Cl , sulfato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e suas misturas são utilizados como catalisadores químicos na produção industrial de painéis (ANTONOVIC *et al.*, 2010).

3.4.3.3 Inseticidas, Retardante de fogo, outros

Os retardadores de fogo, *flame retardants* (FRs), podem ser divididos em duas classes dependendo da sua utilização, nomeadamente, aditivos e reativos. Os compostos aditivos dominam o mercado de FRs devido ao seu menor custo de processamento. Isto é atribuído ao fato de estarem fisicamente misturados com, ou dissolvidos no material durante o

processamento e não reagir quimicamente. Isto significa que os FRs podem migrar mais facilmente para fora do produto sob certas condições. Os compostos reativos são polimerizados com uma resina durante o processamento para integração do retardante dentro da estrutura da rede molecular, e, portanto, são muito menos susceptíveis de lixiviar para o ambiente até que o produto seja decomposto ou queimado (EL-WAHAB *et al.*, 2015).

A Figura 11 apresenta um produto com a aplicação de aditivos para melhorar a resistência dos painéis comerciais é o MDF Fire da empresa do segmento madeireiro Duratex, o produto é o primeiro MDF do Brasil que retarda e evita a propagação de chamas em caso de incêndio. Ele pode ser aplicado em áreas internas secas, paredes, tetos, pisos e mobiliário. Segundo a empresa é o produto ideal para áreas de grande circulação que exigem segurança.

Figura 11 – Painel MDF Fire.



Fonte: Adaptado empresa Duratex – Madeira, 2017.

O exemplo da aplicação de aditivos de características inseticidas são os painéis desenvolvidos pela empresa Berneck, que possuem tratamento adicional para maior proteção contra umidade e ataque de cupins, painéis da linha Plus. Segundo a empresa são painéis ideais para ambientes residenciais e comerciais, como cozinhas, banheiros e lavanderias, especialmente indicados para uso em regiões de alta umidade relativa do ar como praias e regiões serranas. A Figura 12 mostra os painéis da linha Plus.

Figura 12 – Painéis da linha Plus.



Fonte: Empresa Berneck, 2017.

Uma das possíveis alternativas para melhorar a resistência dos painéis é o tratamento térmico do material que o constitui. Ferreira *et al.* (2017), avaliaram em seu trabalho o tratamento térmico (termorreificação) das lâminas de madeira que constituem o painel compensado em comparação com o tratamento de lâminas com o preservante químico CCA. Seus resultados mostraram que o tratamento CCA reduziu a resistência mecânica dos painéis, enquanto que o tratamento térmico não diminuiu, o tratamento térmico também reduziu o inchamento do compensado, indicando uma melhor estabilidade dimensional.

3.5 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS

A crescente demanda por painéis leva a inúmeras pesquisas com foco na melhoria do processo e das propriedades físico-mecânica dos mesmos. A transferência de calor através do painel é determinada durante a prensagem a quente e um maior tempo de prensagem leva a uma maior qualidade dos painéis, mas resulta também em maiores custos do processo de produção. As indústrias estão buscando cada vez mais estratégias para reduzir o tempo de prensagem a quente, visando, diminuir assim os custos e aumentando a capacidade de produção.

O avanço tecnológico trouxe diversas melhoras para o segmento industrial. Destaca-se que o surgimento da nanotecnologia contribuiu para este avanço. Estudos já realizados indicaram que a partir da adição de nanopartículas de óxido de alumínio na produção de painéis, foi possível obter perfis de temperatura mais elevados no decorrer do processo de prensagem; sendo assim, a adição das nanopartículas resultaram em maiores transferências de calor no interior dos painéis (SABDIN, 2010).

3.5.1 Nanopartículas

O estudo de materiais cujos tamanhos das partículas que os constituem encontram-se na faixa dos nanômetros (chamados de nanomateriais) ganhou importância significativa no final do século XX, levando ao aparecimento e consolidação de toda uma área do conhecimento, hoje reconhecida como “nanociência e nanotecnologia” (ZARBIN, 2007).

A metodologia de processamento nano “nanociência” se refere ao estudo do fenômeno e da manipulação de sistemas físicos que produzam informações significativas (isto é, diferenças perceptíveis), em uma escala conhecida como nanométrica ($10^{-9}\text{m} = 1 \text{ nm}$) com comprimentos típicos que não excedam 100 nm em pelo menos uma direção. Portanto, a

nanotecnologia foca no projeto, caracterização, produção e aplicação de sistemas e componentes em nanoescala envolvendo sua manipulação (FERREIRA; RANGEL, 2009).

Por outro lado, as nanopartículas podem ser materiais naturais ou artificiais, e são amplamente encontradas no meio ambiente, assim como também ocorre sua produção em laboratório. As propriedades das nanopartículas muitas vezes unem os regimes microscópicos e macroscópicos, o que significa que as teorias convencionais não permitem necessariamente prever seu comportamento, e esta é a incerteza que está no centro das preocupações em torno da saúde e impacto ambiental, mas também da expectativa em torno de sua aplicação em novas áreas da ciência e da tecnologia (THOMPSON, 2010).

As pesquisas sobre a metodologia de síntese de nanomateriais é orientada, principalmente, no controle de sua forma, tamanho e composição. Cada um desses fatores é um fator chave na determinação das propriedades dos materiais que levam a diferentes aplicações tecnológicas (GHORBANI *et al.*, 2017).

3.5.1.1 Métodos de obtenção de nanopartículas

Existem diversos métodos de preparação de nanopartículas, os mais conhecidos são: método Pechini, método sol-gel convencional e método sol-gel proteico.

Segundo Morais e Lima (2006), existem dois métodos mais modernos para produção de nanopartículas: método da deposição por vapor e do arco de carbono. Ainda segundo o autor, existem também procedimentos químicos: métodos de coprecipitação por hidrólise alcalina em meio aquoso, em microemulsão e em micelas reversas, destacam-se os métodos de redução (método de Rieke) e redução por borohidreto e, por último, os métodos de decomposição de compostos de coordenação (decomposição térmica e sonoquímica).

A seguir serão descritos os métodos de produção de nanopartículas pelo método sol-gel convencional e o método sol-gel proteico, o qual faz uso da gelatina comestível, técnica utilizada neste trabalho para o desenvolvimento das nanopartículas de óxido de zinco (ZnO).

Método sol-gel convencional

O processo sol-gel para a preparação de pós, monólitos e filmes finos é baseado em reações de hidrólise e polimerização de precursores alcóxidos. Uma das vantagens do processo é a sua natureza sintética, capaz de gerar soluções de alta pureza. Além disso, o processo sol-gel envolve o uso de reagentes líquidos de baixa viscosidade e, portanto, uma

boa homogeneização da solução pode ser alcançada em curto tempo. Desta forma, a mistura bem-sucedida dos reagentes na solução implica em uma considerável homogeneidade em nível molecular quando sóis e géis são formados. Como uma homogeneidade satisfatória das soluções é alcançada no estágio inicial de mistura, então baixas temperaturas para a produção de sóis e géis são requeridas (ZHANG *et al.*, 2005).

Um dos processos de fabricação de nanopartículas é o método de produção sol-gel. Considerado um processo de produção versátil, flexível e de baixo custo, utiliza como precursores materiais orgânicos (CHIAPPINI *et al.*, 2009).

Diferentes métodos podem ser aplicados à síntese de nanopartículas, incluindo: o método sol-gel, hidrotermal, e a técnica de evaporação a laser. Entre estes, o sol-gel é um processo considerado simples e mais econômico. As nanopartículas obtidas através deste método apresentam alta pureza, essas características tornaram o processo de síntese sol-gel um método popular para a produção de nanopartículas (AHANGAR *et al.* 2015).

Uma das principais vantagens do método sol-gel é que os nanocompósitos obtidos são de forma geral puros e homogêneos. As temperaturas empregadas para a reação são moderadas evitando-se a degradação do polímero. O sol-gel é um método versátil para a preparação de materiais híbridos uma vez que pode ser aplicado a uma grande variedade de precursores, ou até em misturas que originam sólidos inorgânicos compósitos (ESTEVES *et al.* 2004).

O método sol-gel convencional é baseado em reações de hidrólise e polimerização de precursores alcóxidos que ocorre a temperaturas relativamente baixas, usado para preparações de pós, monólitos e filmes, obtendo um nível de pureza e homogeneidade equivalentes aos processos feitos a altas temperaturas (TANGERINO, 2010).

Método sol-gel proteico

O processo sol-gel proteico é uma variação do processo sol-gel, que utiliza um precursor proteico, diferente do método convencional que faz o uso do precursor alcóxido (LIMA, 2011).

Medeiros (2007), utilizou o método sol-gel proteico para a produção de nanopartículas, fazendo o uso da gelatina comestível como precursor orgânico para o processo de polimerização, por se tratar de um método simples, econômico e eficaz.

Em geral, a gelatina é fabricada a partir de matérias-primas que contêm alto teor de colágeno, que é a maior e principal proteína estrutural no tecido conjuntivo e tem importância

vital para a maioria dos mamíferos, proveniente da pele suína e bovina e ossos bovinos (MEDEIROS, 2007).

Maia (2005), sintetizou nanopartículas de NiO utilizando água destilada, gelatina comestível e cloreto de níquel hexahidratado ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e, em algumas amostras foi adicionado NaOH. As amostras foram calcinadas nas temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C. Os tamanhos de nanopartículas obtidos variaram de 13 nm a 126 nm.

3.5.1.2 Uso de nanopartículas em painéis à base de madeira

O estudo realizado por Taghiyari (2013), teve como objetivo determinar os efeitos da adição de nanopartículas de prata e nanopartículas de zycosil na resistência mecânica de painéis MDF em três diferentes tipos de tratamentos. O estudo concluiu que as nanopartículas não influenciaram positivamente na resistência dos painéis, sugerindo a alteração das nanopartículas para os mesmos testes ou a adequação dos mesmos.

O trabalho de Taghiyari e Moradiyan (2014) avaliou os efeitos da adição de 200 ppm de prata e nanopartículas de cobre, com tamanho variando de 20 a 80 nm, sobre a rigidez dos painéis de partículas produzidos em escala industrial. Adicionaram nanopartículas de metal ao colchão em dois níveis de 100 e 150 mL/kg de partículas de madeira com base no peso seco e compararam os resultados com os dos painéis testemunha. A adição de nanopartículas apresentou melhoria significativa nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

O trabalho realizado por Gao *et al.* (2011) apresentou os efeitos de nanopartículas de óxido de cobre sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis de lascas (OSB) utilizando resina fenol formaldeído (FF). Os resultados mostraram que nanopartículas de óxido de cobre não tiveram efeitos benéficos nas propriedades mecânicas e na estabilidade dimensional dos painéis OSB. Entretanto, a adição de nanopartículas resultou na aceleração das reações de moléculas na resina FF e no aumento da transferência de calor do colchão de lascas de madeira.

No trabalho de Weichelt *et al.* (2010) foram desenvolvidos nanocompósitos para uso em revestimentos resistentes a UV utilizando nanopartículas de óxido de zinco em painéis de madeira para uso em condições exteriores. As amostras revestidas foram estudadas quanto às suas propriedades ópticas e mecânicas, bem como a alterações no brilho, transparência e permeabilidade à água. A adequação para utilização em condições exteriores foi assegurada aumentando a elasticidade do revestimento e diminuindo a permeabilidade à água dos painéis.

3.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE PRENSAGEM

Algumas variáveis podem afetar as características finais do MDF em função de fatores relacionados à matéria-prima, ao processamento e aos aditivos incorporados aos painéis. Além da influência isolada de cada fator, existe ainda a possibilidade de interação entre os diferentes fatores formando-se assim uma complexa "rede" de interações (REMADE, 2003).

Na produção de painéis, o fenômeno de transferência de calor durante a prensagem a quente é complexo. Durante o processo, estão envolvidos vários fatores, incluindo a matéria-prima em si e as condições de funcionamento do processo. A prensagem a quente fornece energia térmica e força mecânica de compressão para consolidar o colchão (GOMES, 2017).

Já Matos e Keinert (2006), ao estudarem o ciclo de prensagem para painéis *waferboards*, avaliam tempos de prensagem de 8 e 10 minutos, onde observaram que com o maior tempo uma maior eficiência na cura da resina, e com isso menores valores de inchamento. Já quanto a absorção, só foi possível verificar diferença após 24 horas, onde o maior tempo também mostrou-se mais instável.

É reconhecido que a transferência de calor possui um papel fundamental para que se atinja a temperatura de cura da resina em painéis à base de madeira, atuando da superfície para o centro do painel através da migração do vapor. Dessa forma, estudar esse fenômeno pode contribuir para o melhoramento de determinadas propriedades do painel.

Alguns estudos apontam o uso de nanopartículas como forma de intensificar a transferência e calor. Nguyen *et al.* (2007), analisaram experimentalmente o comportamento, bem como o aumento da transferência de calor de um nanofluido com nanopartículas de alumina (Al₂O₃) dispersas em água, onde os resultados mostraram que a inclusão das nanopartículas em água destilada produziu uma melhora no coeficiente de transferência de calor convectivo.

Anoop *et al.* (2009), investigaram experimentalmente as características da transferência de calor por convecção forçada com fluxo de calor constante, visando avaliar o efeito do tamanho das nanopartículas na transferência de calor por convecção na região de escoamento laminar, observando que os nanofluidos possuem alta capacidade de transferência de calor se comparado com o fluido base. Além disso, o nanofluido com as nanopartículas de menor tamanho apresentou coeficiente de transferência de calor superior do que o nanofluido com nanopartículas maiores.

A partir de estudos como esses, surge a alternativa de avaliar a influência da adição de nanopartículas juntamente à mistura do adesivo com o intuito de melhorar a transferência de calor, assim como as propriedades físico-mecânicas de um painel.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS A PARTIR DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica serviu de embasamento teórico para a realização e definição de diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho. O estudo dos painéis à base de madeira vem conquistando espaço no segmento industrial brasileiro tendo em vista a implantação de unidades industriais de alta tecnologia o que refletiu de forma efetiva e positiva na qualidade dos painéis comercializados no Brasil.

Esta crescente produção e demanda pelos painéis à base de madeira deve-se a novos segmentos da indústria moveleira e construção civil que absorvem cada vez mais esses materiais para a produção dos móveis, pisos, revestimentos, portas, divisórias, entre outras aplicações.

