

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA – EE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS COM FIBRAS DE MADEIRA
DE EUCALIPTO REFORÇADOS COM NANOCELULOSE**

Rio Grande

2017

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS COM FIBRAS DE MADEIRA
DE EUCALIPTO REFORÇADOS COM NANOCELULOSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Henara Lillian Costa Murray

Coorientadora: Prof^a. Dra. Érika da Silva Ferreira

Rio Grande

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através da Biblioteca
Universitária da FURG.

MORAIS JUNIOR, Rui Rosa de
Características tecnológicas de painéis com fibras de madeira de eucalipto reforçados
com nanocelulose
92p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia,
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
"Orientação: Henara Lillian Costa Murray".

1. Engenharia Mecânica. 2. Características tecnológicas. 3. Painéis de
madeira. 4. Nanocelulose.

RUI ROSA DE MORAIS JÚNIOR

**CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS COM FIBRAS DE MADEIRA
DE EUCALIPTO REFORÇADOS COM NANOCELULOSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Dissertação defendida e aprovada em: 21 de dezembro de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Henara Lillian Costa Murray
Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl
Avaliador interno
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Avaliador externo 1
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Darci Alberto Gatto
Avaliador externo 2
Universidade Federal de Pelotas

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades propiciadas durante toda a minha vida;

À Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por proporcionar a realização do curso de mestrado em Engenharia Mecânica próximo à cidade onde eu nasci;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPMec), pela paciência, esforço, conselhos e dedicação tanto nos assuntos de cunho profissional como pessoal;

À Prof. Dra. Henara Lillian Costa, que me orientou e auxiliou durante todo o tempo, redimindo dúvidas e indicando o melhor caminho a seguir;

Aos professores Me. Gabriel Valim Cardoso e Dra. Érika da Silva Ferreira da Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), pelo auxílio nos experimentos e por disponibilizarem laboratórios e equipamentos para este trabalho;

Aos técnicos da FURG (Bruno, Caroline, Cristiano, Daniel, Helen, Rafael e Rudmar), da UFPeL (Cintia) e da UNIPAMPA (Mozer) por me auxiliarem nas atividades práticas deste trabalho;

Aos alunos de graduação da FURG (Israel), da UFPeL (Lucas), da Unipampa (Guilherme e Fernando) por me auxiliarem em atividades deste trabalho;

Aos meus pais, Rui Rosa de Moraes Filho e Maria Christina Gonçalves Silveira de Moraes pelo incentivo e confiança que em mim depositaram;

À minha irmã Iális Silveira de Moraes e ao meu cunhado Igor Duarte Luiz pelo apoio e moradia na cidade de Rio Grande/RS;

Aos meus amigos e colegas de PPMec que durante todo o trajeto me apoiaram, fazendo grande diferença no aprendizado.

“Nós somos feitos da matéria de que são
feitos os sonhos”.

William Shakespeare

RESUMO

A madeira é um material compósito de origem natural, composta principalmente por três cadeias poliméricas distintas: celulose, hemicelulose e lignina. Celulose, a base estrutural das células vegetais é muito abundante e possui um vasto uso tecnológico. Nanocristais de celulose (NCC) ou nanocelulose são os domínios cristalinos das fontes celulósicas e vêm sendo aplicados como reforço em matrizes poliméricas. NCC são consideradas partículas promissoras no preparo de nanocompósitos, devido a sua alta rigidez, resistência mecânica e baixa densidade quando comparadas com outros materiais de reforço comumente usados. Reforços com NCC são, particularmente, relevantes no desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de painéis de madeira estruturais. Entre os painéis, os fabricados com fibras de média densidade (MDF) apresentam uma boa combinação de acabamento superficial, usinabilidade e resistência mecânica. Na tentativa de melhorar a qualidade dos painéis MDF, esse trabalho tem como objetivo avaliar as características tecnológicas de painéis MDF reforçados com nanocelulose em diferentes concentrações (0%, 2%, 4% e 6%), em relação ao peso seco da resina ureia formaldeído (UF). Para esse fim, foram realizados ensaios de tração perpendicular, flexão estática e dureza Shore D para a análise das propriedades mecânicas. Para as características superficiais foram realizadas medidas da topografia da superfície e da taxa de desgaste abrasivo. Os resultados mostraram que a incorporação de nanocelulose em baixas quantidades afetou negativamente a adesão da resina UF nas fibras, reduzindo a continuidade da matriz UF e, conseqüentemente, comprometendo as propriedades mecânicas. No entanto, não foram observadas diferenças significativas nas características superficiais, embora na análise da microestrutura das amostras desgastadas, observou-se desgaste mais severo nas regiões onde a matriz UF estava descontínua. Entretanto, algumas propriedades como o módulo de ruptura e dureza apresentaram uma tendência de crescimento com a incorporação de quantidades maiores de nanocelulose.

Palavras-chave: Painéis de madeira, nanocelulose, características tecnológicas.

ABSTRACT

Wood is a composite material of natural origin composed mainly of three distinct polymeric chains: cellulose, hemicellulose and lignin. Cellulose, the structural basis of all plant cells, is very abundant and possesses vast technological use. Cellulose nanocrystals (CNC) or nanocellulose are the crystalline domains of the cellulosic sources and have been used as reinforcement in polymeric matrices. CNC have a promising potential in the preparation of nanocomposites due to its high stiffness, mechanical strength and low density when compared to other more traditional filling materials. Reinforcement with CNC is particularly relevant in the development of new technologies for the production of wood structural panels. Among those, medium density fiberboard (MDF) show a good combination of surface finish, machinability and mechanical strength. As an attempt to improve the quality of MDF panels, this work aims to evaluate the technological characteristics of MDF panels reinforced with nanocellulose at different concentrations (0%, 2%, 4% and 6%), in relation to the dry weight of urea resin formaldehyde (UF). For this purpose, tests of tensile perpendicular, static bending and Shore D hardness were performed to analyze mechanical properties. Surface characteristics measurements involved surface topography and abrasive wear rate. The results showed that the incorporation of nanocellulose at low quantities affected negatively the adhesion of the UF resin in the fibers reducing the continuity of the UF matrix and, consequently, compromising mechanical properties. However, no significant differences were observed for the surface characteristics, although in the analysis of the worn samples, more severe wear was observed in the regions where the UF matrix was discontinuous. Despite this, some properties such as the modulus of rupture and hardness showed a tendency to improve with the incorporation of larger amounts of nanocellulose.

Keywords: Wood panels, nanocellulose, technological characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular das cadeias de celulose.	21
Figura 2 - Mecanismo de reação por hidrólise.....	23
Figura 3 - Mecanismo de esterificação por hidrólise ácida	23
Figura 4 - Classificação dos painéis de madeira	30
Figura 5 - Princípio de funcionamento medidor de atrito madeira - madeira ..	37
Figura 6 - Coeficientes de atrito de MDF-MDF com <i>Ra</i> variável.....	38
Figura 7 - Etapas da metodologia.....	40
Figura 8 - Moagem dos cavacos de Eucalipto	41
Figura 9 - Refinador mecânico.....	41
Figura 10 - Classificação e peneiramento das fibras	42
Figura 11 - Celulose moída.....	43
Figura 12 - Decantação da nanocelulose	43
Figura 13 - Centrifugação da nanocelulose	44
Figura 14 - Aparato utilizado para determinação do TFG a quente	46
Figura 15 - Mistura dos componentes.....	50
Figura 16 - Formação do colchão de fibras e prensagem.....	51
Figura 17 - Dimensões e distribuição dos corpos de provas por painéis.....	51
Figura 18 - Marcação e corte dos CPs	52
Figura 19 - Ensaio de tração perpendicular	53
Figura 20 - Ensaio de flexão estática.....	53
Figura 21 - Análise da rugosidade	54
Figura 22 - Corte dos CPs para ensaio de abrasão.....	55
Figura 23 - Equipamento pino-tambor para ensaio de desgaste abrasivo.....	56
Figura 24 - Imagens de MET	57
Figura 25 - Gráfico dos resultados do ensaio de tração perpendicular.....	60

Figura 26 - Gráfico dos resultados do módulo de elasticidade	61
Figura 27 - Gráfico dos resultados do módulo de ruptura.....	62
Figura 28 - Gráfico dos resultados da dureza.....	63
Figura 29 - Gráfico dos resultados das rugosidades Ra e Rq	64
Figura 30 - Gráfico dos resultados da rugosidade Rsm	64
Figura 31 - Gráfico dos resultados da rugosidade Rsk	65
Figura 32 - Gráfico dos resultados da taxa de desgaste.....	65
Figura 33 - MEV de amostras antes do ensaio de abrasão	66
Figura 34 - MEV de amostras depois do ensaio de abrasão	67
Figura 35 - MEV de amostras desgastadas com maior aumento	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reforços celulósicos e algumas propriedades.....	33
Tabela 2 - Propriedades mecânicas mais avaliadas em painéis MDF.....	35
Tabela 3 - Principais requisitos de acordo com a ABNT NBR 15316	36
Tabela 4 - Parâmetros para cálculo de painéis MDF	44
Tabela 5 - Composição dos painéis.....	46
Tabela 6 - Percentuais da nanocelulose como aditivo.....	47
Tabela 7 - Dimensões e densidade dos painéis	47
Tabela 8 - Painéis fabricados	51
Tabela 9 - pH com o número de centrifugações	58
Tabela 10 - Resultados dos componentes de fabricação	58
Tabela 11 - Quantidades de componentes por painel	58
Tabela 12 - Densidade média dos corpos de prova	59
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração perpendicular	60
Tabela 14 - Resultados do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura ..	60
Tabela 15 - Resultados da dureza Shore D.....	62
Tabela 16 - Resultados dos parâmetros de rugosidade	63
Tabela 17 - Resultados da taxa de desgaste.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Quantidade de aditivo base seca
ABU	Quantidade de aditivo base úmida
AI	Adesão interna
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBS	Quantidade de catalisador base seca
CBU	Quantidade de catalisador base úmida
CH	Correção da umidade
CP	Corpo de prova
DRX	Difração de raio X
EN	<i>European Norm</i>
FBS	Quantidade de fibras base seca
FBU	Quantidade de fibras base úmida
FE	Corpo de prova para flexão estática
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
HCF	Quantidade de água no colchão de fibras
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MFA	Microscopia de força atômica
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura

MP	Massa específica dos painéis
NBR	Norma brasileira
NCC	Nanocristais de celulose
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PE	Perdas estimadas
QAR	Quantidade de aditivo na resina
QC	Quantidade de catalizador por painel
QF	Quantidade de fibras de madeira
QH	Quantidade de água por painel
QIH	Quantidade de ideal de água
QR	Quantidade de resina por painel
Ra	Rugosidade média
RBS	Quantidade de resina base seca
RBU	Quantidade resina base úmida
Rq	Rugosidade quadrática média
Rsk	Coefficiente de assimetria <i>skewness</i> do perfil
Rsm	Largura média do espaçamento dos elementos de perfil
SE	Elétrons secundários
SUP	Corpo de prova para ensaio de superfície
TFG	Tempo de formação de gel
TP	Corpo de prova para tração perpendicular
TS	Teor de sólidos
TUF	Teor de umidade das fibras
UF	Ureia-formaldeído

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 Objetivo.....	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
3.1 CELULOSE: UM POLÍMERO NATURAL ABUNDANTE	20
3.1.1 A madeira e a celulose	20
3.1.2 Isolamento de nanocristais de celulose	21
3.1.3 Caracterização morfológica dos NCC	24
3.1.4 NCC como reforço em nanocompósitos.....	27
3.2 A INDUSTRIA DOS PAINÉIS DE MADEIRA.....	30
3.2.1 O processo de fabricação de painéis MDF.....	30
3.2.2 Os painéis MDF como nanocompósitos	32
3.2.3 Propriedades mecânicas de painéis MDF	34
3.2.4 Características superficiais de painéis MDF.....	36
4 METODOLOGIA.....	40
4.1 Preparação das fibras de eucalipto	41
4.2 Preparação da nanocelulose.....	42
4.3 Análise dos componentes de fabricação	44
4.3.1 Análise de nanocristais de celulose por MET	45
4.3.2 Determinação do teor de sólidos (TS)	45
4.3.3 Determinação do teor de umidade das fibras (TUF).....	45
4.3.4 Determinação do tempo de formação de gel (TFG)	46
4.4 Fabricação dos painéis MDF	46
4.4.1 Cálculo e preparação das formulações	46
4.4.2 Pesagem e mistura.....	50
4.4.3 Formação do colchão de fibras e prensagem	50
4.4.4 Climatização dos painéis e corte dos CPs	51

4.5	Ensaio mecânico e de superfície	52
4.5.1	Ensaio mecânico	52
4.5.2	Ensaio superficial	54
4.5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	56
4.6	Análise estatística	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	Imagens de microscopia eletrônica de transmissão e pH	57
5.2	Componentes de fabricação	58
5.3	Cálculo das quantidades	58
5.4	Densidade dos corpos de prova	59
5.5	Propriedades mecânicas	59
5.5.1	Resistência a tração perpendicular	59
5.5.2	Flexão estática	60
5.5.3	Dureza Shore D	62
5.6	Características superficiais	63
5.6.1	Rugosidade	63
5.6.2	Desgaste abrasivo	65
5.6.3	Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	66
6	CONCLUSÕES	70
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – ANOVA DA TRAÇÃO PERPENDICULAR	84
	APÊNDICE B – ANOVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	85
	APÊNDICE C – ANOVA DO MÓDULO DE RUPTURA	86
	APÊNDICE D – ANOVA DA DUREZA SHORE D	87
	APÊNDICE E – ANOVA DA RUGOSIDADE (RA)	88
	APÊNDICE F – ANOVA DA RUGOSIDADE (RQ)	89
	APÊNDICE G – ANOVA DA RUGOSIDADE (RSM)	90
	APÊNDICE H – ANOVA DA RUGOSIDADE (RSK)	91
	APÊNDICE I – ANOVA DA TAXA DE DESGASTE ABRASIVO	92

1 INTRODUÇÃO

As características de rápido crescimento e a boa adaptação às condições edafoclimáticas tornaram as florestas plantadas com diversas espécies de árvores de Eucalipto as mais utilizadas em programas de reflorestamento no Brasil (TUFFI SANTOS et al., 2005). O Eucalipto tem uma posição destacada frente a outras espécies de árvores nativas do Brasil, devido às suas características mecânicas, pelo tempo curto de cultivo e grande abundância (FERREIRA, JOAO, GODOY, 2008). No Rio Grande do Sul houve um crescimento de 184 mil para 427 mil hectares de área plantada de Eucalipto entre os anos de 2006 a 2016, o que corresponde, atualmente, a 55% das espécies de árvores plantadas (AGEFLOR, 2017). Com ampla disponibilidade de matéria-prima, o Rio Grande do Sul é considerado um polo importante de produção e exportação de madeira, móveis e celulose do Brasil (TEIXEIRA, 2016).

Contudo, com o encarecimento da madeira maciça de grandes dimensões, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias de fabricação de produtos com madeira processada (CHIROMITO et al., 2016). Dentre esses produtos, estão os painéis de fibras de madeira de média densidade, que apresentam boas condições de usinabilidade e acabamento superficial. Também são conhecidos no Brasil pela sigla em inglês MDF (*Medium Density Fiberboard*) e podem ser definidos como produtos compostos de fibras de madeira, obtidos a partir da redução de madeira sólida, e reconstituídos por meio de ligação adesiva (IWAKIRI, 2005). Os painéis MDF são muito utilizados pela indústria moveleira e da construção civil para a fabricação de produtos como tampos de mesa, rack, estantes, pisos, rodapés, batentes, pés de mesas, entre outras aplicações (ROSA et al., 2007).

A resina sintética mais utilizada em painéis MDF é a ureia-formaldeído (UF), por ser o adesivo reativo mais barato disponível no mercado. A resina UF polimeriza por meio da ação do calor e da presença de catalisadores específicos. É aplicada na forma líquida e, após o processo de cura, forma uma matriz polimérica que envolve as fibras de madeira.

Atualmente, materiais nanoestruturados oriundos da madeira vêm sendo estudados como reforço de matrizes poliméricas (MIAO, HAMAD, 2013). Nanocristais de celulose (NCC) ou nanocelulose são os domínios cristalinos das fontes celulósicas e podem ser obtidos da madeira de Eucalipto, que representa cerca de 80% da

matéria prima utilizada na produção brasileira de celulose (FERESIN, 2016). De acordo com Rosa (2012), os nanocristais de celulose se identificam como elementos que são excelentes para o reforço em compósitos poliméricos, por apresentarem, quando isolados, um alto nível de resistência e rigidez por unidade de massa. A existência no Rio Grande do Sul de uma infraestrutura consolidada para colheita, processamento e manuseio da celulose contribui para a utilização da nanocelulose. Além disso, o Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo e as projeções indicam que as exportações vão crescer em função da celulose de fibra curta, na qual o país é o líder mundial na produção baseada no eucalipto (SPEROTTO, 2014; MAPA, 2015; IBÁ, 2017).

Com base no potencial do Eucalipto como matéria prima e da nanocelulose como reforço em materiais compósitos, indagou-se sobre a possibilidade do uso da nanocelulose em painéis MDF. Embora ainda não serem encontrados na literatura trabalhos que utilizam reforços celulósicos em painéis MDF, existem diversos estudos que relatam melhora nas propriedades físicas e mecânicas em matrizes poliméricas reforçadas com nanocelulose (SOUZA, 2010; MIAO, HAMAD, 2013, CARDOSO et al. 2016).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse estudo é avaliar o efeito da nanocelulose sobre as características tecnológicas de painéis de madeira reconstituída produzidos com fibras de madeira de Eucalipto.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir nanocelulose por meio de processo químico de hidrólise ácida;
- Produzir painéis MDF com fibras de madeira de Eucalipto, empregando a nanocelulose ácida como aditivo da resina UF em diferentes proporções;
- Avaliar o efeito da nanocelulose em algumas características tecnológicas (propriedades mecânicas e características superficiais) dos painéis produzidos;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CELULOSE: UM POLÍMERO NATURAL ABUNDANTE

3.1.1 A madeira e a celulose

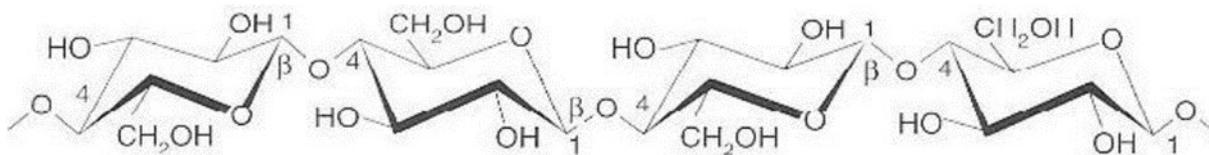
A madeira é um conjunto de polímeros de origem natural resultante do processo de fotossíntese, composta principalmente por três cadeias poliméricas distintas: celulose, hemicelulose e lignina (FIGUEROA, 2008). Esses polímeros formam a parede celular da madeira, sendo responsáveis pela maioria das suas propriedades físicas, mecânicas e químicas (MARTINS, ARAÚJO, 2005). É um produto de um sistema biológico complexo, sendo definido como um material poroso e heterogêneo (KLOCK et al., 2005).

Em relação aos polímeros da madeira, o considerado mais importante é a celulose. Corresponde a cerca de 40% a 45% da massa da madeira (SJÖSTRÖM, 1981), estabelecido em cadeias poliméricas lineares, com massa molecular elevada (MARTINS, ARAÚJO, 2005). De uma forma simplificada, pode-se afirmar que a celulose forma um esqueleto imerso numa matriz de hemicelulose e lignina, onde como material aglutinante, tem-se a lignina (BALLONI, 2009). A celulose é o constituinte majoritário dos materiais lignocelulósicos e a base estrutural das células vegetais. Portanto, é a substância natural mais importante, tanto pela sua abundância quanto pelo seu aproveitamento tecnológico (COELHO, 2006).