No entanto, os painéis produzidos atualmente ainda necessitam de melhorias quanto ao desempenho da matéria-prima utilizada ou mesmo variáveis do processo produtivo. Com base nessas considerações é que foi definido o tema do presente estudo que foi o uso das nanopartículas de óxido de zinco na fabricação de painéis MDF de modo a auxiliar no processo produtivo acelerando a transferência de calor por se tratar de nanopartícula metálica e, também por indicar em estudos apresentados na revisão que as propriedades físico-mecânicas dos painéis também podem ser melhoradas com o uso destas nanopartículas.

Destaca-se que o uso de nanopartículas na produção de painéis à base de madeira ainda é apenas objeto de estudos científicos, mas a indústria deste segmento tem sinalizado interesse nos resultados apresentados nestes estudos recentes tendo em vista, especialmente, que o custo energético do processo produtivo tem se tornado cada vez mais oneroso para a indústria. Ressalta-se ainda que embora diversas nanopartículas tenham sido utilizadas no âmbito laboratorial, o uso de nanopartículas de óxido de zinco em painéis MDF não foi encontrado, evidenciando o ineditismo do tema proposto para este trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos foram divididos na produção de nanopartículas, produção dos painéis MDF, caracterização físico-mecânica dos painéis, método para a análise estatística e para a determinação da temperatura ao longo do ciclo de prensagem.

4.1 MATERIAIS PARA A PRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

Os materiais e equipamentos empregados na etapa experimental para a produção de nanopartículas foram:

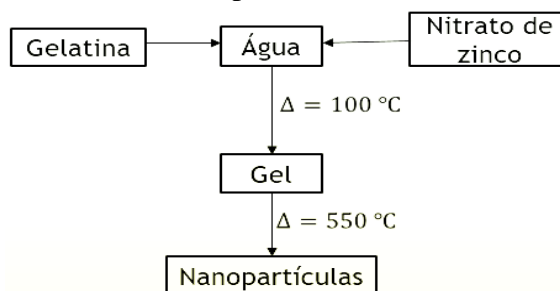
- Nitrato de zinco da marca Synth;
- Gelatina sem sabor da marca Synth;
- Água;
- Forno mufla da marca Quimis;
- Estufa de secagem com circulação/renovação de ar Marconi;
- Placa com aquecimento e agitação Fisatom.

A placa aquecedora foi utilizada para a diminuição da quantidade de água da solução. O forno mufla e estufa de secagem foram utilizados após o processo de mistura da gelatina com o nitrato de zinco.

4.2 MÉTODO PARA A PRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

O processo de produção de nanopartículas de óxido de zinco neste trabalho baseou-se na pesquisa de Maia (2005), que utilizou o método sol-gel proteico a partir de precursores de baixo custo como a gelatina comestível e baixas temperaturas de calcinação em seu processo de produção. O esquema da Figura 13 exhibe a estrutura do processo de síntese das nanopartículas de óxido de zinco.

Figura 13 - Diagrama de bloco ilustrativo do procedimento de síntese.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A primeira etapa do desenvolvimento consistiu em dissolver gelatina comestível em água morna (50 °C) sob constante agitação na placa de aquecimento. Após a solução apresentar aspecto homogêneo adicionou-se nitrato de zinco, na proporção 1:1 (gelatina:nitrato). A Figura 14 apresenta o aquecimento da mistura de gelatina e nitrato de zinco na água sob aquecimento e agitação. O aspecto amarelo da solução ocorreu devido a coloração da gelatina sem sabor.

Figura 14 – Solução do início do desenvolvimento de nanopartículas.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Em seguida, elevou-se a temperatura do equipamento para 100 °C que foi mantida por aproximadamente três horas a fim de eliminar o excesso de água e formar o gel. O gel foi acondicionado em uma estufa a 100 °C onde foi mantido por alguns dias a fim de secar completamente a mistura. A Figura 15 mostra o processo de secagem em diferentes estágios no decorrer dos dias com a amostra na estufa, até a diminuição do excesso de água para a formação de uma estrutura que apresenta a forma de uma espuma quebradiça amarelada.

Figura 15 – Sequência de secagem do material.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O material seco foi macerado e queimado em um forno mufla com aproximadamente 180°C por 10 minutos, a fim de eliminar parte do material orgânico, tendo como resultado um material que apresentou consistência de uma espuma preta (*puff*) (Figura 16a), devido à queima parcial do material orgânico. O *puff* macerado foi acondicionado em cadinhos para o processo de calcinação, conforme a Figura 16b.

Figura 16 – Sequência de preparação do material: (a) Material após o processo de queima inicial. (b) Acondicionamento em cadinhos.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os cadinhos foram novamente levados para o forno mufla para o processo de calcinação com temperatura de 550°C por 3 horas, tendo como resultado as nanopartículas de óxido de zinco, um pó branco, leve e bem fino. O processo é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Nanopartículas de óxido de zinco.



Fonte: Autoria própria, 2018.

4.3 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

O método utilizado para a caracterização das nanopartículas de óxido de zinco neste trabalho foi o método de difração de raio X, utilizando para a caracterização um difratômetro.

A medida de difração foi realizada nas amostras na forma de pó, forma final das nanopartículas, utilizando um difratômetro de raios-X para caracterização estrutural de amostras, modelo do equipamento: ULTIMA IV, Rigaku, com monocromador de grafite e tubo de cobre. O equipamento utilizado pertence do Laboratório de Difração de Raio X, Instituto de Física - USP/São Carlos.

O difratograma da amostra e a comparação com as bases de dados está apresentado nos resultados e discussões deste trabalho.

4.4 MATERIAIS PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF

Os insumos empregados na parte experimental do trabalho foram:

- Fibras de madeira de *Eucalyptus grandis híbrido H103* provenientes da Eucatex-Salto;
- Resina melamina-formaldeído da Momentive- Indústria Química, teor de sólidos de 65,9%;
- Resina ureia-formaldeído da Momentive- Indústria Química, teor de sólidos de 66%;
- Catalisador, teor de sólidos de 13,10%;
- Emulsão de parafina, teor de sólidos de 57,2%;
- Água;
- Nanopartículas de ZnO.

Para cálculos da quantidade de insumos empregados em cada chapa de fibras tomou-se como base o valor de teor de sólidos apresentada por cada fabricante e a massa de fibras de eucalipto.

Os equipamentos utilizados na pesquisa para a produção das chapas de MDF em laboratório encontram-se disponíveis no laboratório de Painéis e Secagem da Madeira do Câmpus da UNESP - Itapeva. Os equipamentos empregados foram:

- Estufa para a secagem das fibras Marconi modelo MA 033;
- Pulverizador para aplicação de adesivo;
- Encoladeira de partículas de madeira modelo MA686 Marconi;
- Caixa formadora para o colchão de fibras (produzida na Serraria da UNESP);

- Pré-prensa Ribeiro, modelo P15T;
- Prensa hidráulica Hidraumac, modelo PHH 80T.

4.5 MÉTODOS PRODUÇÃO DE PAINÉIS MDF

Neste item está apresentada inicialmente a formulação dos painéis e, em seguida, o processo de produção dos mesmos em escala laboratorial.

4.5.1 Formulação dos painéis

Foram realizados seis tratamentos para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis MDF. No primeiro tratamento utilizou-se a resina ureia-formaldeído sem adição de nanopartículas, no segundo tratamento resina ureia-formaldeído com adição de 0,5% de nanopartículas considerando a massa de fibras, para o terceiro tratamento foi empregada também resina ureia-formaldeído com a adição de 1% de nanopartículas, no tratamento quatro os painéis foram produzidos com resina melamina-formaldeído sem adição de nanopartículas, para o quinto tratamento, tratamento 5, também a resina melamina-formaldeído com a adição de 0,5% de nanopartículas e no tratamento 6 os painéis foram produzidos com melamina-formaldeído e 1% de nanopartículas.

Para os cálculos da quantidade de material empregada nos painéis teve-se como base o trabalho de Eleotério (2000), que utilizou 1% de emulsão de parafina em relação ao peso de fibras. A parafina foi utilizada para diminuir a porcentagem de inchamento dos painéis, o catalisador utilizado foi o sulfato de amônia para acelerar a cura da resina, na proporção de 1% e água.

Para todos os tratamentos foi estabelecida a quantidade de fibras de 1800 g com base no trabalho de Campos (2015) e nos estudos preliminares deste trabalho. A dosagem de resina utilizada foi de 10%.

A Tabela 5 apresenta a quantidade de insumos empregada para cada tratamento.

Tabela 5 - Insumos empregados na produção dos painéis.

Tratamentos	Resina (g)	Catalisador (g)	Parafina (g)	Água (g)	Resina	Nanopartículas (g)
1	264,55	8,73	30,52	12,87	UF	-
2	264,55	8,73	30,52	12,87	UF	9
3	264,55	8,73	30,52	12,87	UF	18
4	264,95	8,73	30,52	12,27	MF	-
5	264,95	8,73	30,52	12,27	MF	9
6	264,55	8,73	30,52	12,87	MF	18

Fonte: Autoria própria, 2018.

4.5.2 Estudos preliminares para a produção de painéis

Para estabelecer o melhor método para o desenvolvimento do trabalho foram realizados estudos preliminares que levaram em consideração quantidade de fibras, emprego do limitador de espessura para a prensagem, variação de densidade dos painéis, formas de aplicação de adesivo nas fibras e quantidade de nanopartículas utilizada.

Foram avaliadas quatro variações de massa de fibras, sendo elas: 1200 g, 1500 g, 1800 g e 2400 g para se estabelecer qual a massa de fibras ideal para a produção. A prensagem das diferentes massas de fibras foi realizada sem o emprego do limitador de espessura, para avaliar o comportamento dos painéis em relação a densidade.

Para todas as massas de fibras na prensagem sem limitador as densidades ficaram superiores a 800 kg/m^3 , não atendendo ao documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 que estabelece o valor de 800 kg/m^3 para a densidade máxima dos painéis MDF. Para as massas de fibras de 1200 g e 1500 g, os painéis ficaram com 6 mm de espessura e para 1800 g e 2400 g os painéis apresentam espessuras maiores que 9 mm e menores que 10 mm, não se enquadrando como painéis MDF e nem como painéis HDF, estabelecendo desta forma que o emprego do limitador com 13 mm de espessura era necessário para garantir as características do painel de média densidade, ou seja, densidade entre 651 até 800 kg/m^3 .

Para as massas de 1200 g e 1500 g o colchão de fibras apresentou uma espessura próxima ao limitador o que resultou em menores densidades e menores resistências mecânicas e foram descartadas essas duas variações. Através de cálculos relacionando às dimensões finais do painel, como largura e comprimento (43 x 43 cm), além da espessura de 13 mm, a quantidade de 2400 g de fibras mais a quantidade de insumos empregados para produzir o painel, ficou com densidade superior ao estabelecido pela norma. Sendo assim a quantidade de fibras de 1800 g apresentou-se ideal para o desenvolvimento em escala laboratorial, considerando uma densidade nominal de 790 kg/m^3 .

Com base em estudos relacionados à viscosidade do adesivo a partir da adição de nanopartículas verificou-se a viabilidade de uso de até 1% apenas para não comprometer a aplicação e pulverização das mesmas juntamente com o adesivo.

Ao longo dos estudos preliminares ajustes na aplicação do adesivo juntamente com as nanopartículas foram realizados. A aplicação da parafina junto com os outros componentes do adesivo começou a apresentar a formação de grumos, conforme Figura 18, dificultando assim a aplicação do adesivo que foi realizada através de um pulverizador. Devido este fato a aplicação de parafina passou a ocorrer de forma separada, ocorrendo primeiro a aplicação da

mistura de resina, água, catalisador, nanopartículas e, em seguida, a aplicação de parafina com pulverizadores diferentes.

Figura 18 - Formação de grumos da mistura da parafina com o adesivo.



Fonte: A autoria própria, 2018.

Após a realização dos estudos preliminares foram desenvolvidos os métodos de produção dos painéis apresentados nos tópicos a seguir.

4.5.3 Processo de produção definitivo dos painéis MDF

A sequência do processo de produção das chapas de fibra de média densidade está apresentada e ilustrada a seguir.

Inicialmente as fibras foram dispostas em lonas pretas para secagem inicial ao ar. Após três dias da secagem inicial as fibras foram armazenadas em 12 sacos plásticos de 200 L para a sua secagem posterior.

A primeira etapa da produção dos painéis foi a secagem das fibras. Neste processo as fibras foram condicionadas em bandejas pré-identificadas e dispostas em estufa de secagem a $103\text{ °C} \pm 5$. As bandejas e sua disposição dentro da estufa são representadas na Figura 19. As fibras permaneceram em estufa até atingirem umidade aproximada de 3%.

Figura 19 - Secagem das fibras em estufa.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para a produção dos painéis MDF em laboratório, foram considerados lotes de fibras de 1800 g para cada painel para cada um dos seis tratamentos. A mesma quantidade para os próximos dois tratamentos foi mantida, considerando sempre densidade nominal de 790 kg/m³. Na sequência foram pesados e misturados em uma batedeira a resina e os demais aditivos, ou seja, água, catalisador e nanopartículas, conforme a Figura 20. A parafina foi adicionada após a aplicação do adesivo, como mencionado anteriormente.

Figura 20 - Mistura de materiais no adesivo.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para a aplicação de adesivo nas fibras os lotes foram dispostos dentro da encoladeira (Figura 21) que é utilizada também para aplicar adesivo em painéis de partículas e lascas. A mistura do adesivo foi adicionada no recipiente que acompanha a pistola de aplicação para iniciar o processo.

Figura 21 – Encoladeira para a aplicação de adesivo em laboratório.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após o término da aplicação na encoladeira, o material foi distribuído manualmente na caixa formadora para a pré-prensagem, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Caixa formadora com lote de fibras já na posição para a pré-prensagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após a deposição das fibras, o colchão foi compactado, aplicando-se pressão de 0,1 MPa em uma pré-prensa (Figura 23) por um período de 5 minutos, correspondendo à etapa de pré-prensagem, onde não ocorre transferência de calor. O objetivo da pré-prensagem foi

reduzir o volume do colchão que será colocado na prensa, reduzindo a espessura do mesmo e facilitando o início da transferência de calor.

Figura 23– Etapa de pré-prensagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após a pré-prensagem, a caixa formadora foi levada até a chapa metálica da prensa onde ocorreu o processo de retirada da caixa formadora de madeira. A Figura 24 apresenta o colchão de fibras pronto para iniciar o ciclo de prensagem, na prensa hidráulica.