O processo de extração do material celulósico é feito usualmente por extração de ceras, branqueamento e tratamento alcalino, com a obtenção da fibra purificada (TAIPINA, 2012). Pelo grau de cristalinidade do material celulósico, com a retirada do material não celulósico obtém-se um material com maior resistência a tração (ALEMDAR, SAIN, 2008).

A celulose é constituída por unidades de glicose ($C_6H_{12}O_6$), ligadas entre os carbonos da posição 1 de uma das unidades e da posição 4 da outra unidade formando ligações $\beta(1-4)$ (SJÖSTRÖM, 1981). O dímero formado, denominado celobiose, é a unidade repetitiva da celulose. É importante salientar que o grau de polimerização é calculado em relação ao número de unidades de glicose presentes no polímero, que fornece o tamanho da cadeia polimérica (KONTTURI, TAMMELIN, OSTERBERG, 2006). A Figura 1 apresenta ligações glicosídicas formando uma cadeia de celulose.

Figura 1 - Estrutura molecular das cadeias de celulose.



Fonte: Silva (2010) adaptado de Sjöström e Westermarck (1999).

Na superfície das cadeias de celulose, por cada unidade de glicose existem três grupos hidroxílicos (grupos OH) que funcionam como locais de ligação, por meio de pontes de hidrogênio, entre moléculas de glicose dentro de cada cadeia de celulose (ligações intramoleculares) e entre cadeias de celulose (ligações intermoleculares), resultando em uma associação lateral forte entre moléculas de celulose (SILVA, 2010).

A partir dessas interações, sucessivas estruturas são formadas, dando origem à parede celular da fibra de celulose: micelas (agrupamento das cadeias em feixes); microfibrilas (agregados de micelas); e fibrilas ou macrofibrilas (agregados de microfibrilas) (SILVA, D'ALMEIDA, 2009). As microfibrilas contêm sequências alternadas de zonas cristalinas, altamente ordenadas e zonas amorfas, desordenadas (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005; HABIBI et al., 2007).

A estrutura organizada deve-se à ação combinada da biopolimerização e da cristalização da celulose comandadas por processos enzimáticos, resultado das ligações de hidrogênio intermoleculares (SILVA, D'ALMEIDA, 2009). As regiões amorfas são resultado do menor número de ligações e da maior acessibilidade aos grupos hidroxilas, sendo mais fáceis de dissolver e mais reativas. Essas são denominadas, por alguns autores, de regiões em que a cristalização ocorreu com defeito (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005; HABIBI et al., 2007).

3.1.2 Isolamento de nanocristais de celulose

Dentre os materiais que provêm da celulose, existem alguns que podem ser isolados, como a celulose microcristalina, a celulose nanofibrilada e os nanocristais de celulose (TAIPINA, 2012). Os nanocristais de celulose (NCC) ou nanocelulose são os domínios cristalinos de fontes celulósicas, com dimensões na ordem dos nanômetros (SOUZA, QUADRI, 2014).

Quando isoladas, estas nanopartículas apresentam alta rigidez, resistência mecânica e baixa densidade se comparados com outras cargas mais comumente usadas em matrizes poliméricas, sendo consideradas nanopartículas promissoras no preparo de nanocompósitos pelo seu potencial em melhorar as propriedades mecânicas, ópticas, dielétricas, dentre outras, dessas matrizes (STURCOVA, DAVIES, EICHHORN, 2005; SIQUEIRA, MATHEW, OKSMAN, 2011; SILVA, D'ALMEIDA, 2009).

O principal método da obtenção dos NCC é por meio de processos químicos, pela aplicação de ácidos fortes, onde as áreas amorfas (não cristalinas) da celulose acabam se tornando solúveis (TAIPINA, 2012). Logo, são obtidos NCC com dimensões variadas, geralmente com 100 a 400 nm de comprimento, e seu diâmetro inferior a 10 nm (ALEMDAR, SAIN, 2008).

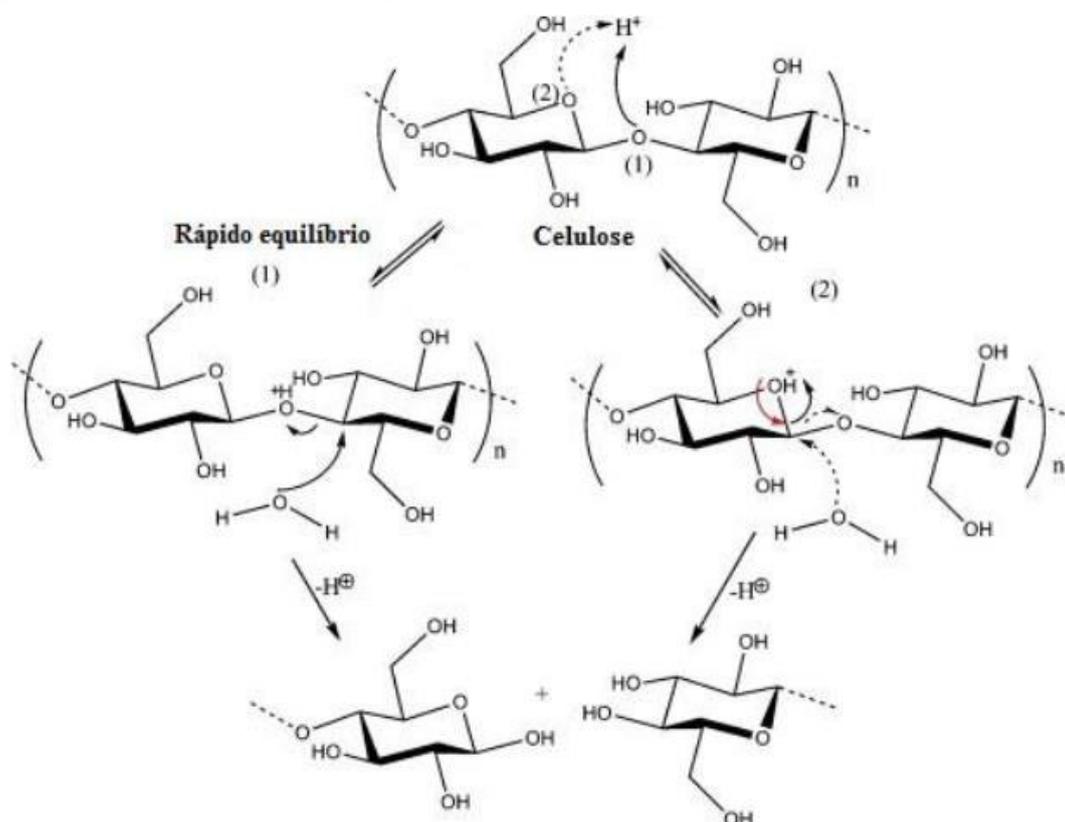
O isolamento dos NCC a partir das fontes celulósicas tem início no pré-tratamento da matéria-prima, passando pela hidrólise ácida e, por conseguinte, a filtração dos NCC obtidos (SILVA, D'ALMEIDA, 2009). A hidrólise ácida é usualmente empregada para isolar os domínios cristalinos de celulose. As regiões amorfas da celulose não exibem orientação preferencial, facilitando a reação da hidrólise nestas regiões devido ao maior alcance do ácido (KVIEN, TANEM, OKSMAN, 2005; DURÁN et al., 2011).

As características morfológicas dos nanocristais de celulose são dependentes de fatores como o ácido utilizado, a concentração do ácido, o tempo de hidrólise, a temperatura, o rendimento e a fonte da celulose (KAUSHIK et al., 2015). Ainda, a literatura aponta que diferentes condições de tratamento alcalino prévio à hidrólise ácida não afetam o tamanho dos nanocristais de celulose isolados (FAHMA et al., 2011).

O ácido mais utilizado para isolamento de NCC é o ácido sulfúrico (H_2SO_4) com diferentes concentrações em água (H_2O). A hidrólise ácida por ácido sulfúrico na celulose ocorre por dois mecanismos de reação: hidrólise (Figura 2) e esterificação por hidrólise ácida (Figura 3). A etapa de hidrólise ocorre quando átomos de água quebram as ligações entre os átomos de oxigênio que ligam os monômeros de celulose ($C_6H_{12}O_6$). Concomitantemente na etapa de hidrólise ácida, ocorre a esterificação da superfície da nanocelulose por substituição dos grupos $-OH$ pelo grupo HSO_3^- , criando uma repulsão eletrostática causada pelos outros elétrons de

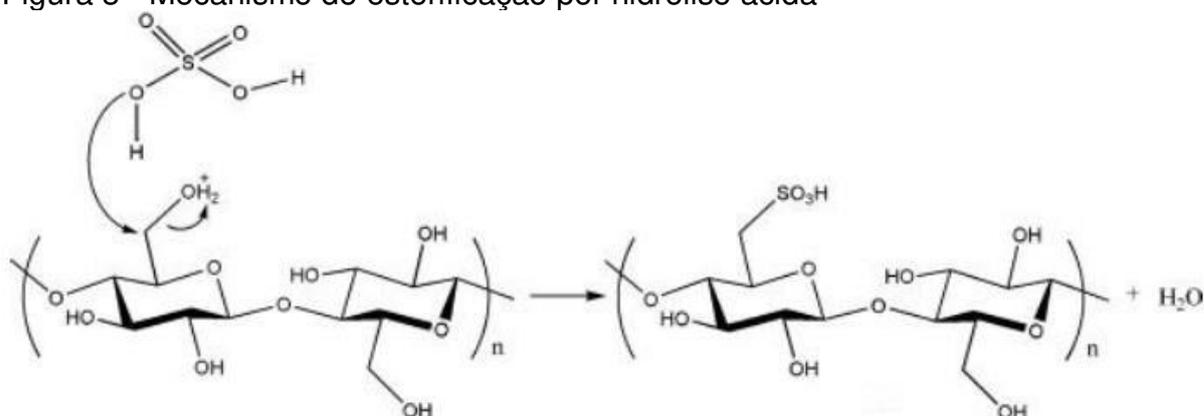
valência (DUFRESNE, 2010; NG et al., 2015; PEREIRA, 2013; HUANG et al., 2012). A repulsão eletrostática das cargas de sulfato na superfície dos NCC ajuda a estabilizar a suspensão (FAHMA et al., 2011; GARDNER et al., 2008).

Figura 2 - Mecanismo de reação por hidrólise



Fonte: Adaptado de Lu e Hsieh (2010) apud Pereira (2013).

Figura 3 - Mecanismo de esterificação por hidrólise ácida



Fonte: Adaptado de Lu e Hsieh (2010) apud Pereira (2013).

As condições de hidrólise (tempo de reação, temperatura e concentração de ácido) variam conforme a fonte de celulose, e vêm sendo muito estudadas recentemente. Merlini (2016) avaliou as condições de hidrólise ácida com ácido

sulfúrico para a obtenção de NCC isolados a partir de fibras de celulose *kraft*¹ da espécie de árvore *Pinus taeda*, mantida a razão ácido/celulose de 25 mL/g. As melhores condições para obtenção de NCC de Pinus foram observadas com 30 min de reação, tanto para as condições de 66% (massa/massa) de H₂SO₄ e temperatura de 45 °C, bem como de 71% H₂SO₄ e temperatura de 35 °C (MERLINI, 2016). Favero (2014) fez hidrólise ácida a partir da polpa *kraft* da espécie Eucalipto com 64% de H₂SO₄ 8,75mL por grama de polpa. As micrografias feitas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) evidenciaram que estruturas nanométricas foram obtidas pelo método testado (FAVERO, 2014).

Os cristais de nanocelulose formam uma pasta espessa, que pode ser aplicada a superfícies, na forma de um laminado, ou transformado em filamentos, formando as chamadas nanofibrilas. As nanofibrilas são duras, densas e rígidas, e podem ser prensadas em diferentes formas e tamanhos. Quando liofilizado, o material é leve, absorvente e bom isolante térmico e acústico (FERGUSON, 2012).

Além disso, NCC são materiais relativamente baratos, renováveis, biodegradáveis, não tóxicos e intrinsecamente seguros (KOVACS et al., 2010). De acordo com (KAUSHIK et al., 2015), os materiais à base de nanocelulose constituem definitivamente vetores promissores para "transformar a madeira em ouro" e revitalizar a indústria florestal. Esses fatores combinados levaram à abertura da primeira unidade comercial pela CelluForce Inc. (Windsor, Québec, Canadá), produzindo 1 tonelada de NCC por dia (CELLUFORCE, 2017).

3.1.3 Caracterização morfológica dos NCC

Os NCC são nanopartículas rígidas com forma geralmente acicular (agulha) e altamente cristalinas, obtidas usualmente como suspensões aquosas coloidais (KAUSHIK et al., 2015). O processo de produção junto à fonte celulósica induz a variabilidade do tamanho dos NCC, sendo que as propriedades reológicas da suspensão e o estado de individualização das partículas são fortemente afetados por parâmetros como concentração de nanopartículas, pH, força iônica, temperatura ou a presença de impurezas (SHAFIEI-SABET, HAMAD, HATZIKIRIAKOS, 2014).

¹Celulose obtida a partir da dissolução da lignina e a liberação das fibras pela combinação de reagentes químicos. As fibras liberadas constituem a "celulose" marrom ou massa marrom (STEIN, 2010).

O conhecimento da morfologia dos NCC desempenha um papel muito importante no desenvolvimento de numerosas aplicações, onde estas características afetam diretamente a sua utilização em matrizes poliméricas (KAUSHIK et al., 2015). As dimensões de comprimento e diâmetro dos NCC são de grande importância, uma vez que determinam a razão de aspecto (*comprimento/diâmetro*). Uma elevada razão de aspecto indica maior potencial de resistência do bionanocompósito (FARUK et al., 2012). NCC apresentam uma razão de aspecto que pode variar de 1 a 100, sendo que para valores próximos de 100, considera-se uma alta razão de aspecto (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005).

A análise por difração de raios X (DRX) não resulta em padrões morfológicos da estrutura, porém é a técnica mais utilizada para obtenção do índice de cristalinidade dos NCC (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005; HABIBI, DUFRESNE, 2008; EDGAR, GRAY, 2003). Recentemente, a caracterização morfológica dos NCC foi realizada com a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (NI et al., 2012), a microscopia eletrônica de transmissão (MET) (MORAIS et al., 2013), e mais recentemente, a microscopia de força atômica (MFA) (MORAES et al., 2016).

A microscopia eletrônica permite a observação direta das dimensões (isso é, comprimento e largura) de uma dada partícula. Porém, devido à baixa densidade dos NCC, esses são susceptíveis a queimaduras pela longa exposição ao feixe de elétrons (KAUSHIK et al., 2014). De acordo com Moraes et al. (2016), o MEV convencional não apresenta resolução suficiente para caracterizar morfologicamente as nanopartículas, sendo necessário recorrer a equipamentos de MEV de alta resolução como o MEV-FEG (*FEG, Field Emission Gun*). Nesse contexto, a resolução do MET é adaptada para a obtenção de imagens de NCC, sendo uma técnica mais suave do que o MEV em termos de fluxo de elétrons recebidos pela amostra, o que permite a visualização de partículas individuais (KAUSHIK et al., 2014).

No entanto, apesar do uso constante do MET para caracterização de NCC, ainda existem desafios associados à sua utilização, principalmente quanto à preparação de amostras (KAUSHIK et al., 2015; KAUSHIK et al., 2014). Além disso, a baixa densidade dos NCC requer o uso de métodos de coloração, como a utilização de acetato de uranila, que é um sal de metal pesado, tóxico e relativamente caro para envolver as nanopartículas em coloração negativa, o que pode facilitar a observação

no MET (KVIEN, TANEM, OKSMAN, 2005; NAKAKOSHI, NISHIOKA, KATAYAMA, 2011).

O principal desafio na preparação de uma amostra para observação no MET é garantir uma dispersão satisfatória das partículas. Isso é particularmente crítico quando se quer determinar a distribuição de tamanho de uma população de NCC (KAUSHIK et al., 2015). KAUSHIK et al. (2014) relatam um método para a obtenção de imagens MET de NCC em alta qualidade, como o método de preparação e a dispersão de NCC nos *grids* utilizados para a análise. Também analisam as diferenças morfológicas, dependendo do método de secagem dos NCC (não secas após a síntese, secas por pulverização e liofilizadas). Foi demonstrado que todas as amostras possuem a morfologia em nano escala, desde que sejam dispersos adequadamente (KAUSHIK et al., 2014).

Outra possibilidade é a utilização da Microscopia de Força Atômica (MFA), que é uma ferramenta investigativa em escala atômica de alta resolução nas dimensões x, y e z, além de não alterar a morfologia das propriedades físico-químicas das amostras durante a análise (ALESSANDRINI, FACCI, 2005; LEITE et al., 2012).

O MFA fornece informações sobre a morfologia, topografia de superfície, propriedades mecânicas e adesão dos NCC sob condições ambientais (LE NORMAND, MORIANA, MONICA, 2014; SILVÉRIO et al., 2013; DOS SANTOS et al., 2013; SACUI et al., 2014). Porém, apesar do MFA fornecer informações confiáveis sobre a espessura das partículas depositadas sobre um substrato plano, a resolução lateral é limitada pela convolução da ponta, cujo tamanho e curvatura são significativamente maiores do que as dimensões das nanopartículas. Todavia, o modelo proposto por Wang e Chen (2007) pode corrigir esse efeito chamado de “alargamento da ponta” (KAUSHIK et al., 2015; UREÑA-BENAVIDES, BROWN, KITCHENS, 2010).

De outro modo, as imagens de MET proporcionam uma boa resolução lateral nanométrica (e muitas vezes subnanométrica), permitindo rapidamente rastrear uma grande população de partículas, evitando assim grandes problemas de amostragem. Contudo, como as imagens de MET são projeções dos objetos ao longo da direção do feixe incidente, pode ser difícil medir com precisão a espessura das partículas (KAUSHIK et al., 2015).

Quando possível, a combinação de dados de imagens MFA e MET, e análises de dispersão fornecem uma descrição ótima da morfologia das partículas. Por exemplo, uma combinação de imagiologia e de dados de dispersão foi utilizado por Elazzouzi-Hafraoui et al. (2008) e Brito et al. (2012) para descrever com precisão a morfologia dos NCC extraídos de uma variedade de fontes.

3.1.4 NCC como reforço em nanocompósitos

Os recentes avanços na melhora das propriedades físicas e químicas de materiais compósitos, devido à incorporação de nanopartículas (nanocargas, metais, partículas magnéticas) em matrizes poliméricas representam uma alternativa promissora na fabricação de materiais nanocompósitos de alto desempenho (HABIBI, 2014; MIAO, HAMAD, 2013; KRISHNAMOORTI, VAIA, 2001; ALEXANDRE, DUBOIS, 2000).

Ainda, os avanços na produção de materiais celulósicos como microfibrilas, nanofibras e NCC tornaram possível a fabricação de compósitos e nanocompósitos celulósicos (ALEXANDRE, DUBOIS, 2000; GALDEIRA, 2014). A utilização dos materiais celulósicos está relacionada a possível melhora das propriedades físicas e químicas dos compósitos e nanocompósitos fabricados com esses materiais, além do apelo ambiental, já que a celulose é um material encontrado em abundância na natureza (HABIBI, 2014). Como para todos os materiais multifásicos, as propriedades desses compósitos dependem dos dois constituintes, nomeadamente reforço e matriz, além dos aspectos morfológicos e dos seus comportamentos interfaciais (interações reforço/matriz) (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005).

Dentre os materiais celulósicos utilizados como reforço em compósitos destaca-se a aplicação de NCC por duas razões principais: a resistência mecânica elevada devido à sua estrutura cristalina quase perfeita e área de superfície específica elevada devido a seu tamanho nano-escala (MIAO, HAMAD, 2013). Além das excelentes propriedades mecânicas apresentadas pelos NCC, a vantagem de apresentarem elevada superfície específica por peso de material os tornam altamente atrativos quando são considerados os fenômenos de interface sólido-líquido (DUFRESNE, 2003).