Figura 24 – Colchão de fibras após a pré-prensagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O ciclo de prensagem ocorreu por um período de 10 minutos em três ciclos, de três minutos cada ciclo de prensagem e dois intervalos de alívio de pressão de aproximadamente 30 segundos, a temperatura dos pratos superior e inferior da prensa foram ajustadas em 180 °C, a variação da temperatura da prensa hidráulica (Figura 25) possui variação de 5 °C no

visor de temperatura, então a temperatura das chapas metálicas variaram de $180\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. A pressão aplicada ao longo do ciclo foi de 4 MPa.

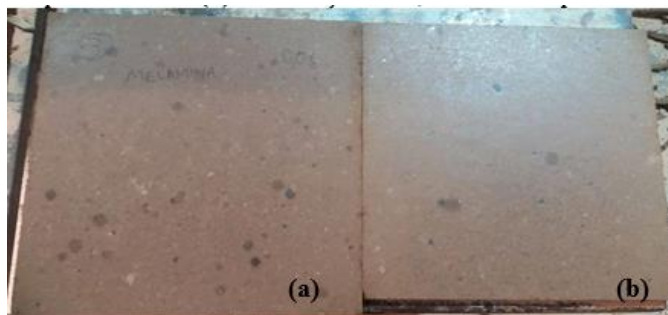
Figura 25 – Prensa hidráulica para o processo de prensagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

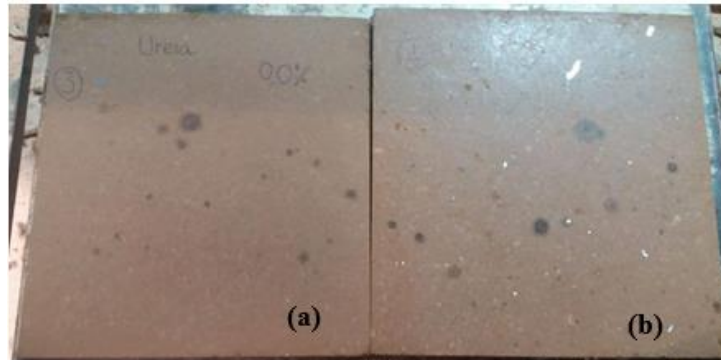
Após o término da prensagem as chapas foram acondicionadas no laboratório de Painéis e Secagem da Madeira onde foram resfriadas em temperatura ambiente, para seguirem para a retirada dos corpos de prova. A Figura 26 apresenta os painéis produzidos com melamina-formaldeído, Figura 27 os painéis produzidos com ureia-formaldeído e a Figura 28 apresenta os painéis produzidos com melamina-formaldeído e ureia-formaldeído com adição de 1% de nanopartículas.

Figura 26 – Painéis produzidos com melamina-formaldeído após o esquadrejamento: (a) sem adição de nanopartículas; (b) com adição de 0,5 % de nanopartículas.



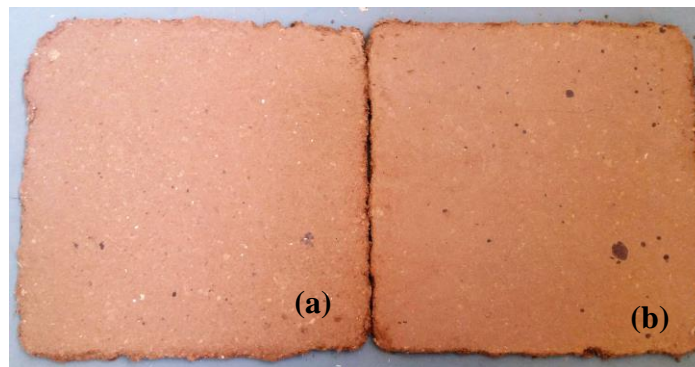
Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 27 - Painéis produzidos com ureia-formaldeído após o esquadrejamento: (a) sem adição de nanopartículas; (b) com adição de 0,5 % de nanopartículas.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 28 – Painéis produzidos com adição de 1% de nanopartículas: (a) Painéis produzidos com melamina-formaldeído; (b) painéis produzidos com ureia-formaldeído.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Após 72h ocorreu a retirada dos corpos de prova para os testes físicos e mecânicos das chapas de cada tratamento identificados como 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Os corpos de prova permaneceram por aproximadamente 72 horas em sala climatizada com temperatura de 20 °C e umidade relativa de 65%, exceto os corpos de prova para o teste físico de teor de umidade.

Posteriormente os corpos de prova foram identificados e ocorreu a realização dos testes físicos e mecânicos.

4.6 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL MDF

Os testes físicos e mecânicos do trabalho foram realizados de acordo com o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 que apresenta as classificações dos painéis de fibra de média densidade, assim como os requisitos gerais e os métodos de ensaio para a

caracterização das chapas. A seguir apresenta-se uma breve descrição dos ensaios e ilustrações dos mesmos.

3.6.1 Testes físicos

Os testes físicos realizados para a caracterização dos painéis foram densidade, teor de umidade e inchamento 24 h. Os ensaios foram realizados no laboratório de Propriedades dos Materiais do Campus da Unesp de Itapeva.

Antes do início dos testes físicos ocorreu a pesagem, identificação e anotações de medidas (espessura, comprimento e largura) dos corpos de prova para todos os seis tratamentos, como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Pesagem e identificação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria, 2018.

4.6.1.1 Determinação da densidade

A determinação da densidade foi realizada de acordo com a ABNT NBR 15316-2:2015, a partir de dez corpos de prova medindo (50 × 50) mm para cada um dos seis tratamentos. Inicialmente foi realizada a determinação da massa dos corpos de prova e identificação, em seguida as medições de espessura utilizando o micrômetro, largura e comprimento com o paquímetro.

O cálculo para a densidade de cada corpo de prova foi realizado conforme a Equação 1, com precisão de 1 kg/m³.

$$D = \frac{M}{V} \times 1000000 \quad (1)$$

Sendo:

$$V = b_1 \times b_2 \times e$$

Onde

D é a densidade do corpo de prova (kg/m^3);

M é a massa do corpo de prova (g);

V é o volume do corpo de prova (mm^3);

b_1 e b_2 são as dimensões do corpo de prova (mm);

e é a espessura do corpo de prova (mm).

4.6.1.2 Determinação do teor de umidade

O teste físico para a determinação do teor de umidade foi realizado de acordo com o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 utilizando-se dez corpos de prova medindo (50×50) mm para cada tratamento. O procedimento iniciou-se com a determinação da massa úmida dos corpos de prova, e em seguida registraram-se os valores. Para o processo de secagem os corpos de prova foram colocados em estufa, mantida à temperatura de (103 ± 2) °C até a obtenção de massa constante. Após terem esfriado, determinou-se a massa dos corpos de prova individualmente, com resolução de 0,1 g, e registrou-se os valores medidos como “massa seca”.

Para o cálculo da porcentagem do teor de umidade, utilizou-se a Equação 2:

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

U é o teor de umidade do corpo de prova (%);

MU é a massa úmida do corpo de prova (g);

MS é a massa seca do corpo de prova (g);

O resultado foi referente a média dos corpos de prova analisados, expresso em porcentagem com precisão de 0,1%.

4.6.1.3 Determinação do inchamento por 24h

Foram utilizados para o teste de inchamento de acordo com o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 dez corpos de prova medindo (50×50) mm extraídos do painel de madeira. Os corpos de prova foram estabilizados em câmara climática até atingir a umidade

de equilíbrio. O micrômetro foi o equipamento utilizado para a medição de espessura e após a medição de espessura dos corpos de prova ocorreu sua identificação. Os corpos de prova ficaram submersos totalmente em água deionizada no recipiente.

Após 24 ± 36 min de imersão, retirou-se os corpos de prova do recipiente e removeu-se o excesso de água com papel absorvente. Em seguida, mediu-se novamente a espessura do corpo de prova em seu centro, anotando os respectivos valores medidos, bem como o tempo de imersão. Para o cálculo de inchamento da espessura do corpo de prova, utilizou-se a Equação 3:

$$I = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

I é o inchamento em espessura do corpo de prova (%);

E1 é a espessura do corpo de prova após o período de imersão considerado (mm);

E0 é a espessura do corpo de prova antes da imersão (mm).

O resultado foi a média dos inchamentos dos corpos de prova analisados, expresso em porcentagem, com precisão de 0,1%.

4.6.2 Testes mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados foram de determinação da resistência à flexão estática que foi possível obter o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura. Os ensaios mecânicos também foram realizados no Laboratório de Propriedades dos Materiais, utilizando a máquina universal de ensaios.

4.6.2.1 Determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade

Para este ensaio de acordo com a ABNT NBR 15316-2:2015 foram utilizados dez corpos de prova retangulares medindo $[(20 \times \text{espessura}) + 50] \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ extraídos dos painéis de madeira.

Após as medições colocam-se os extremos dos corpos de prova sobre os dois apoios da máquina universal de ensaios, conforme Figura 30.

A máquina universal de ensaios foi conectada a um computador que possui o programa de aquisição de dados que realiza a leitura dos dados de cada corpo de prova, calcula as resistências e apresenta gráficos com os resultados dos ensaios. A Figura 30 apresenta os detalhes do ensaio de flexão realizados para as amostras.

Figura 30- Ensaio de flexão estática: corpo de prova acoplado no equipamento.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A resistência à flexão estática do corpo de prova foi calculada pela Equação 4:

$$\text{MOR} = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2} \quad (4)$$

Onde:

MOR é o módulo de resistência à flexão estática (N/mm²);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre apoios do aparelho (mm);

B é a largura do corpo de prova (mm);

E é a espessura do corpo de prova (mm).

O módulo de elasticidade foi calculado conforme a Equação 5:

$$\text{MOE} = \frac{P1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3} \quad (5)$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade(N/mm²);

P1 é a carga no limite proporcional lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre apoios do aparelho (mm);

d é a deflexão, expressa em milímetros (mm), correspondente à carga P1;

B é a largura do corpo de prova (mm);

E é a espessura do corpo de prova (mm).

O resultado do ensaio foi a média dos resultados dos corpos de prova ensaiados, expresso em newtons por milímetro quadrado (N/mm²), com precisão de 1 N/mm² para o MOR e de 10 N/mm² para MOE.

4.7 MÉTODO PARA A ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizado para o trabalho um delineamento fatorial inteiramente casualizado com dois fatores (efeitos principais), sendo um correspondente a adição de diferentes porcentagens de nanopartículas e outro correspondente aos dois diferentes tipos de adesivo. O fator correspondente às porcentagens de nanopartículas possuiu três níveis, sendo eles: os painéis sem adição de nanopartículas, os painéis com adição de 0,5% de nanopartículas e os painéis com adição de 1% de nanopartículas de óxido de zinco. O fator correspondente à utilização de adesivos possuiu dois níveis, sendo eles: os painéis produzidos com ureia-formaldeído e os produzidos com melamina-formaldeído. Sendo assim, foi realizado um arranjo fatorial de 3 x 2.

A utilização de *softwares* e pacotes estatísticos para a análise de resultados experimentais é de grande importância, desde o desenvolvimento e aplicação de métodos até a análise e interpretação dos resultados obtidos através dos diferentes tratamentos. O programa utilizado para a análise e comparação dos resultados foi o programa estatístico R versão 3.2.0 de 2015 e tabelas no Microsoft Office. O R disponibiliza uma grande variedade de métodos estatísticos (modelagem linear e não linear, testes estatísticos, classificação, métodos multivariados) e técnicas gráficas.

A análise estatística utilizada foi a Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 5% para testar a existência de diferenças significativas entre as médias. Nos casos em que houve diferenças significativas foi necessário realizar o Teste de Tukey, com o intuito de identificar estas diferenças comparando cada tratamento.

4.8 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO PAINEL DURANTE O PROCESSO DE PRENSAGEM

Para a avaliação da temperatura durante o processo de prensagem dos painéis foi utilizado um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*. No processo de

aquisição de dados (DAQ) ocorre a medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador. Neste trabalho ocorreu a medição de temperatura no interior dos painéis MDF.

De acordo com a *National Instruments* um sistema DAQ é formado por sensores, *hardware* de aquisição e medição de dados em um computador com *software* programável. Em comparação com os sistemas tradicionais de medição, os sistemas DAQ baseados em computadores exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de conectividades dos computadores padrão da indústria. Com isso, se obtém uma solução de medição mais ampla e flexível de dados e um melhor custo-benefício no processo. A Figura 31 apresenta os componentes do sistema.

Figura 31 - Os componentes do sistema DAQ.



Fonte: *National Instruments*.

A Figura 32 apresenta o sensor utilizado neste trabalho para a medição da temperatura no decorrer do tempo, o termopar tipo K, segundo o fabricante sua faixa de medição de temperatura varia entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 32 – Termopar tipo K utilizado no processo.



Fonte: Site Eletrodex eletrônica.

O dispositivo DAQ atua como a interface entre um computador e sinais externos. Ele funciona basicamente como um dispositivo que digitaliza sinais analógicos de entrada de forma que um computador possa interpretá-los. A Figura 33 apresenta o dispositivo utilizado para a medição.

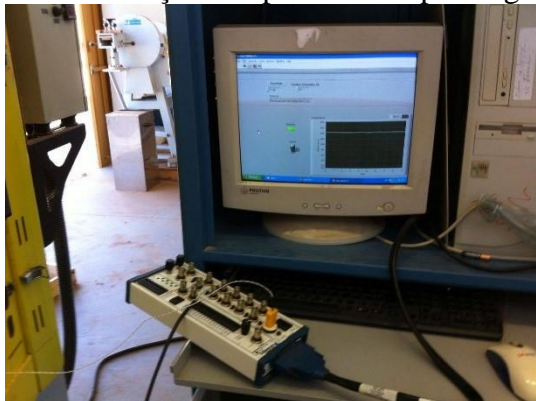
Figura 33 - Dispositivo DAQ utilizado para medição da temperatura.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O último componente do conjunto de aquisição de dados é o computador que possui softwares de drivers e de aplicação. A Figura 34 apresenta o sistema com todos os seus componentes realizando a aquisição de temperatura.

Figura 34 – Conjunto realizando medições no processo de prensagem.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O termopar foi introduzido na região central do colchão de fibras conforme ilustra a Figura 35, após a etapa de pré-prensagem.

Figura 35 – Posicionamento do termopar no colchão de fibras.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Antes de iniciar o processo de prensagem se estabeleceu os parâmetros para começar a aquisição dos dados. Os parâmetros foram o intervalo de temperatura para a análise, que para este trabalho foi estabelecido de 20 até 180 ° C, ajustado o número de 10 amostragens de temperatura por segundo e criação de um arquivo em formato .txt para salvar os dados de temperatura. No arquivo foram representadas apenas as temperaturas. Sendo assim, existiu a necessidade da utilização de um cronômetro para auxiliar na anotação do tempo de prensagem, para a posterior divisão dos ciclos.

Todas as informações sobre o ciclo de prensagem foram anotadas para facilitar a divisão de suas etapas posteriormente. Informações como início de aquisição de dados, início de descida do prato superior da prensa (acionamento do equipamento), início de cada ciclo de prensagem, término de cada ciclo de prensagem. O tempo de alívio de pressão foi o intervalo entre cada ciclo de prensagem.

Previamente antes de inserir o termopar tipo K no painel, acoplou-se o mesmo no equipamento de aquisição de dados para a verificar se o equipamento estava realizando as medições e, após a confirmação ocorreu a introdução do termopar na região central da chapa.

O painel com o termopar foi introduzido na prensa, e antes de iniciar a prensagem já começava a aquisição dos dados e era realizada a marcação do tempo de acionamento da prensa. Em seguida, as posteriores marcações dos ciclos de prensagem e alívios de pressão.

Os gráficos que apresentam a curva de temperatura ao longo da prensagem para os tratamentos realizados são apresentados nos resultados e discussões deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados de ensaios físicos e mecânicos dos painéis produzidos para os seis tratamentos realizados. Todos os resultados foram comparados com documento normativo nacional e internacional, e quando possível foram relacionados com trabalhos encontrados na literatura recente. Por fim, foi realizada a análise quanto a transferência de calor através do uso de termopar e sistema de aquisição de dados.

5.1 RESULTADOS DOS TESTES FÍSICOS DOS PAINÉIS MDF PRODUZIDOS COM *Eucalyptus grandis-híbrido* H103

A Tabela 6 apresenta os valores médios dos resultados dos testes físicos, respectivos desvios para os seis tratamentos produzidos e as letras que representam a interpretação dos resultados da análise estatística.

Tabela 6- Valores médios obtidos através dos testes físicos.

Tratamentos	Densidade (kg/m ³)	Teor de umidade (%)	Inc. 24h (%)
1	749,75 c ² (30,88) ¹	5,54 b (0,20)	18,46 b (2,38)
2	689,11 b (63,82)	5,56 b (0,21)	15,26 ab (2,41)
3	588,49 a (36,03)	7,29 c (0,19)	36,70 c (2,91)
4	779,67 c (35,65)	4,77 ab (1,22)	17,17 b (1,10)
5	748,43 c (61,58)	4,04 a (1,13)	11,77 a (2,75)
6	588,96 a (24,04)	7,33 c (0,10)	36,93 c (2,30)

⁽¹⁾ Os valores entre parênteses apresentam o desvio padrão.

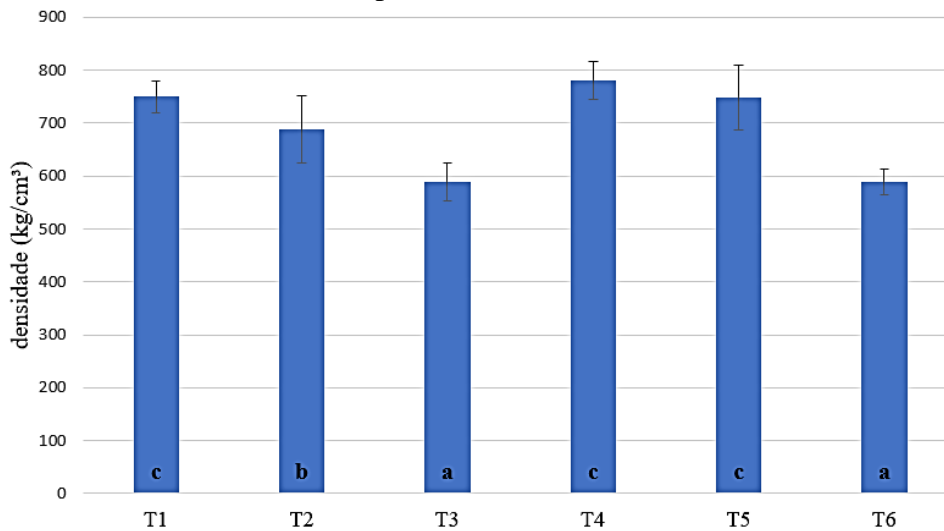
⁽²⁾ Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença significativa (Tukey, p = 5%).

Fonte: A autoria própria, 2018.

5.1.1 Ensaio de densidade

A Figura 36 apresenta os valores médios obtidos para o teste físico de densidade representados em forma de barras, o desvio padrão obtido para cada tratamento e a divisão dos grupos obtida através da interpretação da análise estatística.

Figura 36– Resultados dos tratamentos para o ensaio de densidade.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Através da Figura 36 pode-se observar a diminuição da densidade dos tratamentos com a adição de nanopartículas, tanto para os painéis produzidos com UF como MF, apresentando maior densidade de 779,67 kg/m³ o tratamento 4, com painéis sem adição de nanopartículas e produzidos com MF. A menor densidade de 588,49 kg/m³ foi obtida para o tratamento 3, onde foram adicionadas 1 % de nanopartículas em cada painel do tratamento com UF.

Os painéis dos tratamentos 1, 2, 4 e 5 apresentaram valores de densidade e espessura de acordo com o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015, que indica a faixa de valores de densidade de 651 kg/m³ até 800 kg/m³ para painéis com espessura entre 12 mm até 19 mm. Ressalta-se que os painéis para os seis tratamentos apresentaram espessura média de 13,05 mm, caracterizando assim de acordo com a tabela 1 da ABNT NBR 15316-2:2015 os painéis como painéis de fibra de média densidade.

Comparando os valores de densidade obtidos no trabalho para todos os tratamentos com os apresentados pelo documento normativo ANSI A2008.2-2002, que caracteriza painéis de fibras de madeira para aplicações internas, todas as chapas produzidas para os tratamentos estavam de acordo com a faixa de densidade estipulada, com um intervalo maior entre os valores mínimo e máximo de 500 kg/m³ e 1000 kg/m³, respectivamente.

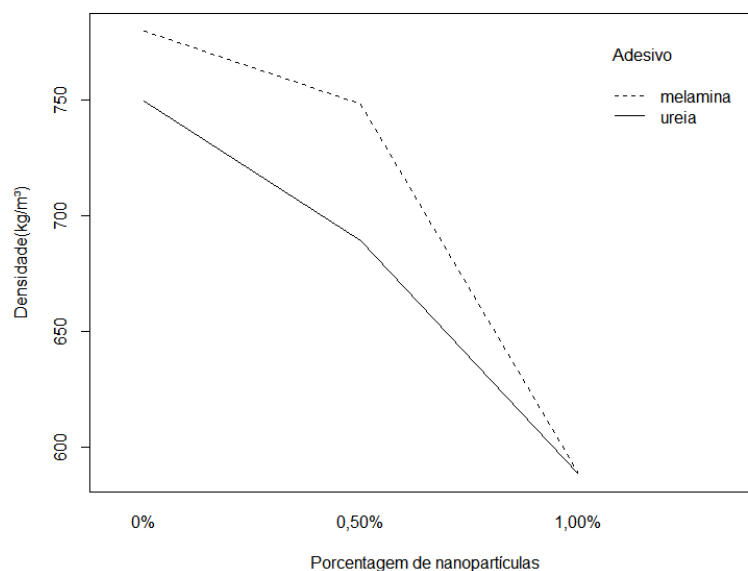
Para o teste físico de densidade, foi observada interação significativa entre os tratamentos ($F\text{-value} = 6,7423$; $p\text{-value} = 0,0121 < 5\%$). Comparando cada um dos seis tratamentos entre si com o teste Tukey, pode-se observar qual apresentou diferença significativa estatisticamente. Os tratamentos 1, 4 e 5 não apresentaram diferença significativa entre si, com os maiores valores de densidade. Os tratamentos 3 e 6 não apresentaram

diferença estatisticamente e o tratamento 2 quando comparado com os outros tratamentos do trabalho apresentou diferença significativa. As letras minúsculas em negrito na Figura 33 representam as divisões dos grupos da análise estatísticas, letras iguais significam que os tratamentos apresentaram médias estatisticamente iguais.

A Figura 37 apresenta o gráfico da relação do aumento da adição de nanopartículas de óxido de zinco nos tratamentos para os dois diferentes tipos de adesivos e o que ocorreu com a densidade dos painéis.

Pela figura nota-se o decréscimo do valor da densidade com o aumento da adição de nanopartículas, tanto para a resina MF como UF. Isto pode ser justificado pela aceleração da cura da resina nas regiões mais externas do painel o que impediu que o interior do painel pudesse ser mais adensado. Até a porcentagem de 0,5%, os painéis ainda se encontravam com densidades de acordo com o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015, mas com a adição de 1% conforme o gráfico de interação obtido pela análise estatística pode-se notar a diminuição da densidade dos painéis.

Figura 37 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas na densidade dos painéis para os adesivos MF e UF.

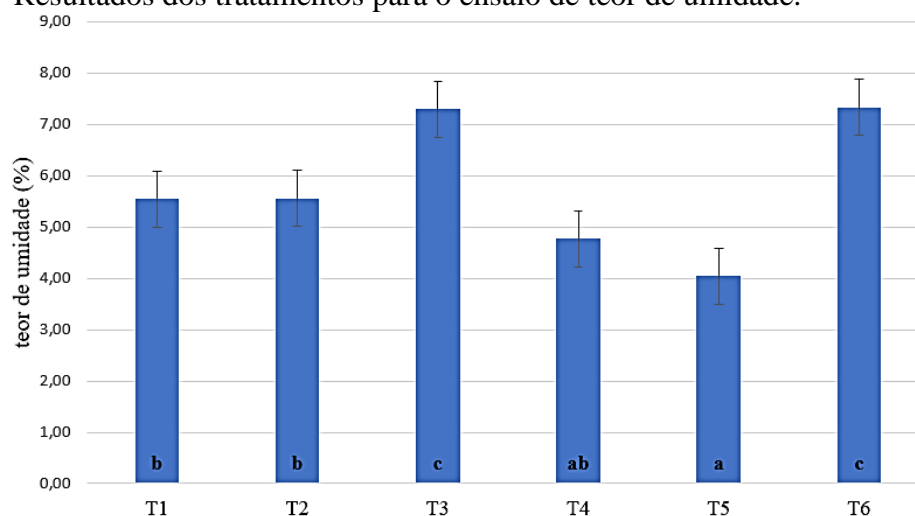


Fonte: Autoria própria, 2018.

5.1.2 Ensaio de teor de umidade

Os resultados médios e respectivos desvios padrão para o teste físico de teor de umidade são apresentados na Figura 38 acompanhados da análise estatística.

Figura 38 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de teor de umidade.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O teor de umidade obtido para todos os tratamentos apresentou-se mais homogêneo mesmo com a adição de nanopartículas. Os tratamentos 1 e 2, produzidos com UF, apresentaram teores de umidade próximos, com valores de 5,54 e 5,56 %. Para os tratamentos 4 e 5 produzidos com MF, os valores de teor de umidade foram mais baixos 4,77 e 4,04 % de modo respectivo. O melhor desempenho dos painéis produzidos com MF referiu-se a característica do adesivo em contato com água.

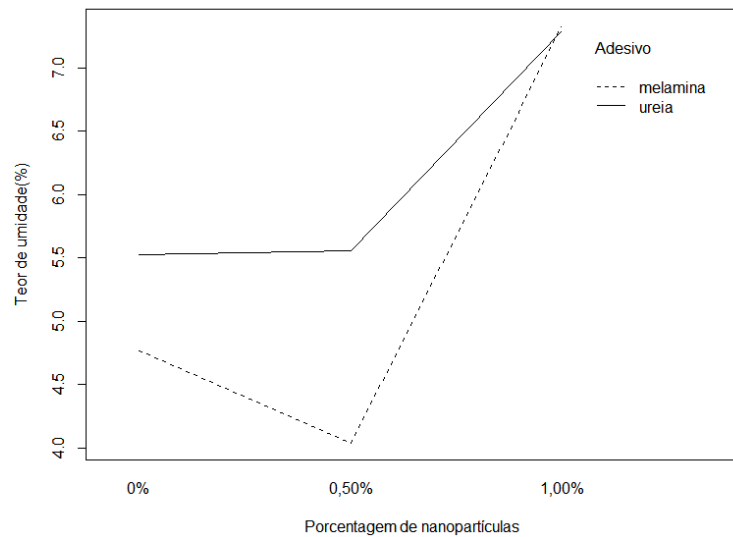
Os tratamentos 3 e 6 com adição de 1% de nanopartículas em painéis produzidos com UF e MF respectivamente, apresentaram maiores valores de teor de umidade com valores de 7,29 e 7,33%. Maiores resultados de teor de umidade dos painéis representam menor diminuição de umidade no ciclo de prensagem. Assim como ocorreu para a densidade, a adição de nanopartículas acelerou especialmente a cura da resina nas camadas mais externas do colchão e limitou a transferência de calor para as regiões mais internas, dificultando a saída de vapor d'água, o que aumentou a umidade do painel como todo.

Para o teste físico de teor de umidade, foi observada interação significativa entre os tratamentos ($F\text{-value} = 8,0581$; $p\text{-value} = 0,006371 < 5\%$). O teste Tukey foi realizado para apresentar a diferença significativa para cada tratamento.

Tanto o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 quanto o ANSI A2008.2-2002 não especificam valores para o teste físico de teor de umidade dos painéis MDF.

A Figura 39 representa o gráfico de interação do aumento da adição de nanopartículas nos painéis, tanto para o adesivo UF como MF.

Figura 39 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no teor de umidade para os adesivos MF e UF.

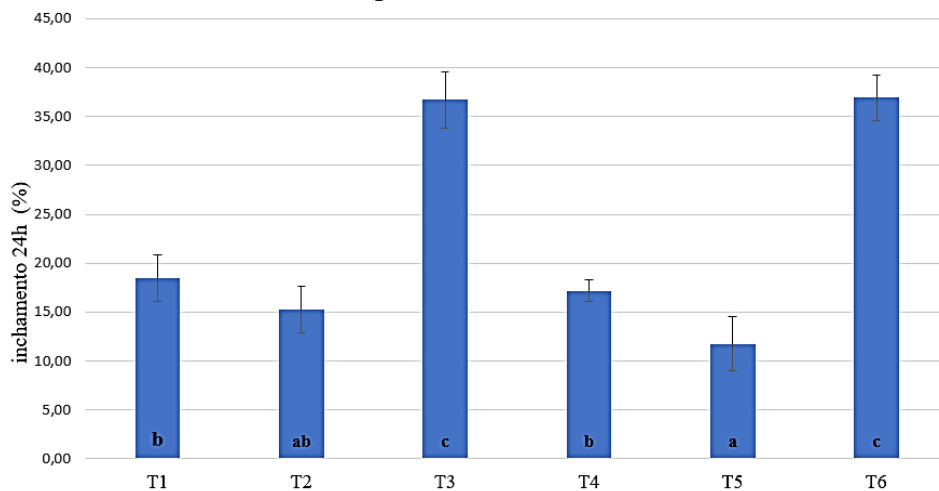


Fonte: Autoria própria, 2018.