Desde o primeiro anúncio usando NCC como uma fase de reforço por Favier et al. (1995), novas contribuições nesta área foram feitas (DUFRESNE, 2003; ANGLES,

DUFRESNE, 2000; ELAZZOUZI-HAFRAOUI et al., 2008; EICHHORN et al., 2001; HABIBI, LUCIA, ROJAS, 2010). Samir, Alloin e Dufresne (2005) concluíram que características originais podem ser obtidas com a incorporação física de NCC em diversas matrizes poliméricas, onde foi observado o fenômeno de percolação mecânica que conduz a propriedades mecânicas excelentes.

Esforços significativos nesta área têm vindo a concentrar-se nos métodos de preparação de nanocompósitos com NCC, como dispersar eficazmente os nanocristais em matrizes de polímero e proporcionar uma boa interface entre reforço e matriz. Os materiais celulósicos são hidrofílicos, o que os torna difíceis de dispersar bem em termoplásticos hidrofóbicos. Esse problema é agravado para os NCC, devido à sua grande área de superfície específica, ou energia de superfície elevada, a qual promove agregação (MIAO, HAMAD, 2013).

Em geral, existem duas abordagens para incorporar NCC em uma matriz polimérica antes da polimerização (MIAO, HAMAD, 2013). Polimerização *in situ*, ou através de composição de pós-polimerização. A preparação da polimerização *in situ* é tipicamente a dissolução em um solvente, no qual os monômeros são solúveis, e os NCC dispersáveis no solvente. A composição pós-polimerização é mais amplamente utilizada e estudada, onde o método mais direto é usar a água como o meio de processamento para combinar NCC com polímeros (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005; ANGLES, DUFRESNE, 2000). Contudo, isso restringe a escolha de matrizes de polímero àquelas que são solúveis em água (MIAO, HAMAD, 2013).

Segundo Miao e Hamad (2013), existem quatro fatores principais que afetam as propriedades mecânicas dos nanocompósitos que utilizam polímeros como matriz e NCC como reforço, sendo eles:

- A compatibilidade do NCC com a resina polimérica. Isso é essencial para permitir a dispersão uniforme do reforço na matriz e evitar a agregação dos NCC. É particularmente significativa em técnicas de processamento de polímeros de grande escala, como extrusão e compressão/moldagem por injeção;
- A estrutura molecular da matriz, que influencia a interação entre matriz e os NCC e suas propriedades interfaciais;

- A razão de aspecto das partículas NCC, que é determinada pela origem da fonte de celulose e as condições de preparação. Tipicamente, uma relação de aspecto mais elevada dá mais potencial de reforço, assumindo que a agregação não ocorre;
- Os métodos de processamento (fabricação) dos nanocompósitos. Esses métodos estão condicionados pelas propriedades intrínsecas dos NCC e a matriz polimérica (solubilidade, dispersibilidade e degradação) e as propriedades finais desejadas tais como a forma geométrica (SAMIR, ALLOIN, DUFRESNE, 2005).

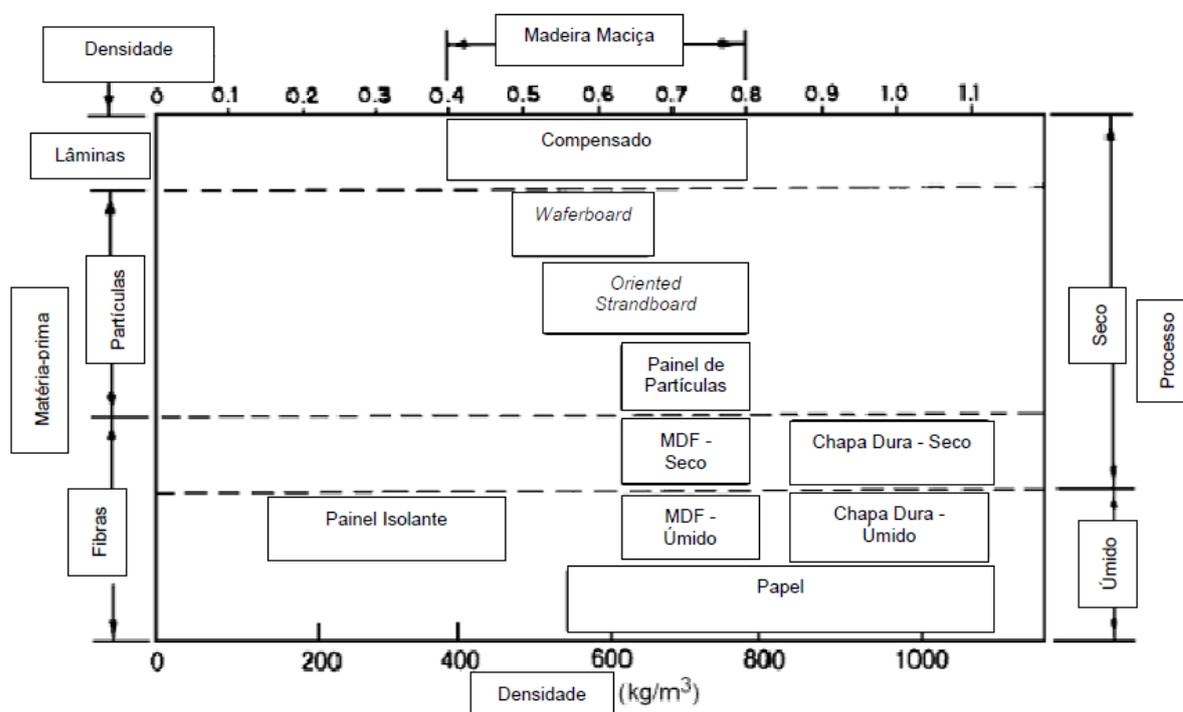
Entretanto, não há ainda uma aplicação industrial desse material, provavelmente devido à necessidade de contornar certos fatores e aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento (SILVA, D'ALMEIDA, 2009). O desafio para os profissionais de pesquisa e desenvolvimento nos próximos anos é traduzir o potencial bem sucedido de reforço micro/nano-celulósico para técnicas de processamento de polímeros comercialmente disponíveis (por exemplo, extrusão, moldagem por injeção) por meio de desenvolvimento de compatibilização escalável e rentável e técnicas de dispersão (MIAO, HAMAD, 2013).

3.2 A INDÚSTRIA DOS PAINÉIS DE MADEIRA

3.2.1 O processo de fabricação de painéis MDF

A maior parte da literatura classifica os painéis de madeira segundo o tipo de matéria-prima utilizada (lâminas, partículas ou fibras), processo produtivo (seco ou úmido) e a densificação final do painel (FERREIRA, 2010). A Figura 4 mostra uma forma de classificação dos painéis de madeira reconstituída, tendo como fonte de referência Suchsland e Woodson (1987).

Figura 4 - Classificação dos painéis de madeira



Fonte: Adaptado de Suchsland e Woodson (1987) apud Ferreira (2010).

Os painéis mais produzidos industrialmente são os MDP (*Medium Density Particleboard*), MDF (*Medium Density Fiberboard*) e OSB (*Oriented Strand Board*) (CUNHA et al., 2014). Destacam-se entre os painéis, os fabricados com fibras de média densidade (MDF), que apresentam vantagens devido a melhores condições de acabamento superficial, usinabilidade e resistência a esforços mecânicos (IWAKIRI, 2005). Atualmente, o MDF é o painel com maior potencial de crescimento no mercado mundial (DOMINGOS et al., 2016).

A sigla MDF corresponde no Brasil como painel ou chapa de fibra de média densidade. É constituído pela aglutinação de fibras lignocelulósicas combinadas com resinas sintéticas ou outro agente ligante, compactados a uma densidade entre 0,5 e

0,8 g/cm³, prensadas em prensa contínua onde atuam, conjuntamente, a ação da pressão e da temperatura (MALONEY, 1993). A resina mais utilizada é a ureia-formaldeído devido a seu custo ser mais baixo em relação às demais resinas (FREIRE et al., 2015).

Os painéis de madeira podem ser produzidos pelo processo seco ou úmido. O processo seco é aplicado para painéis com alta e média densidade e tem início pelo processo de descascamento das toras de madeira, para a obtenção dos cavacos por meio de picadores e peneiras (ROSS, 2010).

Antes da obtenção das fibras, os cavacos geralmente são submetidos a um pré-tratamento para amolecer a lignina e facilitar o desfibramento (quebra das ligações entre as fibras). Esses processos podem ser hidráulicos, térmicos ou químicos, com ou sem pressurização, onde os cavacos devem estar ou ser umedecidos entre 40% a 60% de umidade (TORQUATO, 2008). O processo mais utilizado para a produção de painéis MDF é o térmico, onde os cavacos são umedecidos e aquecidos em reservatórios fixos ou rotativos, em atmosfera de vapor d'água com condições controladas de pressão e tempo de permanência (SILVA, 2013; TORQUATO, 2008).

Os tratamentos químicos, geralmente alcalinos, também são usados para enfraquecer as ligações de lignina. Embora os tratamentos ajudem a aumentar a qualidade da fibra e reduzir as necessidades energéticas, eles também podem reduzir o rendimento e modificar a química das fibras (ROSS, 2010).

A partir do pré-tratamento, os cavacos são pressurizados entre discos com ranhuras radiais com rotação e pressão controladas (ROSS, 2010). Esse processo é chamado de refinamento mecânico ou desfibramento e consiste no cisalhamento e corte do cavaco, resultando em fibras com dimensões milimétricas (TORQUATO, 2008).

Após o processo de refinamento, as fibras são normalmente classificadas em dimensões pré-determinadas pelo processo de depuração, que consiste em remover as impurezas sólidas, como os palitos, cavacos não cozidos, areia e fragmentos de casca (DIAS, SIMONELLI, 2013). A partir desse ponto, as fibras são secas e transportadas até os aplicadores, onde são misturadas com resina, catalisador, água, emulsão de parafina e, em alguns casos, outros aditivos (SILVA, 2013). Após a aplicação, o material misturado segue para a estação formadora, onde é constituído

o chamado “colchão de fibras”. Dependendo do processo, o colchão é compactado na pré-prensa e, posteriormente, segue à prensa quente. Os sistemas de prensagem podem ser: simples abertura, múltipla abertura e contínuo (CHIPANSKI, 2006).

Os sistemas atuais contemplam o uso de prensa contínua. De acordo com Maloney (1993) esta tecnologia permite o aumento da velocidade da linha, eliminando os tempos de carregamento, descarregamento, fechamento e abertura das prensas convencionais.

Após a prensagem, os painéis são transportados para um sistema de resfriamento a temperatura ambiente para a climatização. Logo em seguida, os painéis são esquadrejados e cortados em dimensões comerciais e seguem para o acabamento, onde são lixados para remoção de imperfeições e nivelamento de superfície (CHIPANSKI, 2006; SILVA, 2013).

3.2.2 Os painéis MDF como nanocompósitos

Como a principal fonte de fibras de celulose, as fibras de madeira são amplamente utilizadas e estudadas como compósitos. Por exemplo, as fibras de madeira consistem em microfibrilas de celulose incorporadas numa matriz amorfa de lignina e hemicelulose (MIAO, HAMAD, 2013).

Um ponto chave é a secagem das fibras antes do processamento, uma vez que o teor de água na fibra pode resultar em fraca aderência entre fibra e polímero, ou mesmo criar vazios no compósito quando a água evapora durante o processamento (MIAO, HAMAD, 2013).

Os reforços em compósitos podem ser classificados estruturalmente como: tecidos, fibras contínuas, fibras curtas e partículas, ou, morfologicamente, como macroscópicos, microscópicos ou nanoscópicos com base no seu tamanho físico (MIAO, HAMAD, 2013). O reforço em um nanocompósito tem pelo menos uma dimensão na ordem do nanômetro, normalmente inferior a 100 nm. Neste sentido, com a evolução da tecnologia no que diz respeito aos estudos na área de nanomateriais, alguns estudos vêm apresentando novos comportamentos e propriedades diferentes aos que geralmente esses materiais demonstram em escala macroscópica (HULL, CLYNE, 1996; SAMIR et al., 2004; KASHIWAGI et al., 2004; NJUGUNA, PIELICHOWSKI, ALCOCK, 2007; FEDULLO et al., 2007; SILVA, CAMPOS, FERREIRA, 2016).

Alguns estudos têm indicado que a adição de nanoreforços no processo produtivo de painéis MDF podem melhorar as propriedades dos painéis (SILVA, CAMPOS, FERREIRA, 2016; ROUMELI et al., 2012). Silva, Campos e Ferreira (2016) apresentaram em seu trabalho melhoras nas propriedades mecânicas da resina UF com a adição de nanopartículas de sílica na resina UF, afetando diretamente o inchamento dos painéis quando em contato com água.

No trabalho de Roumeli et al. (2012), verificou-se que as propriedades mecânicas dos painéis, como a ligação interna e o módulo de ruptura, são reforçados com a crescente concentração de nanopartículas de sílica como aditivo em resinas de UF. Sabdin (2010) apresenta em seu trabalho resultados que mostram uma melhor transferência de calor com a aplicação de nanopartículas de óxido metálico em painéis MDF. A melhor transferência de calor resultou em uma maior qualidade superficial do painel. Em painéis sem a adição de nanopartículas metálicas, o tempo de prensagem é maior, pois a fibra de madeira não é um bom condutor (SILVA, CAMPOS, FERREIRA, 2016).

Neste sentido, Kumar et al. (2013) adicionaram nanopartículas de óxido de alumínio na resina UF em painéis MDF. A transferência de calor dos painéis aumentou durante a prensagem e as emissões de formaldeído diminuíram com o aumento da concentração de nanopartículas. Além disso, a adesão interna e o módulo de ruptura dos painéis melhoraram significativamente depois da adição de nanopartículas.

No entanto, os compósitos reforçados com fibras naturais não são amplamente utilizados em aplicações industriais. A adição de reforços celulósicos tem o potencial de melhorar as propriedades de materiais compósitos poliméricos (MIAO, HAMAD, 2013). Algumas propriedades dos reforços celulósicos estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Reforços celulósicos e algumas propriedades

Reforços celulósicos	Morfologia	Diâmetro (nm)	Razão de aspecto	Módulo (GPa)	Área de superfície
Celulose microfibrilada	Rede	15 -1000	15-100	10-13 / 29-36	~7 / 29-202
Celulose microcristalina	Partículas	1000-100000	<5	5-9/~25	1-20
Celulose nanocristalina	Hastes	2-20	~1-100	143-150	400

Fonte: Adaptado de MIAO, HAMAD (2013).

Em um trabalho pioneiro nesse sentido, Cardoso et al. (2016), utilizaram concentrações de 2 e 5% de nanocelulose ácida como catalisador da resina UF em painéis de partículas de madeira (MDP). Os resultados foram comparados com painéis que utilizaram somente sulfato de amônia como catalisador, sendo que a

formulação com 2% de nanocelulose apresentou melhores propriedades físicas como densidade e inchamento de espessura.

Porém, ainda não foram encontrados na literatura trabalhos que utilizaram reforços celulósicos em painéis de fibras de madeira de média densidade (MDF).

3.2.3 Propriedades mecânicas de painéis MDF

A determinação de propriedades mecânicas de painéis de madeira em condições de laboratório e industrialmente tem sido realizada por diversos autores (KRZYSIK et al., 2001; GORRINI et al., 2004; CAMPOS, 2005; TORQUATO, 2008; FERREIRA, 2010). As propriedades mecânicas mais avaliadas em painéis MDF são módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e adesão interna (AI) (TORQUATO, 2008; FERREIRA, 2010). Segundo a ABNT NBR 15316 (2015), para a obtenção dessas propriedades, são realizados os seguintes ensaios:

- a) Resistência à flexão estática: Resistência que um corpo de prova de um painel MDF, apoiado em seus extremos, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro até a sua ruptura;
- b) Resistência à tração perpendicular: Resistência que um corpo de prova de um painel MDF oferece, quando este é submetido a uma força de tração aplicada perpendicularmente à sua superfície até a ruptura.

Para a obtenção das propriedades mecânicas, são realizados ensaios em conformidade com diversas normas como a brasileira ABNT NBR 15316-2 (2015), a americana ASTM D1037 (1999), e as europeias EN 310 (1993) e EN 319 (1993). A Tabela 2 apresenta uma compilação de equações e dimensões dos corpos de prova utilizados no cálculo das propriedades mecânicas de painéis MDF, de acordo com as normas supracitadas. Para uma melhor comparação a nomenclatura das variáveis das equações foram padronizadas, onde:

- P é a carga máxima em Newtons (N);
- $P1$ é a carga no limite proporcional em Newtons (N);
- $P10$ é a carga correspondente a 10% de P ;
- $P40$ é a carga correspondente a 40% de P ;
- D é a distância entre apoios no ensaio de flexão em milímetros;
- d é a deflexão em milímetros correspondente à carga analisada;
- $d10$ é a deflexão em milímetros correspondente a carga $P10$;

- $d40$ é a deflexão em milímetros correspondente a carga $P40$;
- B é a largura do corpo de prova em mm;
- E é a espessura do corpo de prova em mm;
- L é o comprimento do corpo de prova em mm.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas mais avaliadas em painéis MDF

Norma	Ensaio	Propriedade	Equação	Corpo de prova
ABNT NBR 15316-2	Flexão estática	Módulo de elasticidade	$\frac{P1.D^3}{d.4.B.E^3}$	$L = 20.E + 50\text{ mm}$ $B = 50\text{ mm}$
		Módulo de ruptura	$\frac{1,5.(P.D)}{B.E^2}$	
	Tração perpendicular	Adesão interna	$\frac{P}{L.B}$	$L = 50\text{ mm}$ $B = 50\text{ mm}$
ASTM D1037	Flexão estática	Módulo de elasticidade	$\frac{P1.D^3}{d.4.B.E^3}$	$L = 24.E + 50\text{ mm}$ $Se E > 6\text{ mm} : B = 50\text{ mm}$ $Se E \leq 6\text{ mm} : B = 76\text{ mm}$
		Módulo de ruptura	$\frac{3.(P.D)}{2.B.E^2}$	
	Tração perpendicular	Adesão interna	$\frac{P}{L.B}$	$L = 50\text{ mm}$ $B = 50\text{ mm}$
EN310:1993	Flexão estática	Módulo de elasticidade	$\frac{(P40 - P10).D^3}{4.B.E^3.(d40 - d10)}$	$L = 20.E + 50\text{ mm}$ $B = 50\text{ mm}$
		Módulo de ruptura	$\frac{3.(P.D)}{2.B.E^2}$	
EN319:1993	Tração perpendicular	Adesão interna	$\frac{P}{L.B}$	$L = 50\text{ mm}$ $B = 50\text{ mm}$

Fonte: Autor (2017).

Ao observar a Tabela 2, nota-se que as equações para o cálculo do módulo de ruptura e adesão interna são semelhantes em todas as normas. No entanto, para o módulo de elasticidade, a equação da norma europeia EN 310 difere das demais, por considerar a interpolação de cargas em 2 pontos distintos ($P40$ e $P10$) e a deflexão nesses pontos ($d40$ e $d10$). Em relação às dimensões dos corpos de prova, as dimensões da norma ASTM D1037 diferem das demais, com dimensões maiores para os corpos de provas para flexão estática. A norma ABNT NBR 15316 aplicada a painéis de fibras corresponde, em requisitos, às normas europeias (TORQUATO, 2008).

A Tabela 3 mostra os requisitos mínimos de propriedades de acordo com os valores propostos na norma ABNT NBR 15316-2 para painéis MDF não estruturais

em condições secas. Segundo a norma ABNT NBR 15316, a condição seca é caracterizada pelo teor de umidade no material correspondente a uma temperatura de 20° C e uma umidade relativa do ar que somente ultrapassa os 65% durante algumas semanas ao ano.