5.1.3 Ensaio de inchamento em espessura por 24h

O ensaio físico de inchamento após imersão em água por 24 horas analisou o aumento da espessura dos painéis que permaneceram em um recipiente com água durante 24h, comparando a espessura inicial e a final de cada corpo de prova. A Figura 40 apresenta os valores médios de inchamento dos painéis produzidos para os seis tratamentos com a representação do desvio padrão e análise estatística.

Figura 40 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de inchamento 24h.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores para o inchamento variaram de 18,46% o maior inchamento, obtido pelo tratamento 1 sem a adição de nanopartículas com painéis produzidos com ureia e o menor inchamento para o tratamento 5 com 11,77% para os painéis produzidos com melamina e adição de 0,5% de nanopartículas. Como pode-se observar os tratamentos 3 e 6 foram os piores e, isto pode ser justificado pela maior porosidade do painel a partir da densidade reduzida nestes tratamentos apresentadas no item 5.1.1.

Para o teste físico de teor de inchamento, foi observada interação significativa entre os tratamentos ($F\text{-value} = 4,5404$; $p\text{-value} = 0,03776 < 5\%$).

A ABNT NBR 15316-2:2015 apresenta na tabela 5 o valor máximo estabelecido para o teste de inchamento 24h de 12% para os painéis com espessura nominal maiores que 12 mm e menores que 19 mm. Os tratamentos 1, 2 e 4 obtiveram porcentagens de inchamentos superiores aos estabelecidos pela norma com valores de 18,46, 15,26 e 17,17%. O tratamento 5 apresentou porcentagem de inchamento dentro do estabelecido, com 11,77%, painéis fabricados com melamina e 0,5% de nanopartículas.

A ANSI A2008.2-2002 apresenta de outra forma o valor para o inchamento 24h. Este documento estabelece na tabela 1 que a diferença de espessura deve ser de no máximo 1,5 mm para painéis com espessura menores ou iguais a 15 mm, relacionando a espessura antes e após o teste. Os tratamentos 1, 2, 4 e 5 apresentaram variação de espessura de 2,4 mm, 1,9 mm, 2,2 mm e 1,5 mm, respectivamente. O tratamento 5 apresentou resultados de acordo com o documento ANSI A2008.2-2002, da mesma forma que ocorreu para a norma brasileira.

Todos os tratamentos não apresentaram valores em conformidade ao estabelecido pela norma, com exceção do tratamento 5. Mas pode-se notar que a adição de nanopartículas foi significativa para a diminuição das porcentagens de inchamento, tanto para os painéis com UF como MF na porcentagem de 0,5%. As diminuições foram de 3,2% entre os tratamentos 1 e 2 e de 5,4% para os tratamentos 4 e 5.

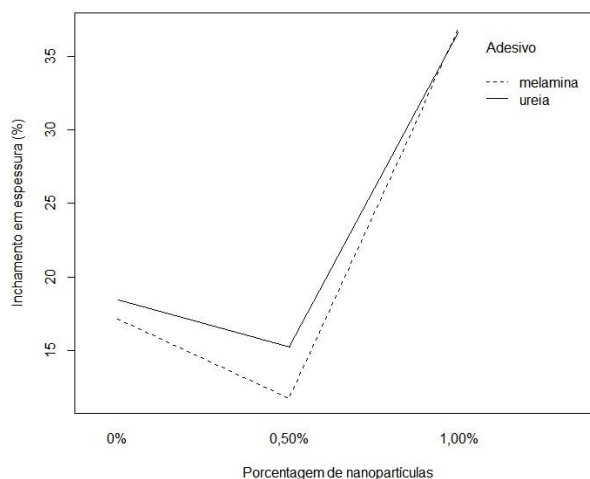
Kumar *et al.* (2013) analisou a possível alteração na temperatura no processo de prensagem no interior dos painéis MDF com a adição de nanopartículas de óxido de alumínio na resina ureia-formaldeído, comparando seus resultados médios de inchamento em espessura 24h para os painéis sem adição e os painéis com 0,5% de nanopartículas, 14,1% e 13,5% respectivamente. Concluíram que seus resultados também apresentaram valores superiores aos mencionados nos documentos normativos, de 12%. As nanopartículas de óxido de alumínio como as de óxido de zinco influenciaram de forma positiva para a diminuição da porcentagem de inchamento nesta porcentagem.

Comparando ainda os resultados de Kumar *et al.* (2013) de diminuição de inchamento 24h, 1,5%, com os resultados deste presente trabalho, 3,2% para os tratamentos com UF, pode-se observar que as nanopartículas de ZnO diminuíram mais que o dobro a porcentagem de inchamento dos painéis.

Mantanis e Papadopoulos (2010) avaliaram em seu trabalho o inchamento 24h de três tipos de painéis de madeira comerciais, com e sem a aplicação superficial de uma solução de nanopartículas chamada *SurfaPore W*, que segundo o fabricante diminui a absorção de água e impregnação de manchas de óleo na madeira. Mantanis e Papadopoulos (2010) afirmaram que os painéis MDF tratados com o produto apresentaram diminuição 13,6% no inchamento em espessura, comparando seu resultado com os painéis desta pesquisa, produzidos em escala laboratorial, apresentaram diminuição de 14,1% e 18,2% de diminuição do aumento de espessura para os tratamentos com UF e MF respectivamente. As chapas produzidas neste trabalho apresentaram aumento significativo da diminuição da porcentagem de inchamento quando comparado ao produto comercial *SurfaPore W* distribuído em vários países inclusive no Brasil.

A Figura 41 apresenta a interação da adição de nanopartículas nos seis diferentes tratamentos. Pode-se observar neste caso que para os tratamentos sem adição de nanopartículas e adição de 1% os painéis apresentaram inchamentos superiores, tanto para o adesivo UF quanto para MF. Para a porcentagem de 0,5% de nanopartículas, o tratamento 5 com MF apresentou porcentagem de inchamento de acordo com o apresentado em documentos normativos.

Figura 41 - Gráfico de interação para a adição de nanopartículas no inchamento em espessura 24h dos painéis para os adesivos MF e UF.



5.2 RESULTADOS DOS TESTES MECÂNICOS DOS PAINÉIS MDF PRODUZIDOS COM *Eucalyptus grandis*-híbrido H103

Os resultados obtidos nos testes mecânicos para a determinação do módulo de elasticidade e módulo de ruptura para os seis tratamentos encontram-se na Tabela 7. São também apresentados os valores médios, desvio padrão e análise estatística que analisou as variáveis que apresentaram diferença significativa. Após a análise efetuou-se a divisão entre grupos para os tratamentos com resultados estatisticamente relacionados.

Tabela 7 - Valores médios obtidos através dos testes mecânicos.

Tratamentos	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	1256,91 b ² (262,69) ¹	6,99 b (1,51)
2	1261,10 b (316,24)	7,64 b (1,81)
3	882,21 ab (308,30)	3,74 a (1,39)
4	1696,24 c (205,90)	10,28 c (1,75)
5	1816,15 c (170,04)	10,47 c (0,96)
6	745,60 a (60,14)	3,52 a (0,37)

⁽¹⁾ Os valores entre parênteses apresentam o desvio padrão.

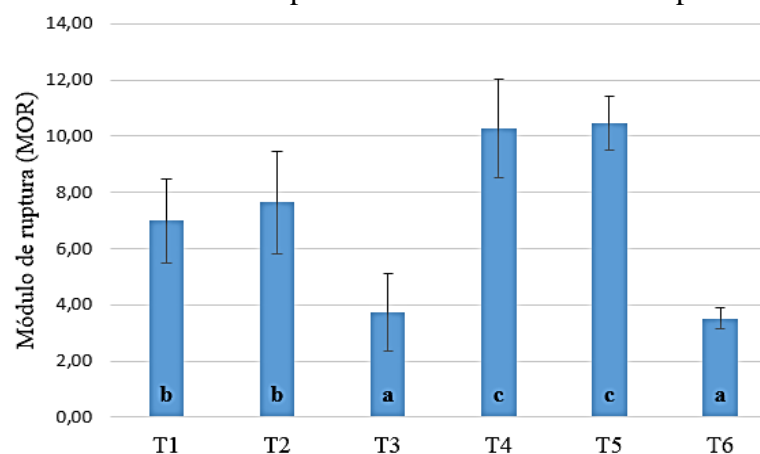
⁽²⁾ Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença significativa (Tukey, p = 5%).

Fonte: Autoria própria, 2018.

5.2.1 Determinação da resistência à flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade)

A Figura 42 apresenta os resultados médios para o ensaio mecânico de resistência à flexão estática para obtenção do módulo de ruptura, para os seis tratamentos desenvolvidos no trabalho, o desvio padrão de cada tratamento e a distribuição da análise estatística.

Figura 42 - Resultados dos tratamentos para o ensaio de módulo de ruptura.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 42 apresenta os módulos de ruptura para os tratamentos, sendo que os resultados médios variaram de 7 MPa até 10,47 MPa. Os menores valores de resistência foram obtidos com os painéis produzidos com a resina UF e os painéis que apresentaram maiores resistências foram os produzidos com a resina MF. Com base na figura anterior pode-se observar que os painéis produzidos tanto com UF como MF e 0,5% de nanopartículas apresentaram uma tendência de melhora em termos de resistência. Já os painéis produzidos com 1% de nanopartículas, tratamentos 3 e 6 foram piores e, pode-se justificar tal efeito pela transferência de calor não homogênea e eficiente ao longo da espessura do colchão, o que resultou em perda de desempenho tanto físico, como descrito anteriormente, e mecânico dos painéis.

Para o teste mecânico de flexão estática para determinação do módulo de ruptura, foi observada interação significativa entre os tratamentos ($F\text{-value} = 14,2579$; $p\text{-value} = 0,0003987 < 5\%$).

O documento normativo ANSI A2008.2-2002 estabelece diferentes categorias para os painéis MDF aplicados para uso interior. As categorias possuem nomenclatura que variam conforme sua resistência. Na tabela 1 que classifica painéis com espessuras maiores ou iguais a 9,5 mm, os módulos de ruptura estabelecidos variam de 14 MPa para a categoria 110 até o maior módulo de ruptura de 31 MPa para os painéis que se enquadram na categoria 160. Os painéis produzidos no trabalho não atingiram aos valores estabelecidos pelo documento normativo, não se classificando nas categorias de módulo de ruptura estabelecida.

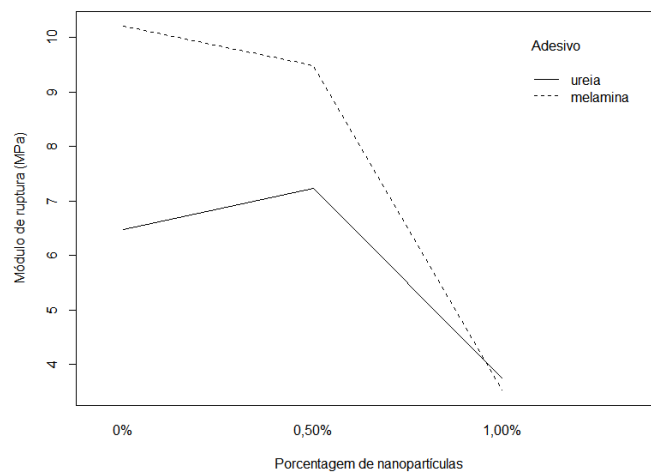
De acordo com a ABNT NBR 15316-2:2015 na tabela 5 que se encontra no item 5.4 que estabelece os requisitos para os painéis MDF não estruturais para o uso em condições secas, apresenta que os painéis com espessura maiores que 12 mm e menores que 19 mm devem apresentar resistência à flexão estática de no mínimo 20 MPa. Como ocorreu em comparação com o documento normativo internacional, os painéis não atenderam aos valores estabelecidos no documento normativo nacional.

Os resultados médios para o módulo de ruptura não atenderam aos valores estabelecidos pelos documentos normativos. Pode-se justificar tal dificuldade em atingir os valores normativos e comerciais devido ao processo produtivo dos painéis em escala laboratorial ser diferente do processo produtivo industrial, mas, de uma forma geral, a adição de nanopartículas nos painéis resultou em aumento do módulo de ruptura.

Os painéis produzidos com a resina MF apresentaram melhores resultados quando comparados com os painéis com UF, seguindo os padrões dos testes físicos.

A Figura 43 apresenta a relação da adição de três diferentes porcentagens de nanopartículas no resultado do módulo de ruptura para os tratamentos. A adição de 1% de nanopartículas de óxido de zinco diminuiu os valores do módulo de ruptura tanto os tratamentos com MF como UF, para os painéis com UF a adição de 0,5% aumentou a resistência dos painéis, já para os tratamentos com MF a adição de 0,5 e 1% diminui o módulo de ruptura dos painéis.

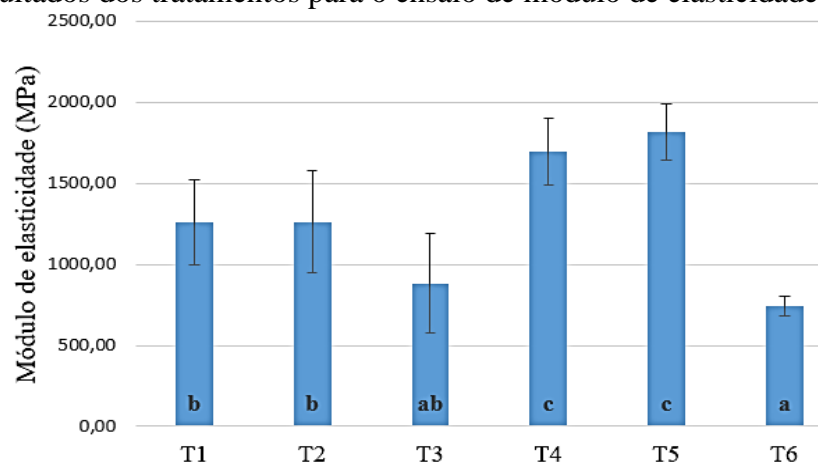
Figura 43 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no módulo de ruptura dos painéis para os adesivos MF e UF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 44 estão os resultados médios obtidos no ensaio mecânico de resistência à flexão estática para obtenção do módulo de elasticidade, para os seis tratamentos desenvolvidos no trabalho.

Figura 44- Resultados dos tratamentos para o ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 44 apresenta os valores médios para o teste mecânico do módulo de elasticidade, os valores para os tratamentos produzidos com a resina UF foram de 1256,91 MPa e 1261,10 MPa para os painéis sem a adição e com a adição de 0,5% de nanopartículas, respectivamente. Para os tratamentos com resina MF foram de 1696,24 MPa e 1816,15 MPa para os painéis sem a adição e com a adição de 0,5% de nanopartículas de óxido de zinco, de modo respectivo. A mesma análise realizada para o MOR pode ser apresentada para o MOE, ou seja, os painéis produzidos tanto com UF como MF e 0,5% de nanopartículas apresentaram uma tendência de melhora em rigidez. Os painéis produzidos com adição de 1% de nano, tratamentos 3 e 6 foram piores e, pode-se justificar tal efeito pela transferência menos eficiente ao longo da espessura do colchão, o que resultou em perda de desempenho tanto físico, como descrito anteriormente, e mecânico dos painéis.

Para o teste mecânico de módulo de elasticidade, foi observada interação significativa entre os tratamentos (F -value = 13.0444; p -value = 0,0006673 < 5%).

Os valores médios para módulo de elasticidade segundo a tabela 1 do documento normativo ANSI A2008.2-2002, variaram também de acordo com as categorias dos painéis MDF com mais de 9,5 mm de espessura. Os painéis dos tratamentos 1 e 2 produzidos com resina UF resultaram em módulos de elasticidade de 1256,91 MPa e 1261,10 MPa menores que os valores mínimos estabelecidos pelo documento normativo. Para os tratamentos 4 e 5 que eram os painéis produzidos com MF, os mesmos apresentaram módulo de elasticidade de 1696,24 MPa e 1816,15 MPa para os tratamentos sem adição e com a adição de 0,5% de nanopartículas.

Os tratamentos 3 e 6 com adição de 1% de nanopartículas produzidos com UF e MF, respectivamente, apresentaram os menores valores de módulo de elasticidade de 3,74 MPa e 3,52 MPa. Assim como para o módulo de ruptura o aumento da porcentagem de nanopartículas também diminuiu significativamente o módulo de elasticidade dos painéis, podendo ser justificado pela interferência pela aceleração da cura durante o processo de prensagem e, dificuldade em atingir as regiões mais internas do painel.

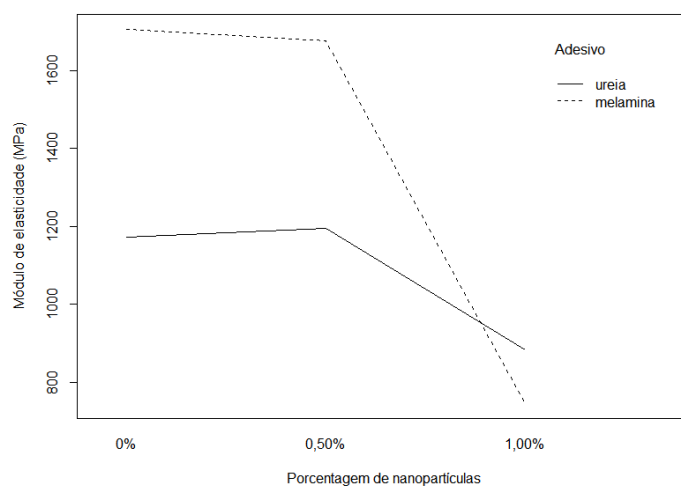
Os tratamentos produzidos com resina MF apresentaram valores superiores aos estabelecidos pela ANSI A2008.2-2002 que indica um valor mínimo de módulo de elasticidade de 1400 MPa para a classe 110.

Para o documento normativo ABNT NBR 15316-2:2015 o valor mínimo para o módulo de elasticidade para os painéis MDF com a faixa de espessura dos tratamentos do trabalho de 13 mm é de 2200 MPa. Todos os tratamentos não atingiram o valor de módulo de elasticidade mínimo, tanto para os painéis produzidos com resina UF e com resina MF.

A adição de nanopartículas nos painéis melhorou de forma geral os valores médios para o teste de flexão estática para a determinação de módulo de ruptura e módulo de elasticidade quando adicionado 0,5% de nanopartículas e, pior desempenho quando adicionado 1% de nanopartículas.

A Figura 45 representa o gráfico de interação da adição de nanopartículas no módulo de elasticidade, os tratamentos com MF apresentaram módulo de elasticidade maiores sem a adição de nanopartículas e com a adição de 0,5%, para os tratamentos 3 e 6 com 1% de nanopartículas os painéis com UF exibiram módulo de elasticidade inferiores.

Figura 45 - Gráfico de interação entre da adição de nanopartículas no módulo de elasticidade dos painéis para os adesivos MF e UF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

5.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

Existem diferentes técnicas para caracterizar materiais em escala manométrica, o difratograma de raios X é uma delas. Com o difratograma pode-se observar a cristalinidade e as fases das nanopartículas.

Os picos de alta intensidade representados na Figura 46 ocorrem quando a condição de difração de Bragg foi satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2013).

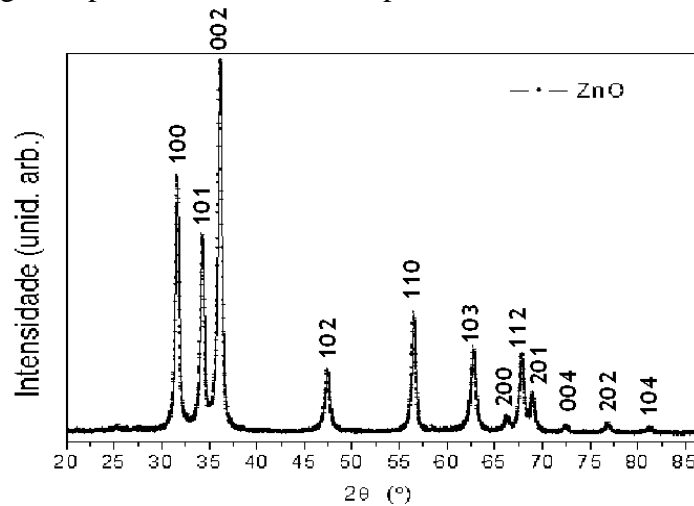
A análise por difração de raios X mostrou que as nanopartículas obtidas apresentaram fase única de ZnO com boa cristalinidade e estrutura hexagonal compacta de wurtzite (ICSD

no.26170 e JCPDS 36-1451), assim como ilustrado na Figura 46. O tamanho de cristalito foi estimado em 22 nm a partir da Equação 6 abaixo, a equação de Scherrer.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (6)$$

Considerando os 5 primeiros picos do espectro de difração. Na Equação 6 D é o tamanho de cristalito, K é o coeficiente de forma ($K = 0,90$), λ é o comprimento de onda da radiação utilizada ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), β é a largura a meia altura do pico de difração (FWHM), e θ é a posição angular do pico.

Figura 46 - Difratograma para a amostra de nanopartículas de óxido de zinco.



Fonte: Autoria própria, 2018.

5.4 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA

A seguir estão apresentados os resultados obtidos durante a análise de transferência de calor através do uso de termopar do tipo K.

A Tabela 8 apresenta os valores médios da temperatura de prensagem no interior dos painéis MDF ao longo dos ciclos de prensagem para cada tratamento. A medição foi realizada através do termopar, introduzido na região central de cada painel.

Tabela 8 - Variação de temperatura no decorrer da prensagem para os tratamentos.

Temperatura média (°C)								
Tratamentos	1º ciclo		alívio 1º ciclo	2º ciclo		alívio 2º ciclo	3º ciclo	
	0-90s	91-180s		0-90s	91-180s		0-90s	91-180s
1	52,05	106,36	110,82	122,00	131,03	125,69	134,11	144,72
2	39,82	99,46	104,63	118,76	128,97	125,28	135,84	145,22
3	49,80	97,77	106,93	113,74	125,20	131,96	138,26	148,41
4	57,49	104,58	110,78	122,98	138,03	144,87	152,31	160,83
5	52,19	120,08	110,81	126,94	140,49	134,02	142,62	152,98

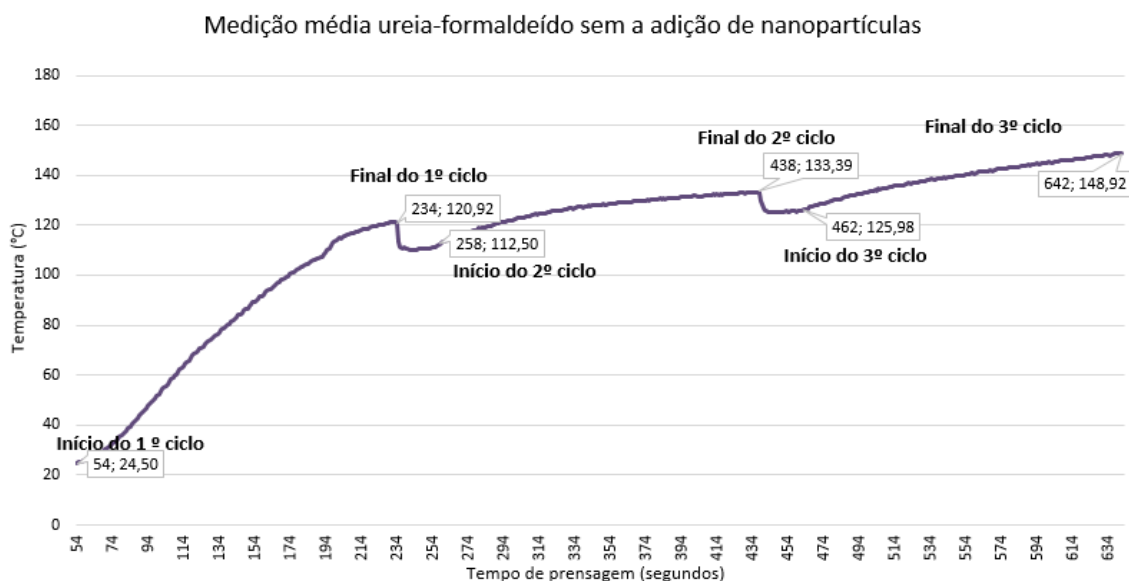
Fonte: Autoria própria, 2018.

As descrições das variações de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem são apresentadas através dos gráficos de temperatura em função do tempo descritos a seguir. Destaca-se que o tratamento 4 não apresentou resultados e será realizado novamente devido a problemas de leitura do termopar utilizado.

5.4.1 Análise de temperatura dos painéis produzidos com UF

O gráfico da curva de temperatura do ciclo de prensagem para os painéis produzidos com UF sem a adição de nanopartículas é representado na Figura 47.

Figura 47 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis sem adição de nanopartículas produzidos com UF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 47 a primeira temperatura de 24,5°C ocorreu no contato do prato superior da prensa no painel, quando ocorreu o início do processo do 1º ciclo de prensagem, com 54 s. O primeiro ciclo de prensagem é onde ocorre maior variação de temperatura devido ao início do processo da transferência de calor, com variação de aproximadamente 96,4°C. Todos os ciclos possuíam duração de 180 s. No tempo de 234 s termina o primeiro, até o tempo de 258 s onde começa o segundo ciclo, intervalo em que ocorre o primeiro alívio de pressão de 24 s, mesmo tempo do segundo alívio de pressão.

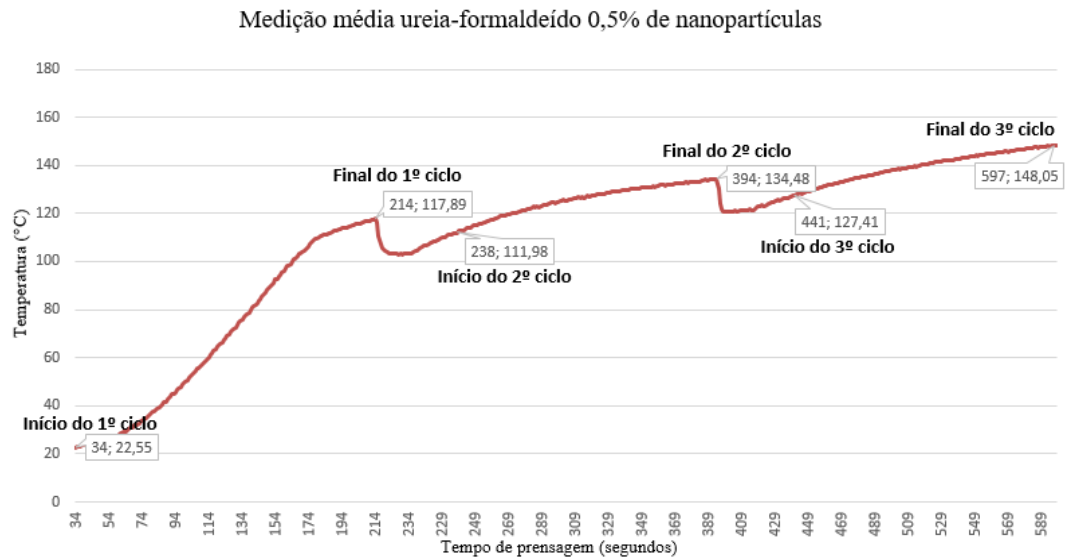
O segundo ciclo de prensagem inicia com temperatura de 112,5°C e termina no tempo 438 s com temperatura de 133,4°C, com uma variação de temperatura no ciclo de aproximadamente 20,9°C.

No último ciclo do processo de prensagem do painel a temperatura inicial foi de 125,9°C no tempo de 462 s. Tanto no início do segundo ciclo como no do terceiro ciclo as temperaturas diminuíram em relação ao final de cada ciclo anterior devido ao afastamento pratos que estavam com temperatura de 180°C.

Ao final do terceiro ciclo no tempo de 642 s ocorreu a maior temperatura do processo de prensagem de 148,9°C, sendo a variação no terceiro ciclo de prensagem foi de aproximadamente 22,9°C. Os valores das variações de temperatura no 2º ciclo e 3º ciclo foram próximos.