Tabela 3 - Principais requisitos de acordo com a ABNT NBR 15316

Requisitos mínimos	Unidade	Classe de espessura (mm)			
		>2,5 a 4	>4 a 6	>6 a 9	>9 a 12
Resistência à tração perpendicular (mínimo)	N/mm ²	0,65	0,65	0,65	0,60
Resistência a flexão elástica ou módulo de ruptura (mínimo)	N/mm ²	23	23	23	22
Módulo de elasticidade (mínimo)	N/mm ²	NA	2700	2700	2500

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

É importante ressaltar que a norma ABNT NBR 15316 não diferencia requisitos para os resultados de flexão estática. Os valores da Tabela 3 devem ser aplicados aos resultados de ensaios obtidos na direção mais fraca do painel, assim os menores valores de MOE e MOR encontrados serão válidos para a avaliação dos painéis (TORQUATO, 2008).

No entanto, apesar de serem conhecidos os métodos de obtenção de propriedades mecânicas de painéis industriais, no ambiente de pesquisa exploratória, quando são utilizados reforços e materiais desconhecidos, deve-se observar fatores que afetam as propriedades mecânicas dos painéis. Ganev et al., (2005) avaliaram o efeito da densidade e do teor de umidade no módulo de elasticidade e no módulo de cisalhamento em painéis MDF produzidos em laboratório. Os resultados mostraram que estas propriedades aumentaram com o aumento da densidade (540 kg/m³, 650 kg/m³ e 800 kg/m³) e diminuíram com o aumento do teor de umidade das amostras (6,9%, 9,8% e 13,1%). Ainda, existem outros fatores que afetam as propriedades mecânicas dos painéis MDF como as condições, tamanho e alinhamento das fibras, as condições e o tipo da resina, os parâmetros de prensagem e o perfil de densidade (ELEOTÉRIO, 2000; FERREIRA, 2010).

3.2.4 Características superficiais de painéis MDF

O painel MDF é um produto homogêneo, uniforme, estável, denso e de superfície plana e lisa, que permite boa trabalhabilidade e usinagem complexa, com acabamento de qualidade (CASTRO, 2000). Esses painéis apresentam resultados satisfatórios nos processos de marcenaria, tais como entalhar, pintar, colar, laquear, cortar, parafusar, perfurar e moldurar (CAMPOS, LAHR, 2004). A aplicação desse

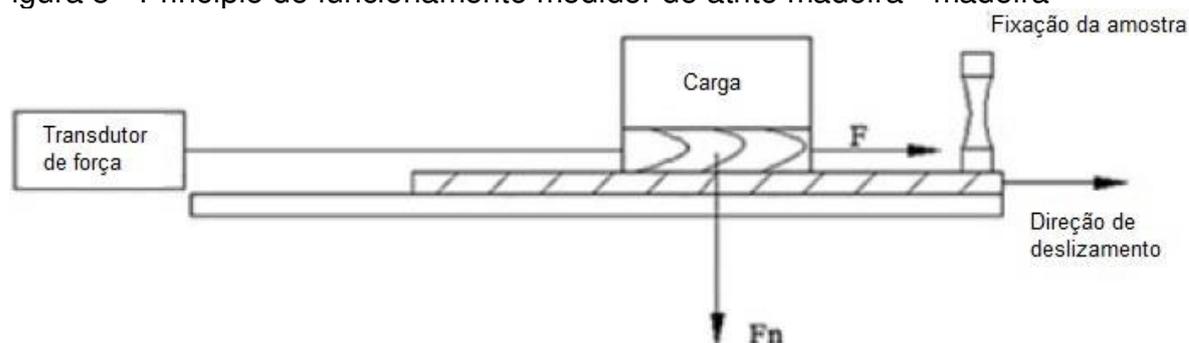
material é prioritariamente para a indústria moveleira, apesar de que é possível encontrar sua utilização em pequenas configurações estruturais (CASTRO, 2000).

Além das vantagens citadas no início desse capítulo, outra característica favorável presente nos painéis MDF é a maior densidade nas faces. Essa maior densificação resulta em uma menor quantidade de espaços vazios que permite uma usinagem de acabamento com menor rugosidade (ELEOTERIO, 2000). Portanto, os painéis MDF oferecem boas condições de acabamento superficial e podem receber revestimentos como: pintura, papel, lâminas de madeira ou PVC (CASTRO, 2000).

O desempenho dos revestimentos é diretamente afetado pela rugosidade superficial resultante da usinagem de acabamento. Dessa forma, é importante conhecer a rugosidade superficial dos painéis, e a interação da superfície com outras superfícies, o conseqüente atrito, além de fenômenos associados a remoção de material (usinagem ou desgaste) (XU et al., 2014). Um fator a ser considerado é a quantidade de resina, pois conforme Castro (2000), ferramentas de aço-rápido comumente empregadas na usinagem da madeira apresentam elevado desgaste devido à presença de resina na estrutura do MDF.

As pesquisas sobre os fatores que influenciam o atrito de materiais de madeira se concentram no teor de umidade, extrativos e densidade, mas raramente na rugosidade da superfície (SVENSSON et al., 2009). No entanto, XU et al. (2014) demonstraram que os coeficientes de atrito de painéis de madeira MDF com diferentes rugosidades foram afetados pela rugosidade da superfície, em um par tribológico madeira-madeira. O objeto do estudo foi o contato de atrito não-lubrificado de superfícies ásperas. A primeira amostra de madeira foi fixada na plataforma de deslizamento e a segunda amostra de madeira foi fixada ao transdutor de força. Um esquema do princípio do dispositivo é apresentado na Figura 5.

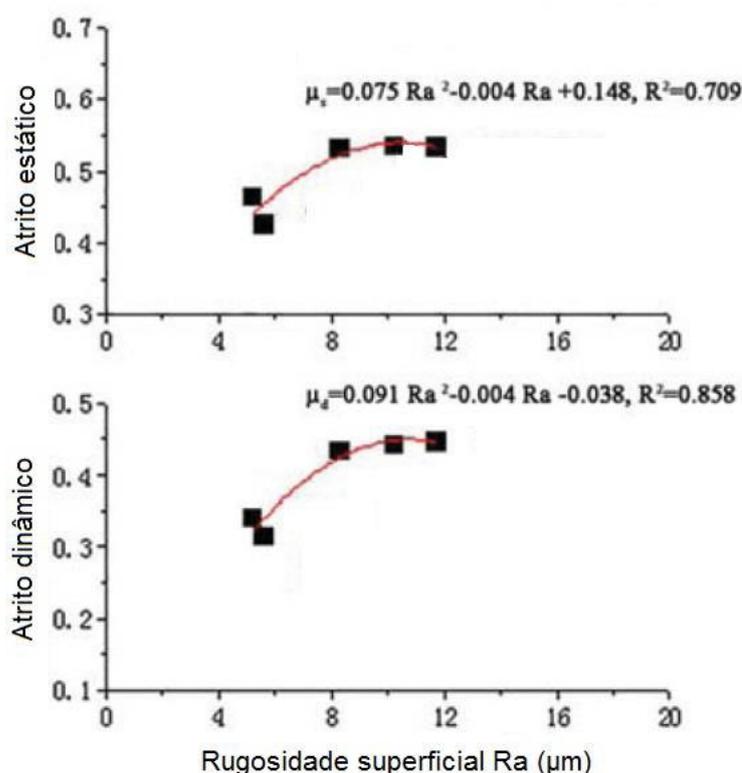
Figura 5 - Princípio de funcionamento medidor de atrito madeira - madeira



Fonte: Adaptado de XU et al. (2014).

Os coeficientes de atrito (estático e dinâmico) dos painéis MDF com diferentes rugosidades aumentaram acentuadamente no início e depois estabilizaram-se com o aumento da rugosidade média (Ra), como pode ser visto na Figura 6. Além disso, as relações entre os coeficientes de atrito e Ra de painéis MDF foram polinomiais. Achados semelhantes foram relatados comparando o coeficiente de atrito entre a madeira e o MDF e o da madeira e da tábua orientada (MENG, HIRAI, KOIZUMI, 2008).

Figura 6 - Coeficientes de atrito de MDF-MDF com Ra variável.



Fonte: Adaptado de XU et al. (2014).

Os efeitos da rugosidade superficial sobre o coeficiente de atrito do par tribológico madeira-aço também têm sido estudados. No estudo de McKenzie e Karpovich (1968), os coeficientes de atrito foram semelhantes entre pares de atrito madeira-madeira e madeira-aço. O atrito aço-madeira foi afetado principalmente pela rugosidade do aço e pelo teor de umidade da madeira interagindo com a velocidade de deslizamento. Nesse contexto, Hiziroglu (1996) analisou a rugosidade final da superfície de painéis MDF e constatou que o tamanho e a forma das fibras são parâmetros que influenciam as características superficiais dos painéis MDF.

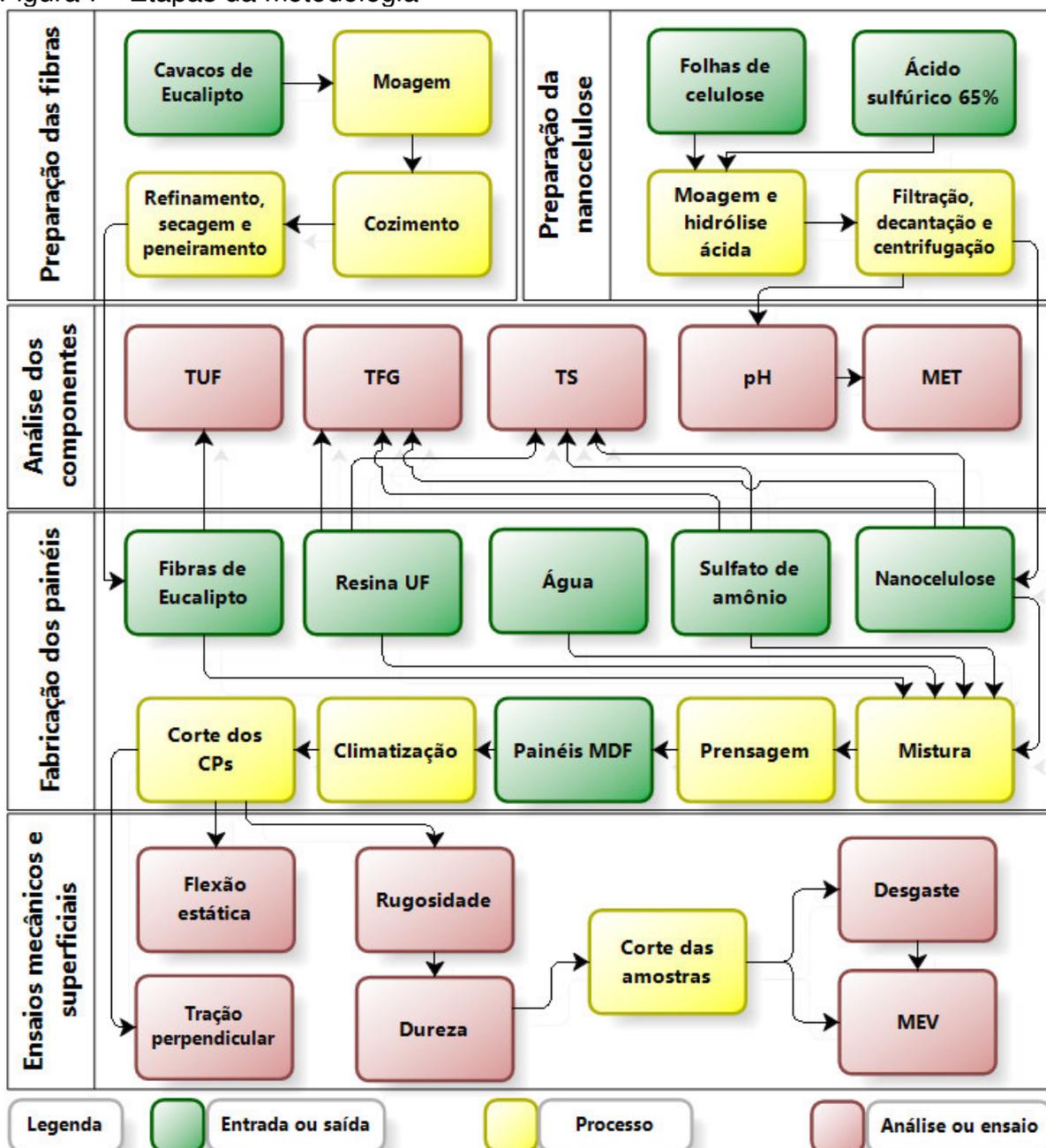
Por outro lado, um fator importante é a dureza do material, que muitas vezes na literatura é apontada como um bom indicador da sua resistência ao desgaste abrasivo. No entanto, no caso dos polímeros, a resistência ao desgaste abrasivo apresenta mais comumente uma correlação linear como produto entre tensão de ruptura e deformação na tensão de ruptura (ZUM GAHR, 1987).

Uma forma de medir o desgaste abrasivo em polímeros é pela norma ABNT NBR ISO 4649 (2014). Esta refere-se à determinação da resistência ao desgaste por abrasão de elastômeros e materiais similares, utilizando cilindro rotativo. O corpo de prova cilíndrico é deslizado contra um tambor rotativo que possui em sua superfície material abrasivo, sendo usualmente uma folha de lixa. A pressão de contato e a velocidade são mantidas constantes e a resistência ao desgaste é dada pela perda volumétrica ao final do teste, medida indiretamente por meio da perda de massa do corpo cilíndrico (CUNHA, 2013).

4 METODOLOGIA

Esse capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia empregada na pesquisa, como mostra a Figura 7. A metodologia está dividida em seis etapas: preparação das fibras, preparação da nanocelulose, análise dos componentes, fabricação dos painéis, ensaios mecânicos e ensaios superficiais.

Figura 7 - Etapas da metodologia



Fonte: Autor (2017).

Após os ensaios, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com aplicação do teste *Tukey* para verificação de diferenças significativas entre as médias dos resultados. Para tanto, foi considerado um nível de significância $\alpha = 0,05$.

4.1 Preparação das fibras de eucalipto

A preparação das fibras de Eucalipto foi realizada no Laboratório de Química da Madeira (LQM) no Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas. Foram adquiridos cavacos de Eucalipto, plantados pela empresa CMPC Celulose da cidade de Guaíba/RS (Figura 8a), com dimensões aproximadas de 30 mm x 20 mm x 5 mm. Esses cavacos foram secos e na sequência passaram pelo processo de moagem (Figura 8b) onde foram obtidas partículas (palitos) de madeira com comprimento aproximado de 15 mm, conforme podem ser observadas na Figura (8c).

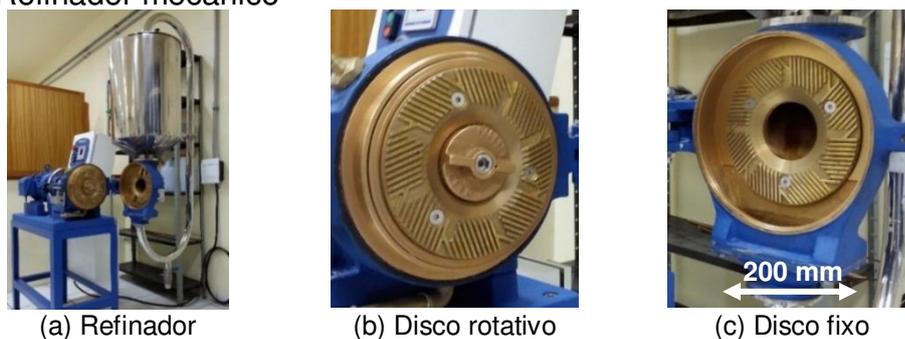
Figura 8 - Moagem dos cavacos de Eucalipto



Fonte: Autor (2017).

Na sequência, as partículas foram introduzidas em 4 células da autoclave eletrônica rotativa Regmed AU/E-20 para o cozimento das fibras e a sua separação da lignina. Em cada célula foram colocados 200 g de partículas e 1 litro de água filtrada. A autoclave operou por um período de 1 hora alcançando a temperatura de 160°C. As partículas cozidas foram encaminhadas ao refinador de discos Regmed MD-3000 (Figura 9a), para desintegrar as fibras em tamanho aproximado de 1 mm por meio do cisalhamento originado pela rotação do disco ranhurado (Figura 9b) de latão sobre outro disco ranhurado fixo (Figura 9c). Foram utilizados no processo uma potência de 3,2 KW, tempo de 15 minutos e 40 litros de água.

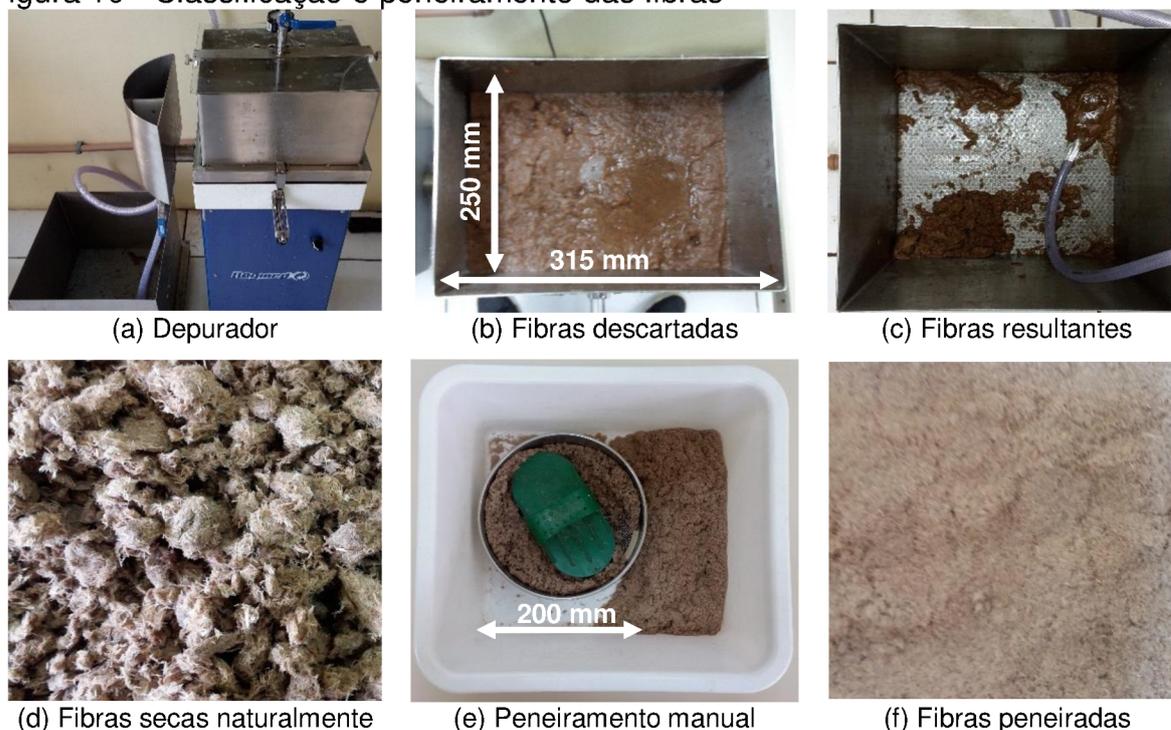
Figura 9 - Refinador mecânico



Fonte: Autor (2017).

A seguir, as fibras foram inseridas com água em um depurador Regmed SM-21 (Figura 10a), onde as fibras maiores ficam retidas e são descartadas (Figura 10b). Posteriormente, as fibras resultantes (Figura 10c) são secas naturalmente (Figura 10d) e peneiradas manualmente em uma peneira *mesh* 10 (Figura 10e-f).