A avaliação de temperatura nos painéis do tratamento 2 é representada na Figura 48 com a curva de temperatura do ciclo de prensagem em função do tempo, painéis produzidos com UF e adição de 0,5% de nanopartículas.

Figura 48 – Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 0,5% de nanopartículas produzidos com UF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 48 a primeira temperatura de 22,5°C representa o início do processo de prensagem no tempo de 34 s. Como ocorreu para os painéis sem adição de nanopartículas, no tratamento 2 também ocorreu maior variação de temperatura, com variação de aproximadamente 95,4°C.

O segundo ciclo de prensagem inicia com temperatura de 111,9°C, no tempo 238 s e termina no tempo de 394 s com temperatura de 134,5°C, com uma variação de temperatura no ciclo de aproximadamente 22,5°C.

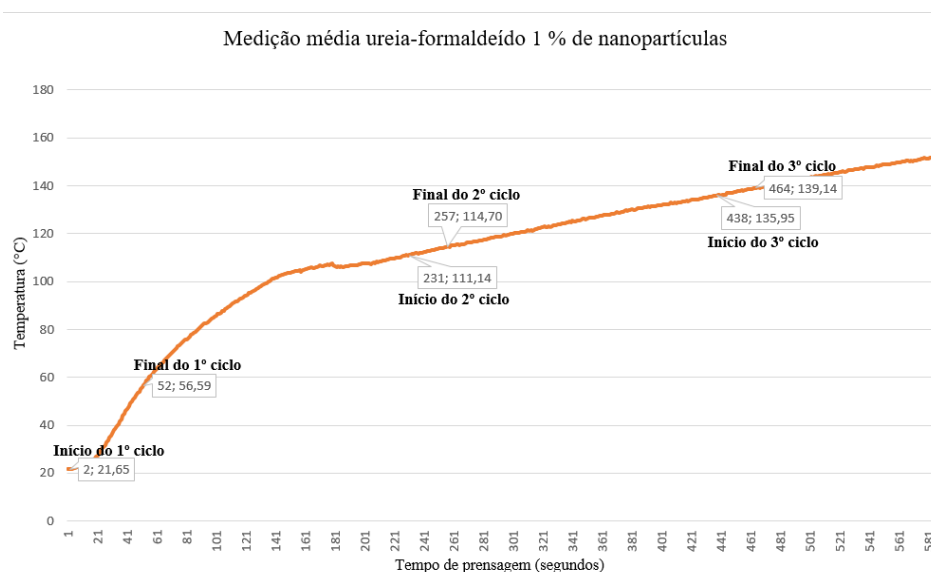
No último ciclo do processo de prensagem do painel a temperatura inicial foi de 127,4°C no tempo de 441 s. Tanto no início do segundo ciclo como no do terceiro ciclo as temperaturas diminuíram em relação ao final de cada ciclo anterior devido ao afastamento pratos que estavam com temperatura de 180°C.

Ao final do terceiro ciclo no tempo de 597 s ocorreu a maior temperatura do processo de prensagem de 148,0°C, sendo que a variação no terceiro ciclo de prensagem foi de aproximadamente 20,6°C. Os valores das variações de temperatura no 2º ciclo e 3º ciclo foram próximos, como para os painéis do tratamento 1.

A Figura 49 representa o gráfico com a curva de temperatura para o tratamento 3, onde foi adicionado 1% de nanopartículas de óxido de zinco. O primeiro ciclo de prensagem iniciou com temperatura de 21,7°C e temperatura final de 56,6°C, para o segundo ciclo iniciou com 111,1°C a temperatura durante o segundo ciclo variou aproximadamente quatro

graus. A adição de 1% de nanopartículas aumentou a temperatura a partir do segundo alívio de pressão e também no terceiro ciclo de pressão. Diferente dos outros gráficos o gráfico da Figura 49 apresenta um aumento contínuo na temperatura, mesmo com os alívios de pressão entre os ciclos.

Figura 49 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 1 % de nanopartículas produzidos com UF.

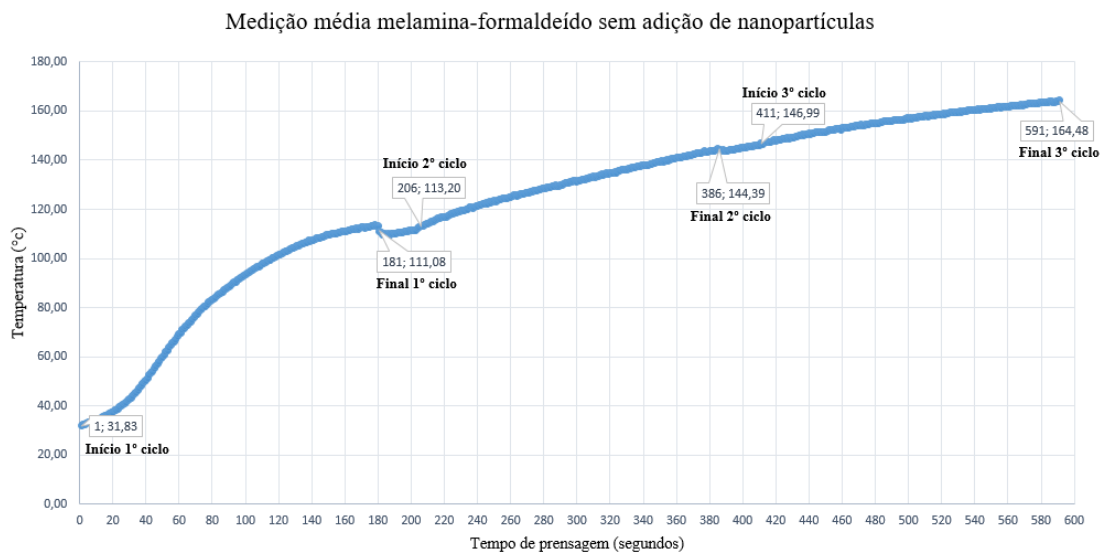


Fonte: Autoria própria, 2018.

5.4.2 Análise de temperatura dos painéis produzidos com MF

A Figura 50 apresenta o gráfico da variação de temperatura do ciclo de prensagem para os painéis produzidos com melamina-formaldeído sem adição de nanopartículas de óxido de zinco. O tratamento 4 apresentou a temperatura do início do primeiro ciclo de 31,8°C e temperatura final de 111,08°C, como para os outros tratamentos o primeiro ciclo apresentou maior aumento de temperatura. Se comparado com os outros tratamentos que utilizaram resina UF em sua composição apresentou temperaturas maiores desde o início e final do ciclo de prensagem, terminando o terceiro ciclo com a maior temperatura dos tratamentos a temperatura de 164,5°C.

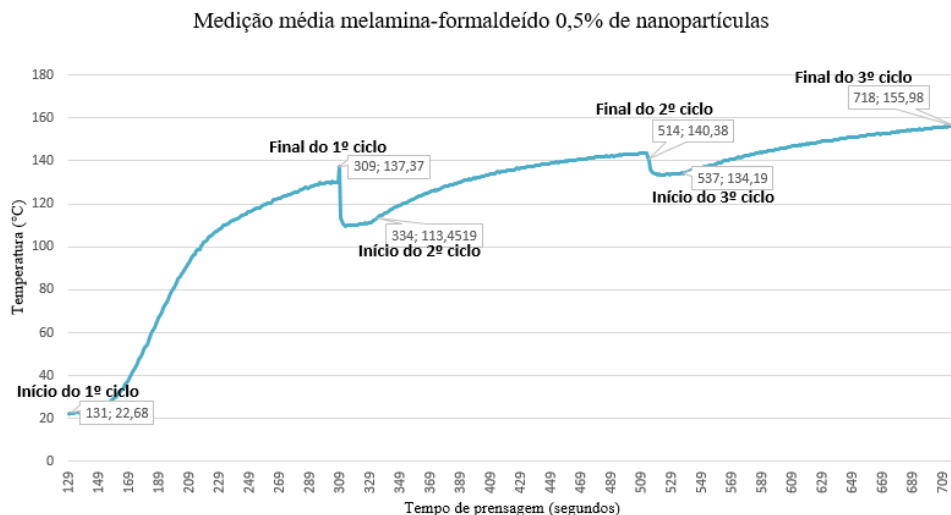
Figura 50 - Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis sem adição de nanopartículas produzidos com MF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 51 representa o primeiro tratamento no trabalho que foi realizado o controle de temperatura.

Figura 51- Gráfico da variação de temperatura no decorrer do ciclo de prensagem para painéis com adição de 0,5% de nanopartículas produzidos com MF.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A primeira temperatura de 22,7°C ocorreu no início do 1º ciclo de prensagem, com 129 s. No primeiro ciclo de prensagem ocorreu maior variação de temperatura, 90,8°C aproximadamente.

No tempo de 309 s termina o primeiro ciclo, no tempo de 334 s inicia o segundo ciclo, o intervalo onde ocorre o primeiro alívio de pressão foi de aproximadamente 25 s entre os dois primeiros ciclos.

O segundo ciclo de prensagem inicia com temperatura de 113,4°C e termina no tempo 514 s com temperatura de 140,4°C, com uma variação de temperatura no ciclo de aproximadamente 26,9°C.

No último ciclo do processo de prensagem do painel produzido com melamina e adição de nanopartículas a temperatura inicial foi de 134,19°C no tempo de 537 s. Tanto no início do segundo ciclo como no do terceiro ciclo as temperaturas diminuíram em relação ao final de cada ciclo anterior devido ao afastamento pratos que estavam com temperatura aproximada de 180°C e não ocorria aplicação de pressão.

Ao final do terceiro ciclo no tempo de 718 s ocorreu a maior temperatura do processo de prensagem de 155,9°C, a variação no terceiro ciclo de prensagem foi de aproximadamente 21,8°C.

As temperaturas obtidas pelo tratamento 4 foram as maiores temperaturas obtidas no decorrer dos ciclos de prensagem.

A análise de transferência de calor para o tratamento 6 não foi realizada devido a inviabilidade do adesivo juntamente com a dificuldade de aplicação do adesivo nos painéis, a grande proporção de nanopartículas e aumento da viscosidade do adesivo.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de novos materiais, especialmente no segmento de materiais lignocelulósicos é uma inovação e tem apresentado estudos mais tecnológicos nas últimas duas décadas com destaque para o estudo dos nanomateriais adicionados aos compósitos naturais.

Com relação as nanopartículas conclui-se que o processo sol-gel proteico mostrou-se uma eficiente técnica para a obtenção de nanopartículas de óxido de zinco em escala laboratorial, resultando em processo simples e econômico quando se refere a produção de um nanomaterial com propriedades e características análogas às encontradas na literatura. Os resultados da análise estrutural obtidos através de difração de raios-X mostraram que as nanopartículas obtidas neste trabalho apresentaram fase única de ZnO, com boa cristalinidade e picos correspondentes aos existentes nas bases de dados e trabalhos da literatura.

Para o teste físico de densidade, a maioria dos tratamentos atenderam aos documentos normativos, com densidade que variaram de 689 até 779 kg/m³. A ABNT NBR 15316-2:2015 estabelece como valor máximo de densidade para os painéis MDF 800 kg/m³; os tratamentos que não atenderam ao documento nacional atenderam as especificações do documento internacional ANSI A2008.2-2002 com relação a densidade.

Quanto a densidade dos painéis pode-se concluir que a adição de 0,5% de nanopartículas foi mais eficiente para as duas resinas utilizadas. Sendo que adição de 1% foi prejudicial na transferência calor e interferiu reduzindo a densidade dos painéis. Da mesma forma, verificou-se que tal porcentagem interferiu de forma negativa no teor de unidade dos painéis para as duas resinas, MF e UF. Os melhores tratamentos foram os que utilizaram 0,5 de nanopartículas de ZnO, ou seja, tratamentos 2 e 5, semelhante ao desempenho observado para o teste de inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas. Neste teste somente o tratamento 5 atendeu às especificações normativas, e isto pode ser atribuído especialmente ao tipo de adesivo utilizado que foi a melamina-formaldeído, que já apresenta esse propriedade de melhor desempenho em contato com água.

Os testes de flexão estática para determinação do módulo de ruptura e módulo de elasticidade não atenderam às especificações normativas de documentos nacionais e internacionais. Ressalta-se que o processo de fabricação de painéis MDF em laboratório é muito diferente quando comparado ao processo industrial, especialmente, quanto aos equipamentos utilizados.

Sendo assim, destaca-se que a base de comparação para este estudo são os painéis sem adição de nanopartículas e painéis com adição de nanopartículas para dois tipos de adesivos comerciais e, assim, o desempenho deste aditivo nas diferentes propriedades físico-mecânicas avaliadas.

Entre os tratamentos utilizados, os resultados mais satisfatórios foram obtidos com a proporção de 0,5% de nanopartículas, menor quantidade, especialmente pelo possível aumento na condução do calor durante a prensagem, ocasionando uma cura mais acelerada durante o processo de prensagem, porém permitindo ainda condução de calor adequada até as regiões mais internas do colchão de fibras. Destaca-se ainda que a concentração de nanopartículas interferiu aumentando a viscosidade da resina, podendo o aumento na concentração da mesma inviabilizar o processo de fabricação, pela dificuldade de aplicação das nanopartículas

Quando comparou-se somente esta variável, ou seja, painéis com e sem nanopartículas verificou-se que o uso deste material indicou uma tendência de melhora nas propriedades gerais do painel quando utilizou-se 0,5% nanopartículas de ZnO. O melhor desempenho foi verificado para o uso da resina MF, que apresentou melhor interação com as nanopartículas de óxido de zinco para esta porcentagem.

Quanto ao efeito das nanopartículas durante o processo de prensagem pode-se observar que a partir da adição de 0,5% de ZnO, a temperatura durante os dois ciclos de degasagem se manteve mais constantes devido a uma tendência de comportamento refratário das nanopartículas de óxido de zinco, que são materiais semicondutores, independente da resina utilizada.

Observou-se que as nanopartículas de ZnO não apresentaram um aumento significativo na temperatura interna nas regiões centrais do colchão e, isto pode ser justificado pela cura acelerada nas camadas mais externas no colchão que podem ter dificultado a transferência de calor até o centro do colchão, devido a consolidação acelerada das bordas dos painéis.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação das nanopartículas separada da mistura do adesivo, para não dificultar a aplicação. As nanopartículas em forma de pó possuem baixa densidade, assim para se atingir pequenas quantidades necessita-se de grande volume de material, dificultando a aplicação de adesivo, que continua com a mesma quantidade. Uma

alternativa é a aplicação das nanopartículas nas fibras ou partículas de madeira antes da secagem do material, através da adição em água.