Figura 10 - Classificação e peneiramento das fibras



Fonte: Autor (2017).

Após o peneiramento, as fibras passaram pelo processo de secagem em estufa com duas temperaturas diferentes (60°C e 80°C). Para as fibras dos painéis sem a adição da nanocelulose foi utilizada uma temperatura de 60°C para atingir o valor aproximado de umidade de 3%, com base no estudo de Eleotério (2000). No entanto, para as fibras dos painéis com a adição de nanocelulose, foi utilizada uma temperatura de 80°C para atingir o teor de umidade aproximado de 1%. Para ambas as temperaturas, as fibras permaneceram 3 horas na estufa.

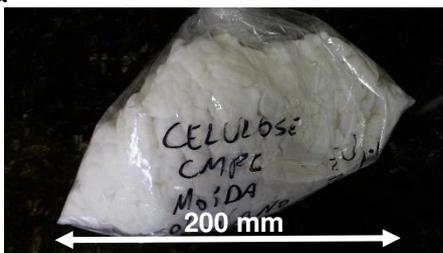
Essa diferença de temperatura visou secar mais as fibras utilizadas dos painéis com nanocelulose pelo fato de que em materiais compósitos o teor de umidade das fibras deve estar próximo a 1%, para uma melhor interação entre reforço e matriz (MIAO; HAMAD, 2013).

4.2 Preparação da nanocelulose

A preparação da nanocelulose foi realizada no Laboratório de Química da Madeira (LQM) no Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas. Foi

feita a moagem da polpa celulósica branqueada *kraft* seca em moinho de facas tipo Willey. Na sequência, a polpa celulósica moída (Figura 11) passou pelo processo químico de hidrólise ácida em banho-maria. Na hidrólise, utilizou-se uma solução aquosa de ácido sulfúrico a 65% de concentração massa/massa. Para cada grama de polpa celulósica seca, acrescentou-se 10 mL de solução de ácido sulfúrico. A hidrólise teve duração de dez minutos com agitação em banho-maria mantido a 50°C.

Figura 11 - Celulose moída



Fonte: Autor (2017).

Após o processo de hidrólise, os nanocristais de celulose foram filtrados em cadinho de vidro sinterizado com porosidade nº 3 utilizando uma bomba de vácuo. A reação foi paralisada quando o material entrou em contato com 100 mL de água destilada a temperatura ambiente. Essa mistura permaneceu reservada em becker de 1000 mL sob refrigeração por um período de 24h para a decantação da nanocelulose e, posterior, retirada do sobrenadante (Figura 12). Os procedimentos realizados para a síntese da nanocelulose foram feitos conforme estudo realizado por Silva, D'almeida e Koga (2011).

Figura 12 - Decantação da nanocelulose

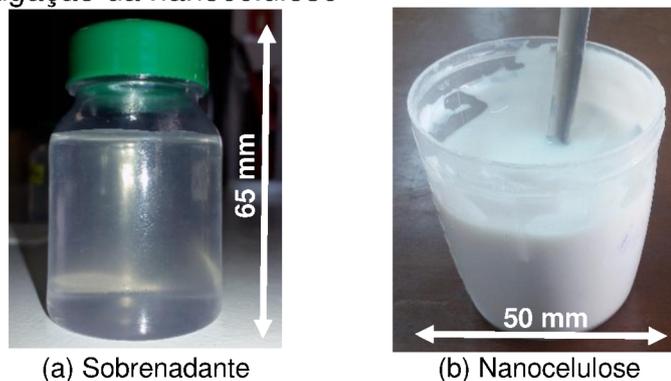


Fonte: Autor (2017).

Para aumentar o teor de sólidos e o pH da nanocelulose a mesma foi centrifugada por 5 min a uma velocidade de 10000 rpm por cinco vezes em uma centrífuga HITACHI CR22GIII no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) da Universidade Federal do Rio Grande. Foi retirado da última centrifugação o

sobrenadante para análise no microscópio eletrônico de transmissão. O pH do sobrenadante foi analisado e a pasta de nanocelulose obtida não foi neutralizada para garantir a polimerização da resina UF. A Figura 13a-b mostra o sobrenadante e a nanocelulose obtida.

Figura 13 - Centrifugação da nanocelulose



Fonte: Autor (2017).

4.3 Análise dos componentes de fabricação

Após as etapas de preparação das fibras de Eucalipto e da nanocelulose, foram feitas as análises de alguns parâmetros para os cálculos dos componentes dos painéis MDF. Os componentes analisados foram os obtidos nas etapas anteriores (fibras de Eucalipto e nanocelulose), a resina UF e o sulfato de amônio.

A primeira análise feita foi a verificação da presença e morfologia dos nanocristais de celulose por microscopia eletrônica de transmissão. Na sequência, os parâmetros da Tabela 4 foram analisados seguindo metodologias conhecidas.

Tabela 4 - Parâmetros para cálculo de painéis MDF

Parâmetros	Componente	Repetições
Teor de sólidos	Resina UF, Sulfato de Amônio, Nanocelulose	Duplicata
Teor de umidade	Fibras de Eucalipto	Triplicata
TFG	Resina UF+Sulfato de Amônio + Nanocelulose	Sem repetição

Fonte: Autor (2017).

O teor de sólidos e o teor de umidade são calculados considerando o percentual de água dos componentes. Assim, foi possível calcular a densidade desejada e a adição de água em cada painel. No entanto, o tempo de formação de gel (TFG) foi utilizado para a verificação do tempo de cura da resina a quente e a frio. Com esses tempos foi possível verificar se a resina polimerizou antes da prensagem (a frio) ou durante a prensagem (a quente).

4.3.1 Análise de nanocristais de celulose por MET

Foram obtidas imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) para a verificação da morfologia dos nanocristais de celulose no último sobrenadante da centrifugação. Para isso, a amostra foi mantida por 20 minutos em banho de ultrassom para dispersão. Após, foi colocada sobre um grid de cobre 300 *mesh* com 3,05 mm de diâmetro e filme de carbono com espessura < 10 nm.

O microscópio utilizado foi o da marca JEOL JEM-1400 no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul – CEME Sul da Universidade Federal do Rio Grande.

4.3.2 Determinação do teor de sólidos (TS)

Para a obtenção do teor de sólidos da resina UF, sulfato de amônio e nanocelulose, inicialmente foram feitas a homogeneização de cada componente. Após pesou-se aproximadamente 1,0 g de amostra de cada componente, determinando-se o peso úmido. Após a secagem em estufa a $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 5 horas, foi determinado o peso seco. A determinação do teor de sólidos foi de acordo com a Equação 1:

$$TS (\%) = \frac{PS}{PU} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

TS = teor de sólidos (%); PS = peso seco da resina (g); PU = peso úmido da resina (g).

4.3.3 Determinação do teor de umidade das fibras (TUF)

Para a obtenção dos teores de umidade das fibras, as fibras obtidas após o processo de secagem a 60°C e a 80°C foram colocadas em um cadinho com peso aproximado de 1,0 g. Após a secagem em estufa a $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 24 horas, foi determinado o peso seco. A determinação do teor de umidade foi de acordo com a Equação 2:

$$TUF (\%) = \frac{PU - PS}{PU} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

TU = teor de umidade (%); PS = peso seco das fibras (g); PU = peso úmido das fibras (g).

4.3.4 Determinação do tempo de formação de gel (TFG)

O TFG foi feito a partir da mistura da resina UF com o sulfato de amônio e 6% de nanocelulose com base no peso seco da resina. O TFG foi adaptado de Ferreira (2010), diferenciando apenas a quantidade de resina UF que foi reduzida de 10 g para 5 g. O TFG foi calculado de duas formas, a quente e a frio.

Para a medição do TFG a quente, a mistura foi homogeneizada por meio de uma haste de arame com a ponta em forma de gancho e levado a banho de óleo à temperatura de 120°C até o ponto de endurecimento (Figura 14). O tempo necessário para que a mistura atingisse a fase gel expressa o tempo de formação de gel. Para o TFG a frio, foi repetido o mesmo procedimento, mas em temperatura ambiente.

Figura 14 - Aparato utilizado para determinação do TFG a quente



Fonte: Autor (2017).

4.4 Fabricação dos painéis MDF

4.4.1 Cálculo e preparação das formulações

As percentagens de cada componente nos painéis MDF foram determinadas com base no trabalho de Eleotério (2000), conforme constam na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição dos painéis

Componentes (g)	Variável para cálculo	Percentagem atribuída
Fibras	Fibras (%)	100%
Resina	Resina (%)	12%
Água	Água (%)	12%
Sulfato de amônio	Catalizador (%)	2%

Fonte: Autor (2017).

Nessa pesquisa, para o cálculo dos componentes dos painéis, a nanocelulose foi considerada como aditivo. O percentual de aditivo é em relação ao peso seco (base seca) da resina UF, conforme estabelecido nas formulações da Tabela 6.

Tabela 6 - Percentuais da nanocelulose como aditivo

Componentes (g)	Variável	Percentagens atribuídas*
Nanocelulose	Aditivo (%)	2%
		4%
		6%

*Em relação ao peso seco da resina UF.

Fonte: Autor (2017).

Para se obter as quantidades exatas de cada componente, inicialmente foram determinadas as dimensões dos painéis e a densidade desejada, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Dimensões e densidade dos painéis

Dimensão	Valor
Largura (mm)	132
Comprimento (mm)	380
Espessura (mm)	9
Densidade desejada (g/cm ³)	0,8

Fonte: Autor (2017).

Assim, foi possível calcular a massa específica dos painéis (**MP**) em gramas pela Equação 3:

$$MP (g) = Volume (cm^3) \times Densidade\ desejada \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (3)$$

Portanto, considerando as variáveis **TS** de cada componente, o **TUF** e as perdas estimadas (**PE**) em 1%, foi possível calcular a quantidade em massa (g) de fibras de madeira, resina UF, catalizador (sulfato de amônio), nanocelulose e água em cada painel fabricado.

4.4.1.1 Quantidade de fibras de madeira (QF)

Para a obtenção da quantidade de fibras por painel (**QF**) em gramas, inicialmente foi feito o cálculo da quantidade de fibras base seca (**FBS**), sem considerar a umidade e as perdas estimadas, como mostra a Equação 4:

$$FBS(g) = \frac{MP(g) \times Fibras (\%)}{Resina(\%) + Fibras(\%) + \acute{A}gua (\%)} \quad (4)$$

Considerando o TUF, foi calculada a quantidade de fibras base úmida (**FBU**) pela a Equação 5:

$$FBU (g) = FS(g) + \frac{FS(g) + TUF (\%)}{100} \quad (5)$$

Assim, foi obtido o **QF** considerando a PE, como mostra a Equação 6:

$$QF(g) = FU(g) + \frac{FU(g) + PE(\%)}{100} \quad (6)$$

4.4.1.2 Quantidade de resina (QR)

Para a obtenção da quantidade de resina por painel (**QR**), inicialmente foi feito o cálculo da quantidade de resina base seca (**RBS**) sem considerar o teor de sólidos e as perdas estimadas, como mostra a Equação 7:

$$RBS(g) = \frac{MP(g) \times Resina(\%)}{Resina(\%) + Fibras(\%) + \acute{A}gua(\%)} \quad (7)$$

Considerando o TS da resina UF, foi calculada a quantidade resina base úmida (**RBU**) pela Equação 8:

$$RBU(g) = \frac{RBS(g)}{\left(\frac{TS(\%)}{100}\right)} \quad (8)$$

Assim, foi obtido o **QR** considerando a PE, como mostra a Equação 9:

$$QR(g) = RBU(g) + \frac{RBU(g) \times PE(\%)}{100} \quad (9)$$

4.4.1.3 Quantidade de aditivo na resina (QAR)

Para a obtenção da quantidade de aditivo por painel (**QAR**), inicialmente foi feito o cálculo da quantidade de aditivo base seca (ABS) sem considerar o teor de sólidos e as perdas estimadas, como mostra a Equação 10. Os percentuais utilizados de aditivo na resina foram conforme os estabelecidos na Tabela 6.

$$ABS(g) = \frac{RBS(g) \times Aditivo(\%)}{Resina(\%) + Fibras(\%) + \acute{A}gua(\%)} \quad (10)$$

Considerando o TS da nanocelulose (TS), foi calculada a quantidade de aditivo base úmida (ABU) pela Equação 11:

$$ABU(g) = \frac{ABS(g)}{\left(\frac{TS(\%)}{100}\right)} \quad (11)$$

Assim, foi obtido o QA considerando a PE, como mostra a Equação 12:

$$QA(g) = ABU(g) + \frac{ABU(g) \times PE(\%)}{100} \quad (12)$$

4.4.1.4 Quantidade de catalisador (QC)

Para a obtenção da quantidade de catalisador por painel (**QC**), inicialmente foi feito o cálculo da quantidade de catalisador base seca (**CBS**) sem considerar o teor de sólidos e as perdas estimadas, como mostra a Equação 13:

$$CBS(g) = \frac{RBS(g) \times Catalizador (\%)}{100} \quad (13)$$

Considerando o TS do catalisador, foi calculada a quantidade de catalisador base úmida (CBU) pela Equação 14:

$$CBU (g) = \frac{CBS (g)}{\left(\frac{TS (\%)}{100}\right)} \quad (14)$$

Assim, foi obtido a QC considerando a PE, como mostra a Equação 15:

$$QC (g) = CBU (g) + \frac{CBU(g) \times PE(\%)}{100} \quad (15)$$

4.4.1.5 Quantidade de água (QH)

Segundo Eleotério (2000), o teor de umidade ideal da fibra para a fabricação de painéis MDF é 3%. Como existe uma variação entre o teor de umidade calculado e o ideal, foi realizado o cálculo da correção da umidade (**CH**) pela Equação 16:

$$CH(g) = \frac{(TUF - 3\%)}{100} \times QF \quad (16)$$

O CH é adicionado ao cálculo de quantidade de água no colchão de fibras (**HCF**). Caso o TUF calculado seja menor que 3%, o valor de CH torna-se negativo. Para a obtenção da quantidade de água por painel (**QH**) deve se considerar o HCF. Para tanto, utilizou-se a Equação 17 considerando os cálculos das seções anteriores.

$$HCF(g) = (FBU - FBS) + (RBU - RBS) + (CBU - CBS) + (ABU - ABS) + CH \quad (17)$$

Considerando o MP, determinou-se a quantidade de ideal de água (**QIH**) por painel em gramas, como mostra a Equação 18:

$$QIH(g) = \frac{MP (g) \times \text{Água} (\%)}{\text{Adesivo} (\%) + \text{Fibras} (\%) + \text{Água} (\%)} \quad (18)$$

Com a diferença dos resultados das Equações 17 e 18 e considerando a PE, foi calculada a QH, por meio da Equação 19:

$$QH(g) = (QIH(g) - HCF(g)) + \frac{(QIH(g) - HCF(g)) \times PE(\%)}{100} \quad (19)$$

4.4.2 Pesagem e mistura

Com os resultados obtidos dos cálculos das quantidades de cada componente na etapa anterior, os mesmos foram pesados em uma balança de precisão. Após a pesagem, foi colocada a mistura dos componentes (resina UF, sulfato de amônio, água e nanocelulose) na caneca da pistola de pulverização acoplada a um compressor de ar comprimido (Figura 15a). Foi confeccionado um recipiente com capacidade em volume de 20 litros para colocação das fibras e pulverização da mistura nas fibras (Figura 15b). O processo de mistura foi feito agitando o recipiente e pulverizando a mistura de modo intermitente, com duração aproximada de 5 minutos.

Figura 15 - Mistura dos componentes



(a) Pistola de pulverização e compressor de ar comprimido



(b) Recipiente de mistura

Fonte: Autor (2017).

4.4.3 Formação do colchão de fibras e prensagem

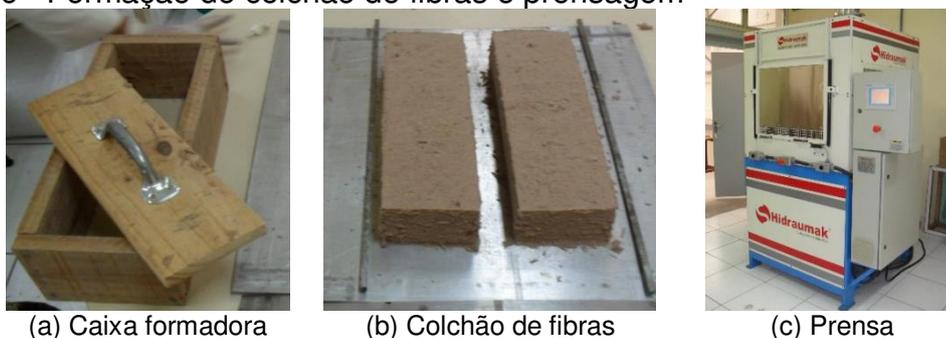
Após a etapa de pesagem e mistura, as fibras foram colocadas em um molde (caixa) de madeira, fabricada com as dimensões de 380 mm x 132 mm x 125 mm (comprimento x largura x altura), como mostra a Figura 16a. Foram formados dois colchões de fibras por prensagem sob chapas de aço inoxidável com sua superfície levemente lubrificada com vaselina líquida, e colocadas barras de aço inoxidável com perfil quadrado com espessura de 9 mm, a fim de definir a espessura do painel na prensagem (Figura 16b). Os colchões de fibras foram levados a uma prensa marca Hidraumak, sendo utilizada no processo de prensagem uma pressão específica de 40 kgf/cm², temperatura de 160°C e o tempo de 5 minutos (Figura 16c). No total foram produzidos 8 painéis, 2 por percentagem de nanocelulose atribuída, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Painéis fabricados

Painel	Nanocelulose	Quantidade
P0	0%	2
P2	2%	2
P4	4%	2
P6	6%	2

Fonte: Autor (2017).

Figura 16 - Formação do colchão de fibras e prensagem



(a) Caixa formadora

(b) Colchão de fibras

(c) Prensa

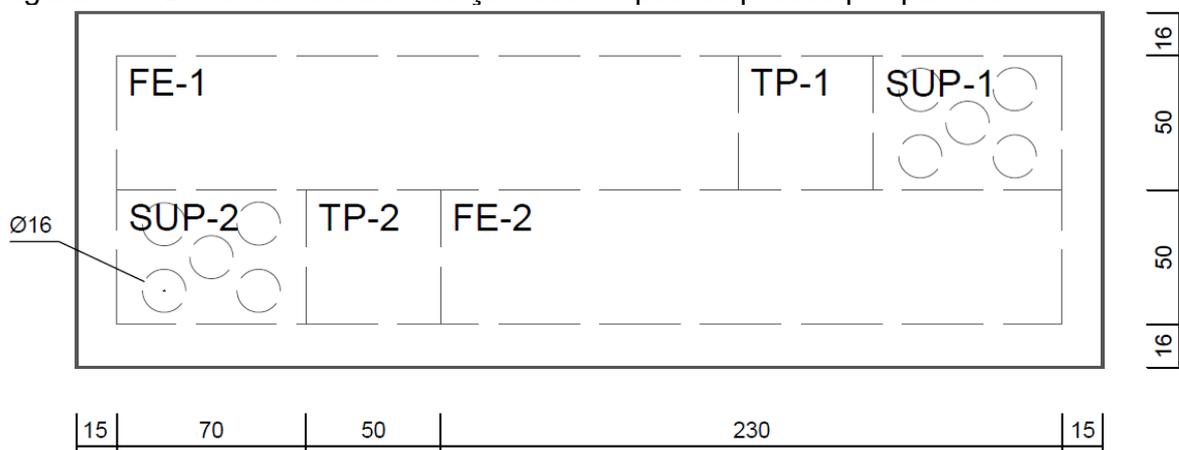
Fonte: Autor (2017).

Esses processos, assim como os da etapa anterior (pesagem e mistura), foram realizados no Laboratório de Painéis de Madeira (LAPAM), no Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas.

4.4.4 Climatização dos painéis e corte dos CPs

Após a prensagem, os painéis foram levados para uma câmara climatizada onde permaneceram em temperatura regulada (20°C) e umidade relativa (65%) controladas por um período de 14 dias. Logo em seguida, foram retirados de cada painel 2 CPs para flexão estática (FE), 2 CPs para tração perpendicular (TP) e 2 CPs para ensaios superficiais (SUP). As dimensões dos painéis em milímetros e a distribuição de retirada dos CPs podem ser vistas na Figura 17.

Figura 17 - Dimensões e distribuição dos corpos de provas por painéis

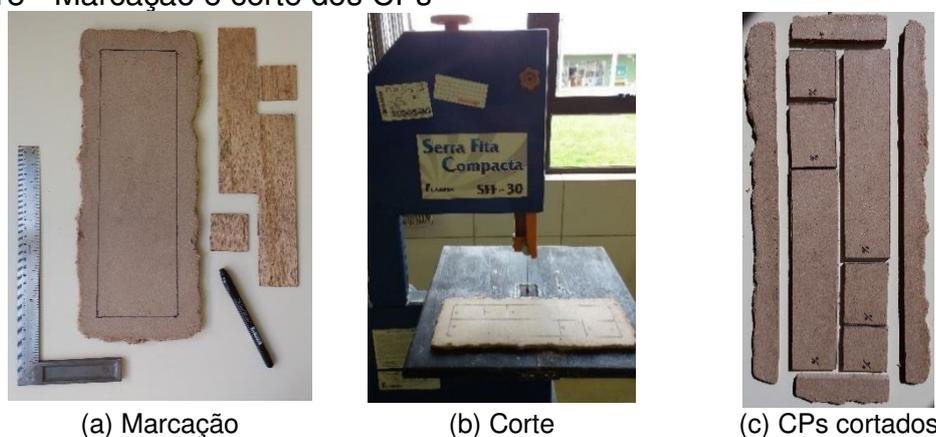


Fonte: Autor (2017).

Vale salientar que as dimensões dos corpos de prova foram definidas pelas normas ABNT NBR 15316-2 (2015) e ABNT NBR ISO 4649 (2014), mas a distribuição dos CPs não levou em consideração essas normas, embora, feita de forma simétrica.

Após a definição das dimensões e quantidades dos corpos de provas (CPs), os mesmos foram traçados nos painéis com auxílio de gabaritos, caneta marcadora e esquadro (Figura 18a). Na sequência, foi executado o corte dos CPs utilizando uma serra fita vertical para madeira (Figura 18b). Por fim, os corpos de prova estavam prontos para serem ensaiados, e as bordas dos painéis foram descartadas (Figura 18c).

Figura 18 - Marcação e corte dos CPs



Fonte: Autor (2017).

A seguir, os corpos de prova foram pesados e suas dimensões mensuradas para a verificação da densidade média.

4.5 Ensaios mecânicos e de superfície

4.5.1 Ensaios mecânicos

4.5.1.1 Resistência à tração Perpendicular

Os ensaios de resistência à tração perpendicular (TP) foram realizados no Laboratório de Metrologia e Ensaios Mecânicos na Universidade Federal do Pampa, em uma máquina universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL 10000. Os procedimentos de ensaio foram de acordo com a norma EN319 (1993).

As faces maiores dos corpos de prova TP foram colados em blocos de madeira que encaixam em um dispositivo de aço fixado na célula de carga de 5 kN (Figura 19a-b). No total, foram ensaiados 16 corpos de provas, quatro por painel.

Figura 19 - Ensaio de tração perpendicular



(a) CPs colados em blocos



(b) Ensaio de tração perpendicular

Fonte: Autor (2017).

A equação 20 foi utilizada para o cálculo da adesão interna (AI):

$$AI = \frac{P}{L \cdot B} \quad (20)$$

Em que: P é a carga máxima em Newton, B é a largura do corpo de prova em mm e L é o comprimento do corpo de prova em mm.

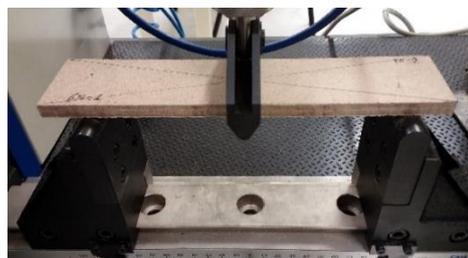
4.5.1.2 Flexão Estática

Os ensaios de flexão estática (FE) também foram realizados no mesmo laboratório, utilizando o mesmo equipamento do ensaio de tração perpendicular. Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com a norma EN310 (1993), porém, o cutelo de aplicação da carga e os apoios não foram em forma de roletes conforme estabelece a norma. Os corpos de provas FE foram apoiados em dois pontos, distantes em 160 mm um do outro, de modo que o cutelo de aplicação de carga acoplado a uma célula de carga de 5 kN coincidisse com o centro do corpo de prova (Figura 20a-b). No total foram ensaiados 16 corpos de provas, quatro por painel.

Figura 20 - Ensaio de flexão estática



(a) CPs



(b) Ensaio de flexão estática

Fonte: Autor (2017).

As equações 21 e 22 foram utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), respectivamente.

$$MOE = \frac{(P40 - P10). D^3}{4. B. E^3. (d40 - d10)} \quad (21)$$

$$MOR = \frac{3. (P. D)}{2. B. E^2} \quad (22)$$

Em que: P é a carga máxima em Newton, $P40$ é a carga correspondente a 40% de P , $P10$ é a carga correspondente a 10% de P , D é a distância entre apoios no ensaio de flexão em milímetros, B é a largura do corpo de prova em mm, E é a espessura do corpo de prova em mm, $d40$ é a deflexão correspondente a $P40$ e $d10$ é a deflexão correspondente a $P10$.

4.5.1.3 Dureza Shore D

Para a medição da dureza, foi utilizado um durômetro portátil SHORE D marca Instrutherm modelo DP400, indicado para polímeros, no centro do corpo de prova SUP. Foram feitas 2 medições por corpo de prova, em ambos os lados, totalizando 32 medições.

4.5.2 Ensaios superficiais

4.5.2.1 Rugosidade

Foram analisados alguns parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) nos dois sentidos (transversal e longitudinal) no centro dos corpos de provas SUP. Para tanto, foi utilizado um rugosímetro marca TIME modelo TR200 (Figura 21). O cut-off utilizado foi de 2,5 mm com comprimento de amostragem de 12,5 mm. Foram feitas 2 medições de rugosidade por corpo de prova, totalizando 32 medições.

Figura 21 - Análise da rugosidade



Fonte: Autor (2017).

4.5.2.2 Ensaio de abrasão

A proposta inicial desse trabalho foi retirar cinco amostras cilíndricas nos corpos de prova SUP para o ensaio de abrasão. As marcações observadas no corpo de prova da Figuras 22 foram feitas para auxiliar no corte destas amostras. No entanto, durante o corte por meio de uma serra copo multi-função (Figura 22a), somente as amostras dos painéis sem nanocelulose (P0) ficaram íntegras (Figura 22b). Para as amostras dos painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6), houve desintegração de algumas amostras próximo à borda dos corpos de prova (Figura 22c). Portanto, somente foram considerados as amostras do centro de cada corpo de prova SUP, totalizando 16 amostras (1 por corpo de prova SUP).

Figura 22 - Corte dos CPs para ensaio de abrasão



(a) Serra copo



(b) Amostras íntegras



(c) Amostras desintegradas

Fonte: Autor (2017).

As amostras circulares retiradas foram pesadas em uma balança mecânica de precisão marca Sartorius. A espessura e o diâmetro foram mensurados por meio de um paquímetro com resolução 0,05 mm.

Para a determinação da resistência à abrasão foi utilizado o equipamento pino-tambor (Figura 23a), marca *Veb Thüringer Industrie Werkuensteine*, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4649 (2014). Esse equipamento se encontra no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Rio Grande.

A distância de deslizamento do equipamento foi 40 metros e a força normal empregada no corpo de prova foi de 10 N. A lixa abrasiva de óxido de alumínio (Al_2O_3) com tamanho de grão 600 do fabricante Vitek VSM foi fixada na superfície do tambor antes dos testes. Cada corpo de prova foi testado em ambas as faces opostas, resultando em um total de 32 testes. Para cada corpo de prova foi utilizada uma nova lixa e a superfície da amostra foi alinhada a 3 mm da borda do porta amostra, como mostra a Figura 23b.

Figura 23 - Equipamento pino-tambor para ensaio de desgaste abrasivo



Fonte: Autor (2017).

Após a realização de cada ensaio, os corpos de provas foram cuidadosamente limpos por meio de um pincel e pistola de ar comprimido, e pesados novamente. Para o cálculo da taxa de desgaste, foi utilizada a Equação 23:

$$Q = \frac{\Delta m}{d \cdot F} \left(\frac{Kg}{m \cdot N} \right) \quad (23)$$

Em que, Δm é a perda de massa, d é a distância de deslizamento e F é a força normal imposta ao corpo de prova.

4.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram separadas amostras íntegras que não foram submetidas ao ensaio abrasivo (amostras próximas à borda do CP) e amostras que foram submetidas a abrasão (amostras centrais de cada CP). As superfícies foram recobertas com ouro e analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com alta e baixa magnificação sob uma tensão de 15 kV para a observação de mecanismos de desgaste. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM6610 LV no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME SUL) da Universidade Federal do Rio Grande.

4.6 Análise estatística

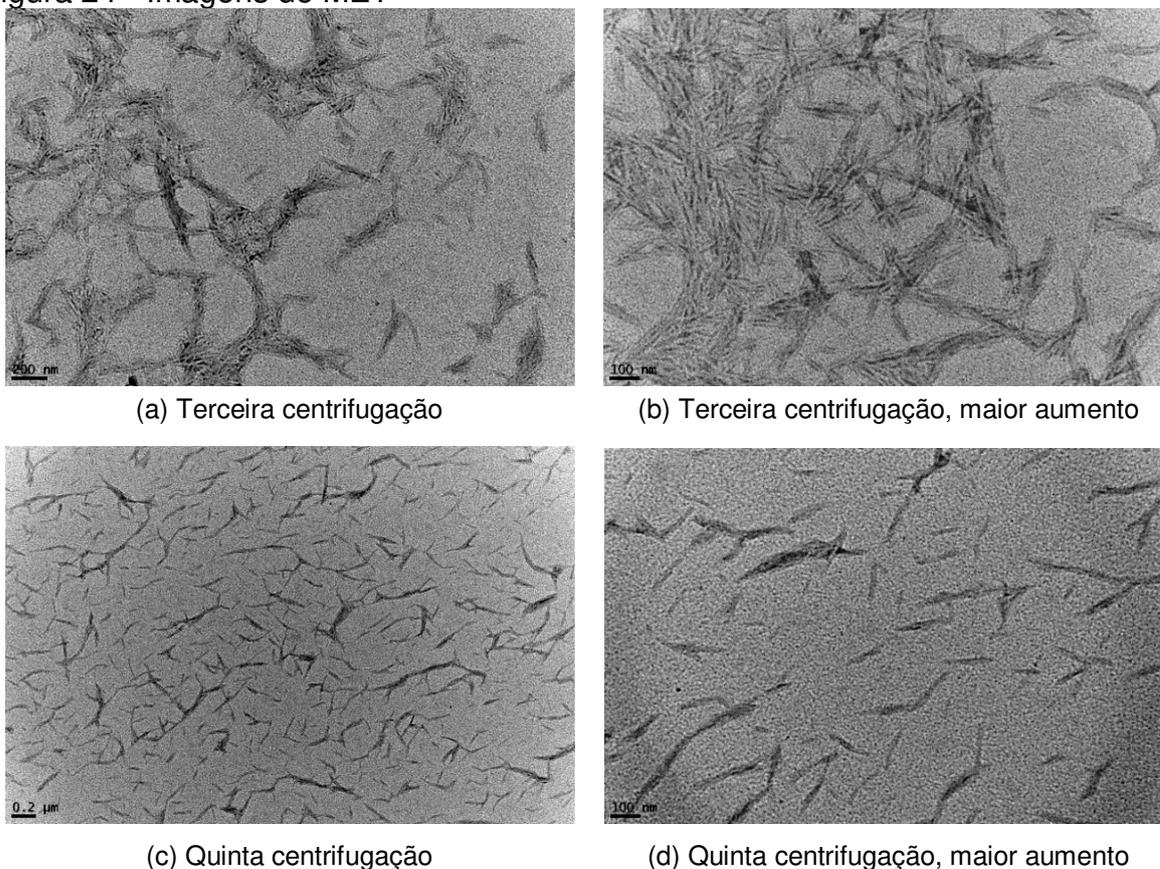
A análise estatística foi efetuada em cada conjunto de dados com a finalidade de verificar as diferenças existentes entre as médias calculadas (APÊNDICES A - I). Os dados foram submetidos à análise de variância – ANOVA, com aplicação do teste *Tukey* em nível de 5% de probabilidade de erro para comparação de diferenças entre as médias. Para as análises foi utilizado o software *Action Stat* versão 3.1, que atua como suplemento ao software de planilhas eletrônicas *Microsoft Excel*. Todos os cálculos estatísticos do *Action* são baseados na plataforma R.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Imagens de microscopia eletrônica de transmissão e pH

Os primeiros resultados foram imagens obtidas a partir do microscópio eletrônico de transmissão do sobrenadante retirado da terceira e quinta centrifugação da nanocelulose. A Figura 24 mostra imagens: (a) da terceira centrifugação; (b) da terceira centrifugação com maior aumento; (c) da quinta centrifugação e; (d) da quinta centrifugação com maior aumento.

Figura 24 - Imagens de MET



Fonte: Autor (2017).

Pode se observar a diferença quanto à dispersão dos nanocristais entre a terceira centrifugação e a quinta centrifugação. Isso pode ter acontecido devido à diferença de pH com o número de centrifugações (Tabela 9). No trabalho de Kaushik et al. (2014) foi observada a mesma dispersão dos NCC com pH de 3,5.

A nanocelulose utilizada foi a da quinta centrifugação devido a sua melhor dispersão. Não foi possível fazer um número maior de centrifugações (>5) pelo fato de que houve maior perda de nanocelulose no sobrenadante, resultando em baixo rendimento e menor teor de sólidos da nanocelulose obtida.

Tabela 9 - pH com o número de centrifugações

Números de centrifugações	pH
1	0,57
3	1,94
4	2,39
5	3,54

Fonte: Autor (2017).

5.2 Componentes de fabricação

Os resultados dos parâmetros para os cálculos dos componentes utilizados na fabricação dos painéis são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos componentes de fabricação

Componente	TS (%)	TFG a quente (s)	TFG a frio (s)	TUF (%)
Nanocelulose	11,67	363	Não polimerizou	--
Resina	67,6	--	--	--
Sulfato de amônio	24,0	--	--	--
Fibras de madeira (P0)				2,8
Fibras de madeira (P2, P4 e P6)	--	--	--	1,55

Fonte: Autor, 2017.

Os parâmetros TS e TUF foram utilizados nos cálculos para a fabricação dos painéis considerando-se o peso seco dos componentes. O parâmetro TFG a frio foi utilizado para a confirmação de que a resina com a maior quantidade de nanocelulose (6%) não polimeriza durante a mistura dos componentes antes da prensagem. Já o TFG a quente foi utilizado para a confirmação da polimerização da resina após a prensagem.

5.3 Cálculo das quantidades

A Tabela 11 mostra os resultados dos cálculos realizados para as quantidades dos componentes em cada painel, conforme as equações mostradas na metodologia.

Tabela 11 - Quantidades de componentes por painel

Componente	Variável calculada	Quantidade (g)			
		P0	P2	P4	P6
Fibras de Eucalipto	QF	302,40	298,74	298,74	298,74
Resina	QR	52,22	52,22	52,22	52,22
Nanocelulose	QAR	0	4,88	9,76	14,64
Sulfato de amonio	QC	2,94	2,94	2,94	2,94
Água adicionada	QH	8,50	11,52	7,21	2,90

Fonte: Autor (2017).

Um fator importante de se observar é a diferença entre QF do painel P0 em relação aos outros painéis. Isso está relacionado à diferença de TUF. Para os painéis

P0 sem nanocelulose, o TUF calculado foi de 2,8%. No entanto, para os painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6) o TUF calculado foi de 1,55%.

Da mesma forma, pode-se observar que a quantidade de água adicionada (QH) nos painéis diminui com o aumento da quantidade de nanocelulose. Isso está relacionado ao fato de que o teor de sólidos da nanocelulose obtida foi baixo (TS = 11,67%), isso é, quanto maior a quantidade de nanocelulose no sistema, maior a quantidade de água na mistura e menos água a ser adicionada (QH). Essa limitação impediu de fabricar painéis com maiores teores de nanocelulose, devido a tendência de QH tornar-se negativo e a necessidade de retirar água do sistema.

5.4 Densidade dos corpos de prova

Pode-se observar na Tabela 12 que o valor de densidade média obtida foi de $0,7 \pm 0,05$ g/cm³, menor que o valor estipulado nos cálculos da Tabela 7, que foi de 0,8 g/cm³.

Tabela 12 - Densidade média dos corpos de prova

CP	Painel				Total
	P0	P2	P4	P6	
TP	$0,72 \pm 0,04$	$0,74 \pm 0,03$	$0,73 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,02$	$0,73 \pm 0,03$
FE	$0,71 \pm 0,03$	$0,73 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,02$	$0,72 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,02$
SUP*	$0,72 \pm 0,07$	$0,67 \pm 0,05$	$0,64 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,04$	$0,66 \pm 0,06$
TOTAL	$0,72 \pm 0,05$	$0,71 \pm 0,04$	$0,70 \pm 0,05$	$0,69 \pm 0,05$	$0,70 \pm 0,05$

*Corpo de prova cilíndrico para o ensaio de abrasão

Fonte: Autor (2017).

Um dos possíveis fatores que contribuíram para a densidade menor que a esperada foi o espalhamento das fibras durante a prensagem, determinando que a mesma massa de fibras fosse dispersada por uma área maior que a planejada para o painel (380 X 132 mm), sendo o mesmo fato descrito por outros autores (SHUPE et al., 1999; ELEOTÉRIO, 2000; FERREIRA, 2010). Ferreira (2010) também relata fatores como as perdas na mistura e o aumento da espessura dos painéis após a retirada da prensa.

5.5 Propriedades mecânicas

5.5.1 Resistência a tração perpendicular

Os resultados dos valores de adesão interna resultantes dos ensaios de resistência a tração perpendicular são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração perpendicular

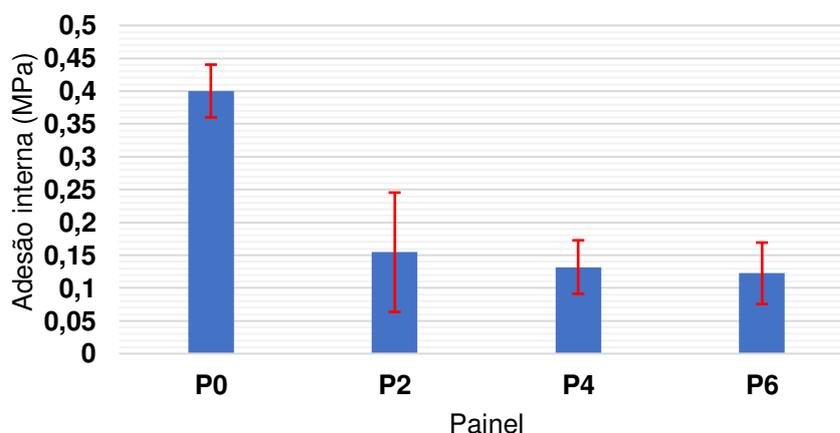
Painel	Adesão interna* (MPa)	Desvio padrão
P0	0,40 a	0,04
P2	0,15 b	0,09
P4	0,13 b	0,04
P6	0,12 b	0,05

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste *Tukey*.