A realização de testes para avaliar o desempenho dos painéis tratados com adição de nanopartículas quanto ao ataque de agentes xilófagos, comparando a perda de massa de corpos de prova com e sem tratamento.

Um outro exemplo de possível aplicação para trabalhos futuros é a aplicação de nanopartículas metálicas, como nanopartículas de prata, que proporcionam superfícies e ambientes mais seguros, saudáveis, livre de bactérias e microorganismos. Empresas brasileiras já iniciaram estudos de aplicação para agregar proteção ao mobiliário – e outras superfícies de madeira.

Outra recomendação seria para o estudo da aplicação de nanopartículas em diferentes tipos de matérias primas fibrosas, como fibras naturais não lenhosas provenientes de palmeiras da região amazônica, adição de nanopartículas em painéis produzidos com fibras de coco e também fibras de bambu.

Outros testes que são sugeridos para a realização de trabalhos futuros são os testes de envelhecimento dos painéis, nesses testes os painéis são submetidos a condições extremas de temperatura e umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHANGAR, E. G.; FARD, M. H. A.; SHAHTAHMASSEBI, N.; KHOJASTEHPOUR, M.; MADDAHI, P. **Preparation and characterization of PVA/ZnO nanocomposite**. Journal of Food Processing and Preservation 39 (2015) 1442–1451.

ALVES, I. C. N.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; SILVA, H. D. **Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para a produção de celulose Kraft**. Ciência Florestal, v.2, n. 1, p. 167-174, 2011.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A2008.2-2002 Medium Density Fiberboard (MDF) For Interior Applications**. 2002.

ANOOP K. B., SUNDARARAJAN T.; DAS K. S. **Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in the Developing Region**. International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 52, pp. 2189-2195, 2009.

ANTONOVIC, A. A.; JAMBREKOVIC, V.; KLJAK, J.; SPANIC, N. **Properties os Particleboards produced by catalytic reaction of liquefied wood on urea-formaldehyde resins**. International symposium, Ambienta 2010.

ARANHA, I. B.; LUCAS, E. F. **Poli(Álcool Vinílico) Modificado com Cadeias Hidrocarbônicas: Avaliação do Balanço Hidrófilo/Lipófilo**. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 11, nº 4, p. 174-181, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.316-2 Painéis de fibras de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MACANICAMENTE. **O setor florestal**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/o-setor/>>. Acesso em: 20 de março de 2017.

BELGACEM, M. N.; PIZZI, A. **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment**. John Wiley & Sons. 2016. 704p.

CHIAPPINI, A.; ARMELLINI, C.; CHIASERA, A.; FERRARI, M.; GUIDER, R.; JESTIN, Y. **Preparation and characterization of ZnO particles embedded in organic-inorganic planar waveguide by sol-gel route**. Journal of Non-Crystalline Solids 355 (2009) 1132 – 1135.

COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. **Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto final acabado**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015.

CONNER, A. H.; LORENZ, L. F.; HIRTH, K. C. **Accelerated Cure of Phenol-Formaldehyde Resins: Studies With Model Compounds**. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 86,3256-3263 (2002).

ELEOTÉRIO, J. R. 2000. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 122 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba.

EL-WAHAB, H. Abd.; EL-FATTAH, M. Abd.; EL-KHALIK, N. Abd.; KAZLAUCIUNAS, A. **Synthesis and performance of new modified reactive flame-retardant alkyd resin based on tetrabromophthalic anhydride as varnish for surface coatings**. J. Coat. Technol. Res., 12 (1) 97–105, 2015.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. APA. **A Guide to engineered wood products**. 2010.

ESTEVES, A. C. C.; TIMMONS, A. B.; TRINDADE, T. **Nanocompósitos de matriz polimérica: estratégias de síntese de materiais híbridos**. Quim. Nova, Vol. 27, No. 5, 798-806, 2004.

FERREIRA, B. S.; SILVA, J. V.; CAMPOS, C. I. **Static Bending Strength of heat-treated and chromated copper arsenate-treated plywood**. BioResources 12 (3), 6276-6282. 2017.

FERREIRA, S.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ROSADO, A. M.; MONTEIRO, T. C. **Resistência mecânica de caules de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes topografias**. Cernes, Lavras, v.16, Suplemento, p. 133-140, jul.2010.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. C. **Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise**. Química Nova, Vol. 32, No. 7, 1860-1870, 2009.

GILLAH, P. R.; IRLE, M. A.; AMARTEY, S. A. **Development and production of laboratory scale novel MDF panels from composite and nonwoven mattresses of sisal and wood fibre mixtures**. Holz Roh – Werkstoff. v. 58, p. 324 – 330, 2000.

GAO, W.; CAO, J.; KAMDEN, D. P. **Effect and mechanism of nanosize copper oxide on some physical and mechanical properties of flakeboards**. *Maderas. Ciencia y tecnología* 13(2): 203-210, 2011.

GHORBANI, S.; RAZAVI, R. Sh.; LOGHMAN-ESTARKI, M. R.; ALHAJI, A. **Synthesis of MgO–Y₂O₃ composite nanopowder with a high specific surface area by the Pechini method**. *Ceramics International* 43 (2017) 345–354 b.

GOMES, J. W.; GODOI, G. S.; SOUZA, L. G. M. S.; SOUZA, L. G. V. M. **Water absorption and mechanical properties of polymer composites using waste MDF**. *Polímeros*, 27 (número especial), 48-55, 2017

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. **Qualidade da madeira**. In: BORÉM. A. *Biotecnologia florestal*. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. p. 25-54.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; LEITE, H. G. **Estratégia de análise da qualidade de madeira de *Eucalyptus* sp. para produção de celulose**. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.28, n.3, p.443-450, 2004.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; FEIJOO, G.; HEATHCOTE, C.; KANDELBAUER, A.; MOREIRA, M. T. **Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system**. S. González-García et al. / *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 445-453.

GRANUM, R.M.; EUSTIS, O. B. **Hardboard (Masonite) What is it? Panel Processing**. 1999.

GRIGSBY, W. J.; THUMM, A. **Resin and wax distribution and mobility during medium density fiberboard manufacture**. *Eur. J. Wood Prod.* (2012) 70:337–348a.

GRIGSBY, W. J.; THUMM, A. **The interactions between wax and UF resin in medium density fiberboard**. *Eur. J. Wood Prod.* (2012) 70:507–517b.

HORA, A. B.; VIDAL, A. C. F. BNDES – **Panorama de mercado: painéis de madeira**. 2014, 62p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBA. **Cenários Ibá é um boletim da Indústria Brasileira de Árvores**. Edição 31 - Dezembro 2016.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira Reconstituída**. 2005. 254p.

IWAKIRI, S.; OLANDOSKI, D. P.; LEONHARDT, G.; BRAND, M. A. **Produção de chapas de madeira compensada de cinco espécies de pinus tropicais**. Ciência Florestal, Santa Maria, v.11, n.2, p.71-77. 2001.

KAWASAKI, T.; KAWAI, S. **Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors**. J Wood Sci (2006) 52:75–83.

KUMAR, K.; VALARMATHI, T.N. **Experimental Investigation and Analysis on Thrust Force in Drilling of Wood Composite Medium Density Fiberboard Panels**. Experimental Techniques (2014) © 2014, Society for Experimental Mechanics; Exp Tech (2016) 40: 391–400. 2013

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Manual didático da disciplina de Química da Madeira**. UFPR – Setor de ciências agrárias, departamento de engenharia e tecnologia florestal. Curitiba, 2005.

LESSMANN, V. E. 2008. **Estudo da reação de cura de resinas uréia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear**. 121 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Química). Universidade Federal do Paraná. UFPR, Curitiba.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO P. F.; MORI, C. L. S. O. **Wood bonding *Eucalyptus* clones using three commercial adhesives**. Sci. For. Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 73-77, mar. 2008.

LIMA, N. N.; MENDES, L. M.; SÁ, V. A.; BUFALINO, L. **Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas**. Cerne, Lavras, v. 19, n. 3, p. 407-413, jul./set. 2013.

LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D.; LEE, S. M. **Modification of urea-formaldehyde resin adhesives with blocked isocyanates using sodium bisulfite**. International Journal of Adhesion & Adhesives 73 (2017) 118–124.

MAIA, A. O. G. 2005. **Sinterização de nanopartículas de NiO por gelatina comestível**. 121 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Física) – Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza.

MANTANIS, G. I.; PAPADOPOULOS. **Reducing the thickness swelling of wood based panels by applying a nanotechnology compound**. Eur. J. Wood Prod. (2010) 68: 237–239.

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

MARTINS, S. A.; DEL MENEZZI, C. H. S.; FERRAZ, J. M.; SOUZA, M. R. **Bonding behavior of Eucalyptus benthamii wood to manufacture edge glued panels**. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(1): 79-92, 2013.

MATOS, J.L.M.; KEINERT Jr., S. **Estudo do ciclo da prensa para produção de painéis waferboard**. *Revista Floresta*. 72-78. 2006.

MEDEIROS, A. M. L. 2007. **Síntese e caracterização de nanopartículas de Cr₂O₃ através do método sol-gel proteico**. 84 f. Dissertação. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza.

MESQUITA, R. G. A.; MARCONCINIC, J. M.; SANADIB, A. R.; CÉSARA, A. A. S.; TONOLIA, G. H. D.; VENAS, T. M.; MENDES, L. M. **Coir and Sisal Fibers as Fillers in the Production of Eucalyptus Medium Density Particleboards – MDP**. *Materials Research*. 2016; 19(6): 1429-1436.

MORAIS, P. C.; LIMA, E. C. O. **Nanotecnologia – Introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 208p.

MORABITO, R.; BELLUZZO, L. **Optimising the cutting of wood fibre plates in the hardboard industry**. *European Journal of Operational Research* 183 (2007) 1405–1420.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; OLIVEIRA, E. B. **Relatório Embrapa – Plantações Florestais: Geração de benefícios com baixo impacto ambiental. Capítulo I – Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais**. 2016, 100p.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Sistema de aquisição de dados**. Disponível em: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em: 15 de maio de 2017.

NGUYEN, C.T., Roy, G., Gauthier, C., Galanis, N. **Heat transfer enhancement using Al₂O₃–water nanofluid for an electronic liquid cooling system**, *Applied Thermal Engineering* 27, pp. 1501-1506, 2007.

OGHAZ, M. H.; RAZAVI, R. S.; ESTARKI, M. L. **Large-scale synthesis of YSZ nanopowder by Pechini method.** *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 37, No. 5, August 2014, pp. 969–973.

PAINEL CLT. Site da empresa CROSSLAM. Disponível em: <<http://www.crosslam.com.br/home/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.

PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis lvl de *Eucalyptus grandis*.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 559-566, jul.-set., 2011.

PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C.; LUZ, L. M.; ALVARENGA, T. H. P.; BITTENCOURT, J. V. M. **Environmental profile analysis of MDF panels production: study in a brazilian technological condition.** *Revista Cerne* v. 20 n. 3, p. 409-418 (2014).

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesive Technology.** New York. 2003. 1024p.

PIZZI, A. **Advanced Wood Adhesives Technology.** New York: M.Dekker, 1994. 289p.

R- Core Team (2015). **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Revista da Madeira – REMADE. **Fatores que influenciam no processo de prensagem dos painéis MDF.** EDIÇÃO N°71 - MAIO DE 2003.

RIVELA, B.; MOREIRA, M.; FEIJOO, G. Life cycle inventory of medium density fibreboard. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 12, n. 3, p.143-150, 2007.

ROFFAEL, E.; SCHNEIDER, T.; DIX, B.; BUCHHOLZ, T. **Zur Hydrophobierung von mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen Teil 1: Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Paraffins und des Emulgatortyps auf die Hydrophobierung von MDF.** *Holz als Roh- und Werkstoff* (2005) 63: 192–203.

ROMEIRO, F. D.; LEMOS, S. C. S.; LONGO, E.; LIMA, R. C. Síntese hidrotermal de óxido de zinco. 50° CBQ – Congresso Brasileiro de Química. Out. 2010.

ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.** Boca Raton : CRC Press, 2013. 687p.

SILVA, D. A. L. L.; LAHR, A. R.; GARCIA, R. P.; FREIRE, F. M. C. S.; OMETTO, A. R. **Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil**. Int J Life Cycle Assess (2013) 18:1404–1411.

SABDIN, S. B., 2010. **Use of nanoparticle in the wood composite to enhance the heat transfer**. 25 f. A thesis submitted in fulfilment for the award of the Degree of Bachelor in Chemical Engineering. Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering, Universiti Malaysia Pahang.

TAGHIYARI, H. R. **Effects of nano-silver and nano-zinc on mechanical strength of heat, vapor, and dry-ice-treated biscuit and dovetail medium-density fiberboard miter joints**. Materials and Design 51 (2013) 695–700.

TAGHIYARI, H. R.; MORADIYAN, A. **Effect of metal nanoparticles on hardness in particleboard**. Int. J. Nano Dimens. 5(4): 379-386, 2014.

TANGERINO, C. M. B. 2010. **Síntese e aplicação de partículas de vidro alumino-borosilicato em resinas fotocuráveis**. 120 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado). Departamento de Materiais para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

THOMPSON, M. **The characterization of nanoparticles**. AMC Technical Briefs. December, 2010.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. **Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados**. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 405-413, abr.-jun., 2015.

WEICHELDT, F.; EMMER, R.; FLYUNT, R.; BEYER, E.; BUCHMEISER, M. R.; BEYER, M. **ZnO-Based UV Nanocomposites for Wood Coatings in Outdoor Applications**. Macromol. Mater. Eng. 2010, 295, 130–136.

WORLD PANEL INDUSTRY. Products: **MDF**. Disponível em: <<http://www.worldpanelindustry.com/mdf.html>>. Acesso em: 09 mar 2017.

ZARBIN, A. J. G. **Química de (nano)materiais**. Química Nova, Vol. 30, No. 6, 1469-1479, 2007.

ZHANG, H.; FU, X.; NIU, S.; SUN, G.; XIN, Q. **Synthesis and characterization of ZrO₂: Nanopowder by EDTA complexing sol-gel method**. Materials Chemistry and Physics 91 (2005) 361–364.

ZHAO, L.; LIU Y.; XU, Z.; ZHANG, Y.; ZHAO, F.; ZHANG, S. **State of research and trends in development of wood adhesives.** Forestry Studies in China, Vol.13, N° 4, 2011.