Fonte: Autor (2017).

A Figura 25 mostra o gráfico de barras dos resultados, onde é possível observar que a resistência a tração perpendicular (adesão interna) nos painéis sem nanocelulose (P0) foi significativamente maior que os painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6). Isso indica que a adição de nanocelulose não proporcionou uma boa ligação entre a resina UF e as fibras de madeira, tendo como causa provável a baixa dispersão da resina devido a tendência de aglomeração da nanocelulose. A ANOVA confirmou diferenças significativas entre a média do painel P0 com as médias dos painéis P2, P4 e P6 (APÊNDICE A).

Figura 25 - Gráfico dos resultados do ensaio de tração perpendicular



Fonte: Autor (2017).

5.5.2 Flexão estática

Os resultados dos ensaios de flexão estática são mostrados na Tabela 14, onde constam os valores obtidos do módulo de elasticidade e módulo de ruptura.

Tabela 14 - Resultados do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura

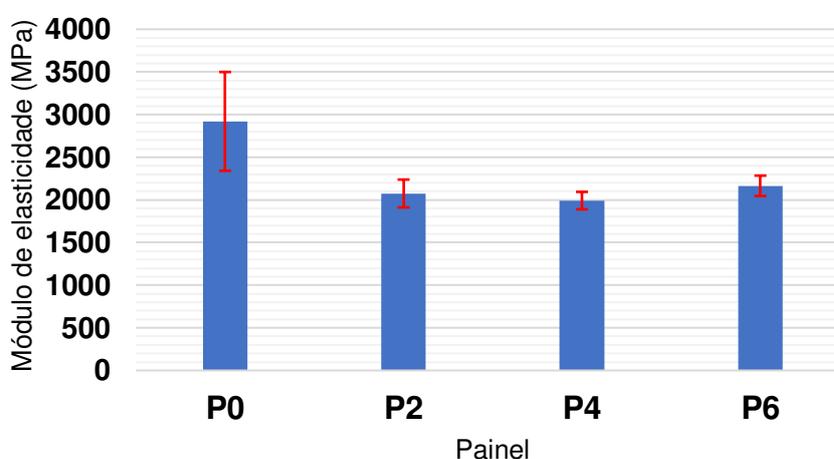
Painel	Módulo de elasticidade* (MPa)	Desvio padrão	Módulo de ruptura* (MPa)	Desvio padrão
P0	2920,33 a	579,05	25,90 a	5,65
P2	2074,77 b	163,38	16,43 b	1,35
P4	1991,61 b	102,47	13,00 b	1,38
P6	2164,94 b	119,54	17,47 b	1,82

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste *Tukey*.

Fonte: Autor (2017).

A Figura 26 mostra o gráfico de barras dos resultados do módulo de elasticidade (MOE) onde é possível observar que os painéis sem nanocelulose (P0) obtiveram valores significativamente maiores que os painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6). Os resultados indicam uma maior rigidez dos painéis P0, pela razão entre a carga suportada e a deformação elástica apresentada (d40 – d10). Isso ocorreu em concordância com os resultados de tração perpendicular, visto que os painéis P0 apresentaram uma maior ligação interna e conseqüentemente uma maior carga suportada. A ANOVA confirmou diferenças significativas entre a média do painel P0 com as médias dos painéis P2, P4 e P6 (APÊNDICE B).

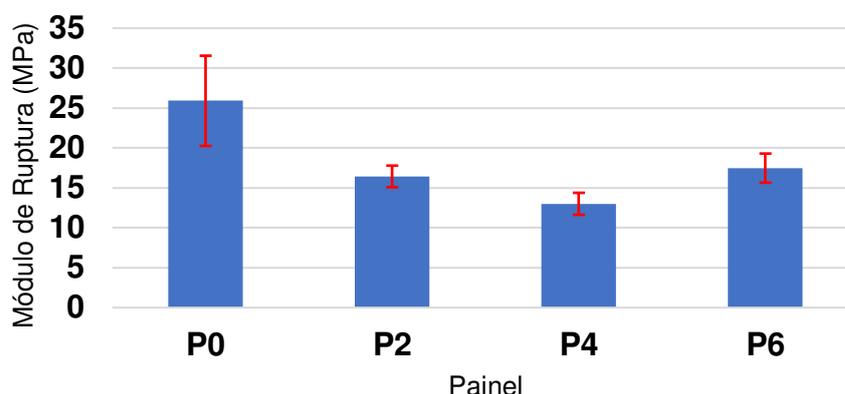
Figura 26 - Gráfico dos resultados do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2017).

Do mesmo modo, a Figura 27 mostra o gráfico de barras dos resultados do módulo de ruptura (MOR) onde é possível observar o mesmo comportamento do gráfico da Figura 26. O MOR também conhecido como resistência a flexão estática não leva em consideração a deformação do corpo de prova, o que indica que a redução no MOR dos painéis com nanocelulose foi preponderantemente devido a menor carga máxima suportada no ensaio de flexão, o que confirma a hipótese de que a nanocelulose contribuiu para a redução da ligação entre a resina e as fibras observada no ensaio de tração perpendicular (Figura 25). A ANOVA confirmou diferenças significativas entre a média do painel P0 com as médias dos painéis P2, P4 e P6 (APÊNDICE C). Embora não constatado estatisticamente pelo teste de ANOVA as diferenças significativas entre as médias dos painéis P2-P4 e P4-P6, pode-se notar graficamente na Figura 27, a diminuição do MOR com o aumento de nanocelulose de 2% para 4% e, o aumento do módulo de ruptura com o aumento da nanocelulose de 4% para 6%.

Figura 27 - Gráfico dos resultados do módulo de ruptura



Fonte: Autor (2017).

Em concordância com os resultados dos ensaios de tração perpendicular, os resultados médios do módulo de elasticidade e módulo de ruptura para os painéis sem nanocelulose (P0) foram significativamente maiores que os resultados dos painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6). Porém, os resultados do módulo de ruptura mostraram graficamente por desvio padrão diferenças entre P4 com P2 e P6 (Figura 27). Isso pode indicar uma tendência de diminuição do MOR com pequenas quantidades de nanocelulose (2% e 4%) onde o efeito preponderante é a baixa a dispersão da resina. Por outro lado, pode indicar também uma tendência de aumento do MOR com o aumento da quantidade de nanocelulose (6%), onde o efeito de reforço começa a ser significativo. Embora existam essas hipóteses, o teste de ANOVA não as comprovam estatisticamente..

5.5.3 Dureza Shore D

Os resultados da dureza (Tabela 15 e Figura 31) mostraram que os painéis P2 e P4 apresentaram valores médios mais baixos do que os painéis sem nanocelulose P0. No entanto, os resultados dos painéis P6 foram próximos aos painéis sem nanocelulose P0. A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as médias dos painéis P0 com P2 e P4 e não confirmou diferenças significativas entre os painéis P6 com os painéis P0, P2 e P4. (APÊNDICE D).

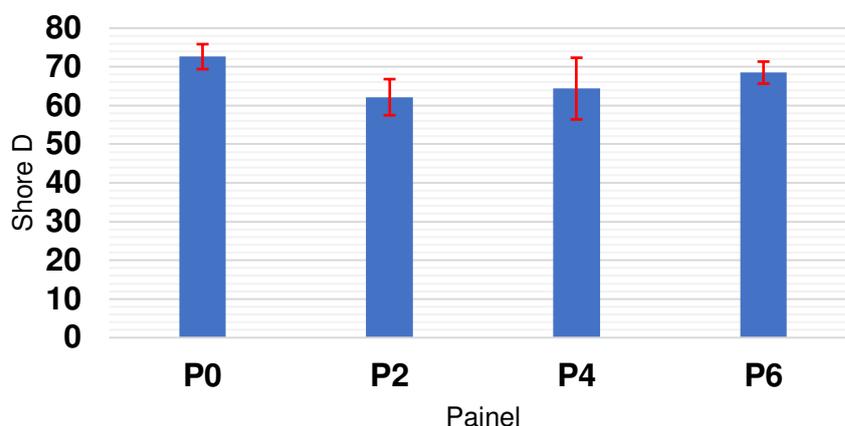
Tabela 15 - Resultados da dureza Shore D

Painel	Shore D*	Desvio padrão
P0	72,63 a	3,22
P2	62,15 b	4,67
P4	64,38 b	7,98
P6	68,50 ab	2,85

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste *Tukey*.

Fonte: Autor (2017).

Figura 28 - Gráfico dos resultados da dureza



Fonte: Autor (2017).

5.6 Características superficiais

5.6.1 Rugosidade

A Tabela 16 mostra os resultados médios dos parâmetros de rugosidade média (Ra), rugosidade quadrática média (Rq), largura média do espaçamento dos elementos de perfil (Rsm) e fator de simetria skewness do perfil (Rsk).

Tabela 16 - Resultados dos parâmetros de rugosidade

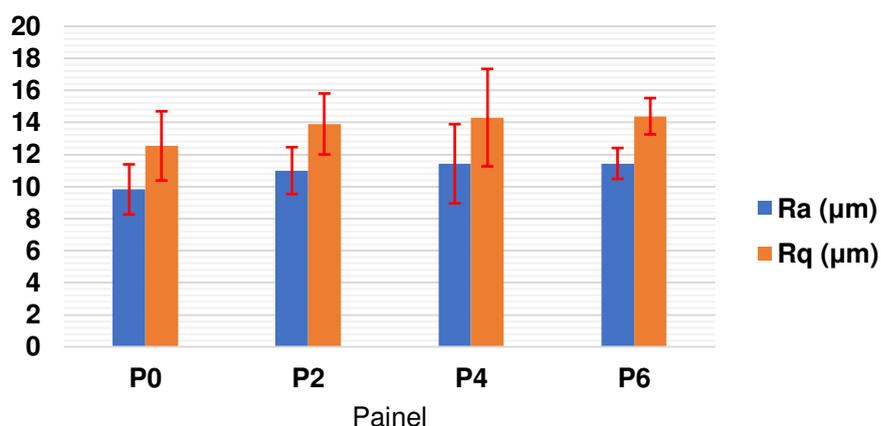
Painel	Ra^* (μm)	Desvio padrão	Rq^* (μm)	Desvio padrão	Rsm^* (mm)	Desvio padrão	Rsk^*	Desvio padrão
P0	9,82 a	1,56	12,54 a	2,16	0,26 a	0,03	-0,46 a	0,32
P2	10,99 a	1,46	13,90 a	1,90	0,38 a	0,18	-0,30 a	0,38
P4	11,42 a	2,47	14,30 a	3,04	0,32 a	0,06	-0,26 a	0,46
P6	11,44 a	0,96	14,39 a	1,13	0,31 a	0,03	-0,14 a	0,43

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste *Tukey*.

Fonte: Autor (2017)

A Figura 28 compara os resultados dos parâmetros Ra e Rq por meio de um gráfico de barras. Embora os resultados da ANOVA não tenham indicado diferenças significativas (APÊNDICES E-F), pode-se observar que os resultados das médias indicam um ligeiro aumento linear da altura das asperezas com o aumento da incorporação de nanocelulose. Esses resultados podem indicar uma maior quantidade de espaço vazios nos painéis com nanocelulose e regiões menos uniformes o que acarreta uma amplitude maior da altura das asperezas.

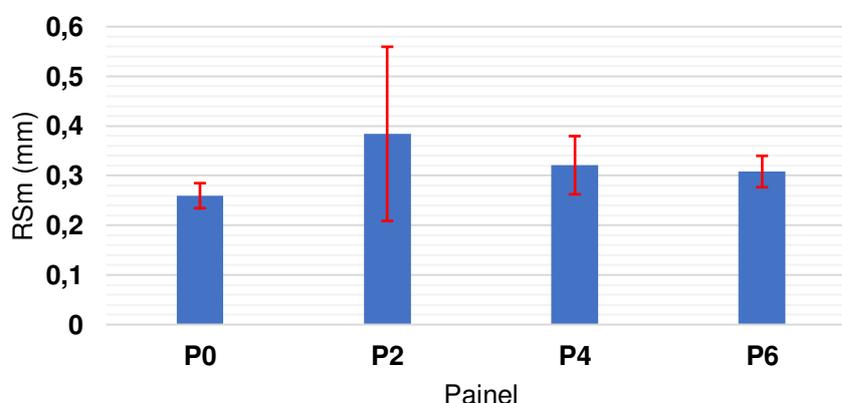
Figura 29 - Gráfico dos resultados das rugosidades Ra e Rq



Fonte: Autor (2017).

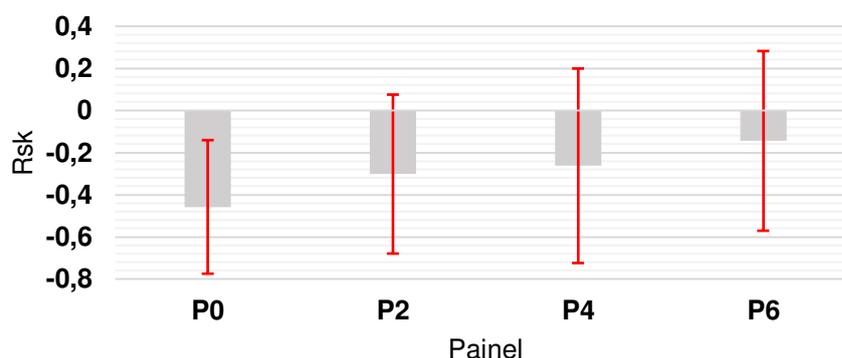
Os resultados do parâmetro Rsm (Figura 29), também, não apresentaram diferenças significativas entre os painéis (APÊNDICE G), mas uma maior dispersão dos resultados foi observada com a incorporação da nanocelulose, sugerindo superfícies menos uniformes, principalmente no painel P2, onde o desvio padrão foi significativamente maior que o desvio padrão do painel P0.

Figura 30 - Gráfico dos resultados da rugosidade Rsm



Fonte: Autor (2017).

Os resultados do parâmetro Rsk , que está associado à assimetria da curva de distribuição de altura, não apresentaram diferenças significativas por ANOVA (APÊNDICE H). As médias dos resultados de Rsk (Figura 30) sempre foram valores negativos, indicando a presença de uma topografia tipo platô-vale e poucos picos pontiagudos que se desgastam facilmente. Também é possível observar que com o aumento da incorporação de NCC nos painéis P2, P4 e P6, os resultados tendem a se tornar um pouco menos negativos, mostrando uma redução na presença de vales na topografia, apesar dessas diferenças não serem estatisticamente significativas.

Figura 31 - Gráfico dos resultados da rugosidade *Rsk*

Fonte: Autor (2017).

5.6.2 Desgaste abrasivo

Foram analisados os resultados das taxas de desgaste na Tabela 17 e no gráfico da Figura 32. A ANOVA não mostrou diferenças significativas entre as médias (APÊNDICE I). Porém, com a análise somente dos resultados médios, sem considerar ANOVA e o desvio padrão, o gráfico de barras apresentou uma menor taxa de desgaste com a adição de pequenas quantidades de nanocelulose (P2). Para os painéis com maiores quantidades de nanocelulose (P4 e P6), as médias foram comparáveis aos dos painéis sem nanocelulose (P0).

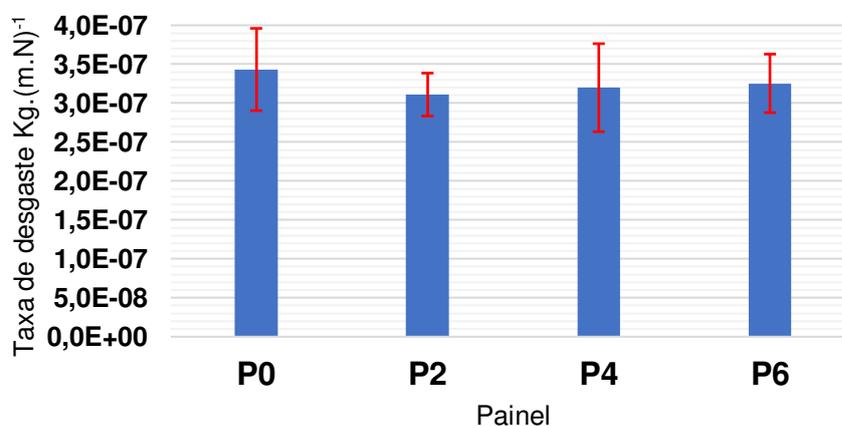
Tabela 17 - Resultados da taxa de desgaste

Painel	Taxa de desgaste* (kg/(m.N))	Desvio padrão
P0	3,43E-07 a	5,28E-08
P2	3,11E-07 a	2,76E-08
P4	3,20E-07 a	5,65E-08
P6	3,25E-07 a	3,76E-08

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si em nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Autor (2017).

Figura 32 - Gráfico dos resultados da taxa de desgaste



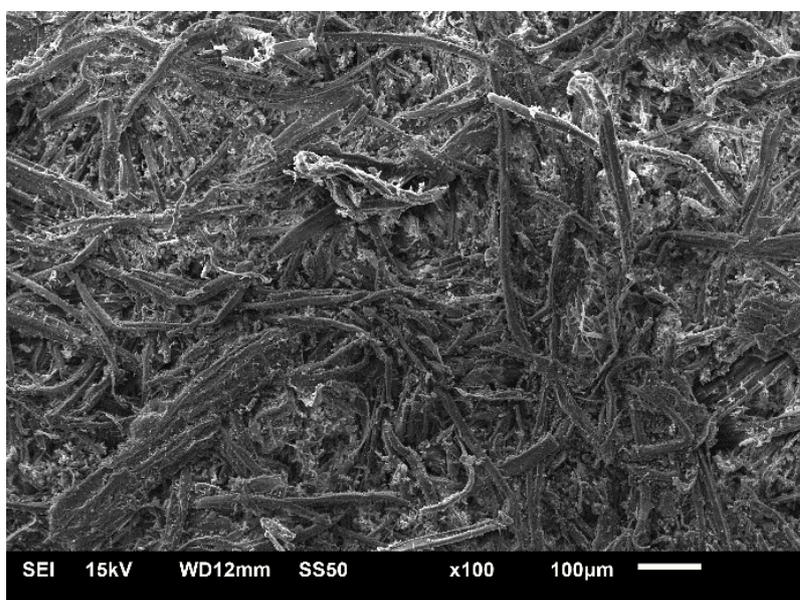
Fonte: Autor (2017).

Os mecanismos de desgaste analisados na seção seguinte por microscopia eletrônica de varredura podem explicar melhor os resultados da taxa de desgaste.

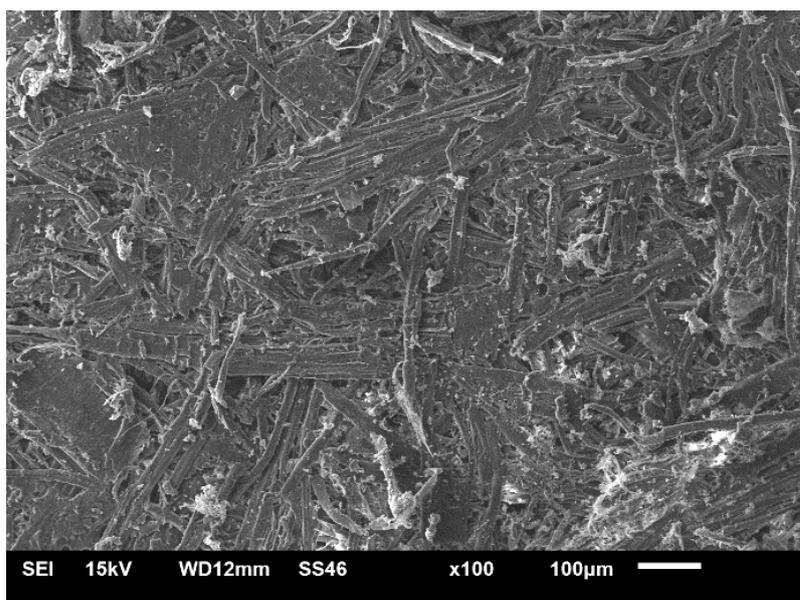
5.6.3 Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens MEV dos painéis mostraram alguns efeitos da incorporação da nanocelulose no desgaste das amostras. A Figura 33 mostra imagens de elétrons secundários (SE) de amostras antes do ensaio de desgaste, sem nanocelulose – P0 (a) e com nanocelulose – P2 (b).

Figura 33 - MEV de amostras antes do ensaio de abrasão



(a) P0, antes do ensaio de abrasão



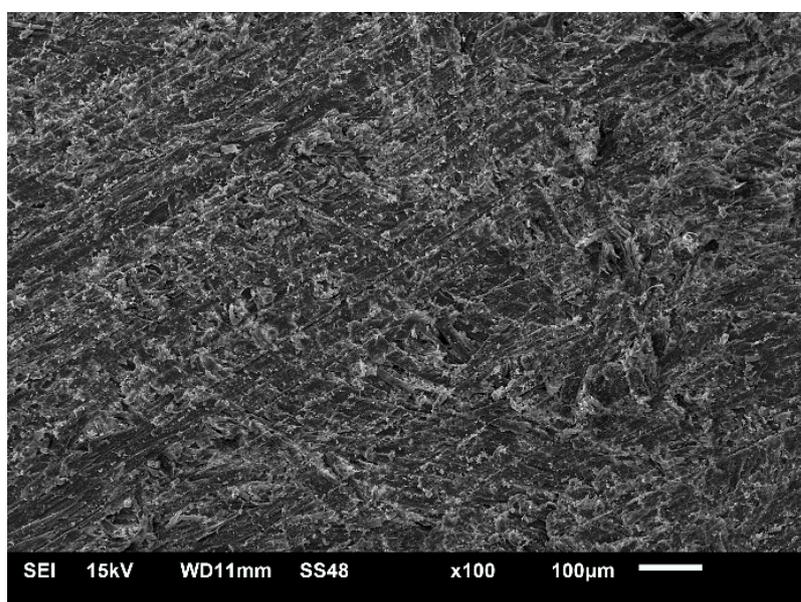
(b) P2, antes do ensaio de abrasão

Fonte: Autor (2017).

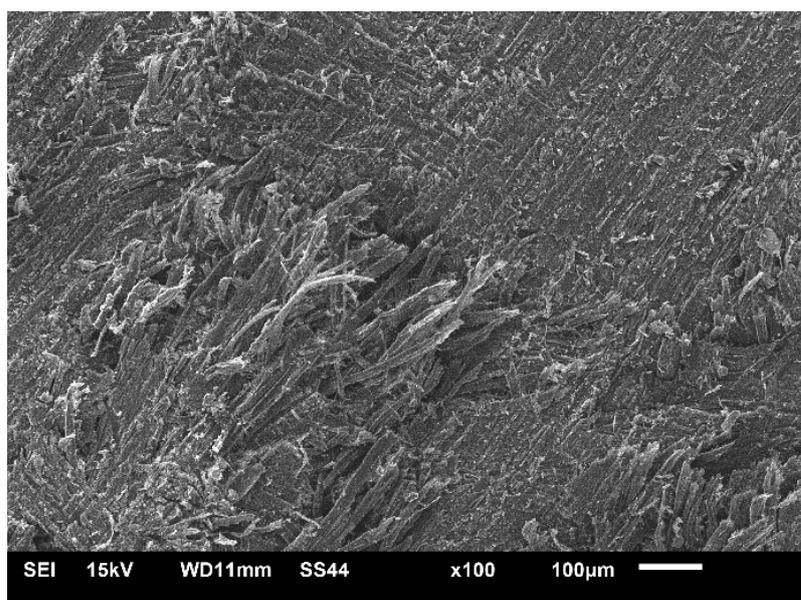
Comparando a Figura 33a e 33b, a incorporação de nanocelulose produziu fibras menos “embaladas” pela resina UF e regiões menos uniformes. Além disso, observa-se um menor entrelaçamento entre as fibras com a adição de nanocelulose.

A Figura 34 mostra imagens de amostras após o ensaio de abrasão sem nanocelulose (a) e com nanocelulose (b). Na Figura 34a pode ser observado que o desgaste abrasivo se deu principalmente por microcorte. No entanto, na Figura 34b, foram observadas regiões onde o desgaste se deu por arrancamento das fibras, provavelmente, nas regiões onde as fibras não estavam “embaladas” pela resina.

Figura 34 - MEV de amostras depois do ensaio de abrasão



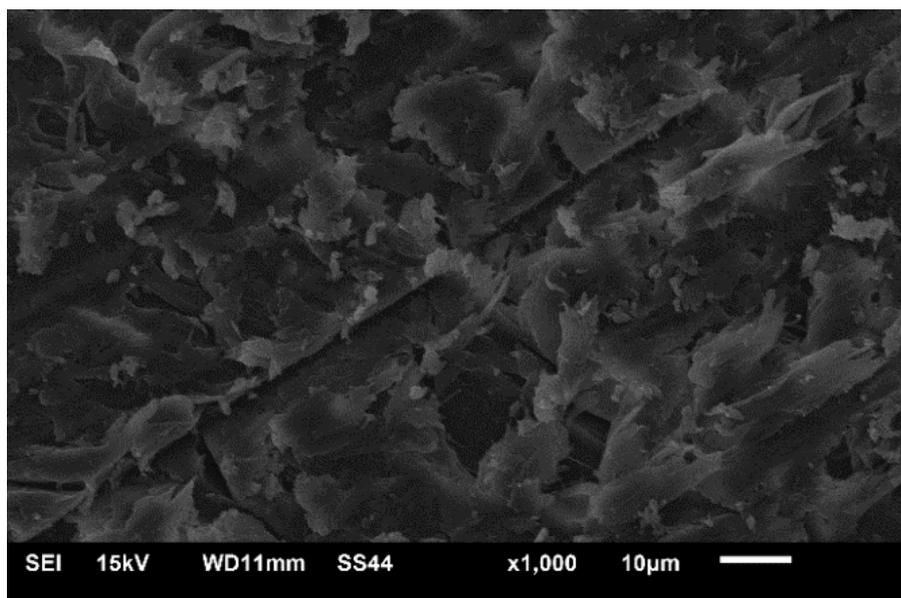
(a) P0, depois do ensaio de abrasão



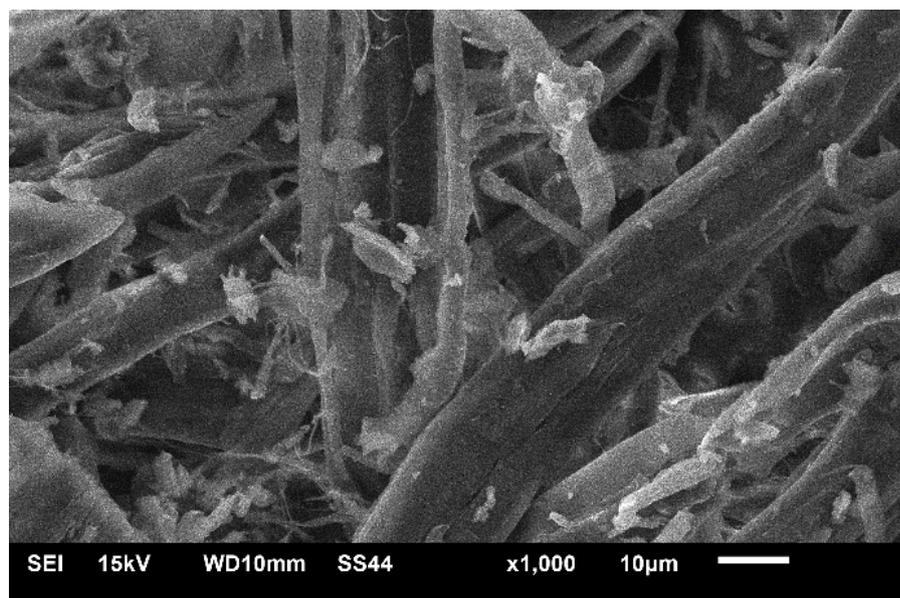
(b) P2, depois do ensaio de abrasão

Observando-se esses corpos de prova desgastados com maior aumento, foi possível observar melhor os riscos e eventuais trincamentos para todos os painéis após os testes de abrasão (Figura 35a-b). Essas imagens, também, mostram que com a presença de nanocelulose existem áreas substanciais de desgaste severo, mostrando que a adesão das fibras foi gravemente deteriorada e as fibras foram arrancadas (Figura 35b).

Figura 35 - MEV de amostras desgastadas com maior aumento



(a) P0, depois do ensaio de abrasão com maior aumento



(b) P2, depois do ensaio de abrasão com maior aumento

Fonte: Autor (2017).

A incorporação de nanocelulose parece reduzir a ligação entre as fibras, que se sobressaem facilmente da superfície. Outros autores também observaram um

mecanismo similar de fibras “arrancadas” em compósitos de fibra de madeira quando a adesão entre as fibras foi comprometida (SWAIN; BISWAS, 2017).

No entanto, as taxas de desgaste dos painéis reforçados com nanocelulose não foram maiores do que os painéis sem nanocelulose. Na verdade, elas foram ligeiramente mais baixas, como mostra a Figura 32. Isso pode ser justificado porque, embora o mecanismo de desgaste fosse mais severo com a incorporação da nanocelulose, as áreas desgastadas não eram uniformes. Essas áreas não uniformes mostram o arrancamento de fibras da superfície, de modo que as áreas mais baixas não entraram em contato com o tambor abrasivo completamente. Embora isso provavelmente tenha aumentado a pressão de contato na área saliente, o efeito geral parece ser reduzir ligeiramente a perda de massa total.

Quando os painéis foram incorporados com uma pequena quantidade de NCC, as áreas salientes foram maiores. À medida que a quantidade de NCC aumentava, as áreas salientes diminuía e o comportamento era mais parecido com o apresentado pelos painéis sem incorporação de nanocelulose.

Embora alguns estudos apresentados neste trabalho indicam a influência da rugosidade superficial no coeficiente de atrito e, conseqüentemente, na taxa de desgaste, não é possível confirmar essa influência neste trabalho devido a inexistência de diferenças significativas por meio do teste estatístico ANOVA - *Tukey*. Apesar disso, o que foi apresentado nessa seção foram hipóteses com base nas análises de MEV das amostras não desgastadas e desgastadas. Um indicio importante que reforça essas hipóteses é que durante o processo de extração das amostras (furação por serra copo), as amostras dos painéis com nanocelulose (P2, P4 e P6) se desintegraram, devido a descontinuidade da matriz UF - fibras.

6 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas e nos resultados avaliados durante o desenvolvimento desse trabalho é possível apresentar as seguintes conclusões:

- A incorporação de nanocelulose em baixas quantidades afetou negativamente a adesão das fibras nos painéis, reduzindo a continuidade da matriz UF;
- Os resultados dos ensaios de tração perpendicular, flexão estática e dureza mostraram que a resistência mecânica dos painéis com nanocelulose diminuiu significativamente. No entanto, os resultados de dureza dos painéis P6 não apresentaram diferenças significativas dos painéis P0;
- Para as características superficiais avaliadas (rugosidade e taxa de desgaste) as diferenças não foram significativas, porém, foi observado um ligeiro aumento das médias nos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rsk com o aumento da incorporação nanocelulose nos painéis. O parâmetro Rsm apresentou uma grande dispersão no painel P2, indicando superfícies menos uniformes nos painéis com 2% de nanocelulose;
- Aparentemente, a adição de uma pequena quantidade de nanocelulose produz painéis menos homogêneos, reduzindo a resistência mecânica. Quando a quantidade de nanocelulose aumenta, a dureza (estatisticamente) e módulo de ruptura (graficamente) aumentam;

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora esse trabalho tenha apresentado efeitos negativos da incorporação da nanocelulose em painéis MDF, a apresentação de possibilidades de aumento de algumas características tecnológicas, poderá viabilizar o uso da nanocelulose, desde que a matriz UF resultante do processo de fabricação seja contínua.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para continuidade desse trabalho são:

- Otimizar e aperfeiçoar o processo de fabricação para a obtenção de painéis MDF com uma matriz UF-NCC contínua;
- Obter nanocelulose com teor de sólidos superior a 15%, o que possibilita o aumento da percentagem da incorporação da nanocelulose nos painéis;
- Alterar o método de aplicação da nanocelulose, pois com o método utilizado nesse trabalho não é possível misturar por pulverização a nanocelulose com teor de sólidos superior a 15%, devido ao entupimento da mistura na pistola de pulverização; e
- Utilizar a nanocelulose como reforço das fibras de painéis MDF, antes do processo de mistura das fibras com a resina.

REFERÊNCIAS

- ALEMDAR, A.; SAIN, M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. **Bioresource technology**, v. 99, n. 6, p. 1664-1671, 2008.
- ALESSANDRINI, A.; FACCI, P. AFM: a versatile tool in biophysics. **Measurement science and technology**, v. 16, n. 6, p. R65, 2005.
- ALEXANDRE, M.; DUBOIS, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 28, n. 1, p. 1-63, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037**. International Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. ASTM International, 1999.
- ANGLES, M. N.; DUFRESNE, A. Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposites. 1. Structural analysis. **Macromolecules**, v. 33, n. 22, p. 8344-8353, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-1**: Chapas de fibras de média densidade. Parte 1: Terminologia. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2**: Chapas de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288**. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil– Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4649**. Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Determinação da resistência a abrasão usando um dispositivo de tambor cilíndrico rotativo. 2014.
- ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **AGEFLOR**. A indústria de base florestal no Rio Grande do Sul. Ano base 2016. Porto Alegre, RS, 2017.
- BALLONI, C. J. V. **Caracterização física e química da madeira de Pinus elliottii**. 2009. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual de São Paulo, Itapeva.
- BELINI, U. L. et al. Efeito do desfibramento da madeira de *Eucalyptus grandis* na morfologia das fibras e propriedades de painéis MDF. **CERNE**, v. 14, n. 3, 2008.

BELINI, U. L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF.** 2007. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo.

BENADUCE, C. **Fabricação de painéis de média densidade (MDF) a partir de fibras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari.** 1998. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

BRINO, H. R. H. et al. **Estudo preliminar para viabilidade de aplicação da ACV: Mapeamento de Processo Produtivo do painel MDF.** XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2012.

BRITO, B. S. L. et al. Preparation, morphology and structure of cellulose nanocrystals from bamboo fibers. **Cellulose**, v. 19, n. 5, p. 1527-1536, 2012.

CALDEIRA, M. S. **Produção de nanocompósito utilizando diferentes fontes de celulose como reforço.** 2014. Dissertação de mestrado. UNESP, 2014.

CAMPOS, C. I. **Produção e caracterização físico-mecânica de MDF a partir de fibras de madeira de reflorestamento e adesivos alternativos em diferentes teores.** 2005. Tese de Doutorado. Tese. São Carlos: Universidade de São Paulo.

CAMPOS, C.I.; LAHR, F. A. R. Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de pinus e de eucalipto utilizando uréia-formaldeído. **Matéria**, v. 9, n. 1, p. 32-42, 2004.

CARDOSO, G.V.; PEREIRA, F. T.; FERREIRA, E. S.; LOPES, M. C.; ZANATTA, P.; MELLO, L.R.D.S. **Nanocelulose como catalisador de ureia-formaldeído para produção de painéis aglomerados de pinus sp.** XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Brasil, 2016

CASTRO, E. M. **Estudo da usinabilidade de chapas MDF (Medium Density Fiberboard) para usinagem de desbaste e acabamento.** 2000. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo.

CELLUFORCE. Disponível em: <http://www.celluforce.com/> Acesso em: 8 abr. 2017.

CHIPANSKI, E. R. **Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

CHIROMITO, E. M. S. et al. Propriedades mecânicas de painéis produzidos com lascas de madeira em três diferentes comprimentos. **Scientia Forestalis / Forest Sciences**, 2016.

COELHO, D. **Estudo sistemático da composição química das fibras de Arundo donax e a sua evolução durante a produção de pasta de papel através do processo organosolv**. 2006. Dissertação de mestrado. Departamento de Química, Universidade de Aveiro.

COELHO, M. R. F.; COELHO, M. H. Panorama da indústria de celulose e papel no Brasil: 2001 a 2011. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 463-474, 2013.

CUNHA, A. B. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 259-267, 2014.

CUNHA, L. R. P. **Comparação Interlaboratorial dos Resultados dos Ensaios de Desgaste Abrasivo em Polímeros Segundo a Norma ISO 4649**. 2013. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

DIAS, O. A.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3632-3646, 2013.

DOMINGOS, I. et al. A Influência da Prensagem a Quente nas Propriedades dos Painéis de Fibras de Alta Densidade, Aquando do seu Revestimento por Películas. **Millenium**, n. 50, p. 197-206, 2016.

DOS SANTOS, R. M. et al. Cellulose nanocrystals from pineapple leaf, a new approach for the reuse of this agro-waste. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 707-714, 2013.

DUFRESNE, A. Interfacial phenomena in nanocomposites based on polysaccharide nanocrystals. **Composite Interfaces**, v. 10, n. 4-5, p. 369-387, 2003.

DUFRESNE, A. Processing of polymer nanocomposites reinforced with polysaccharide nanocrystals. **Molecules**, v. 15, n. 6, p. 4111-4128, 2010.

DURAN, N. et al. A minireview of cellulose nanocrystals and its potential integration as co-product in bioethanol production. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 56, n. 2, p. 672-677, 2011.

EDGAR, C. D.; GRAY, D. G. Smooth model cellulose I surfaces from nanocrystal suspensions. **Cellulose**, v. 10, n. 4, p. 299-306, 2003.

EICHHORN, S. J. et al. Current international research into cellulosic fibers and composites. **Journal of materials Science**, v. 36, n. 9, p. 2107-2131, 2001.

ELAZZOUI-HAFRAOUI, S. et al. The shape and size distribution of crystalline nanoparticles prepared by acid hydrolysis of native cellulose. **Biomacromolecules**, v. 9, n. 1, p. 57-65, 2008.

ELEOTÉRIO, J. R. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resinas. 2000. **Dissertação de mestrado**. Universidade de São Paulo.

EQUIPE ESTATCAMP. Software Action. Estatcamp - Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos - SP, Brasil. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/>. Acesso em: 30 de outubro de 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 310**: Wood-based panels- Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 319**: Particleboards and Fiberboards - Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. 1993.

FAHMA, F. et al. Effect of pre-acid-hydrolysis treatment on morphology and properties of cellulose nanowhiskers from coconut husk. **Cellulose**, v. 18, n. 2, p. 443-450, 2011.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in polymer science**, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FAVERO, D. **Obtenção de micro e nanocelulose para preparação de membranas poliméricas como barreira seletiva**. 2014. Dissertação de mestrado. Universidade de Caxias do Sul.

FAVIER, V. et al. Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 6, n. 5, p. 351-355, 1995.

FEDULLO, N. et al. Polymer-based nanocomposites: Overview, applications and perspectives. **Progress in Organic Coatings**, v. 58, n. 2, p. 87-95, 2007.

FERESIN, F. et al. **Desenvolvimento de compósito de poliuretano reforçado com nanofibrilas de celulose isoladas de candeia (*Eremanthus erythropappus*)**. 2016. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos.

FERGUSSON, W. Why wood pulp is world's new wonder material. **New Scientist**. 2012. Disponível em: <<https://www.newscientist.com/article/mg21528786-100-why-wood-pulp-is-worlds-new-wonder-material/>> Acesso em: 25/11/2016.

FERREIRA, A. R.; JOÃO, D. M.; GODOY, L. P. A utilização da matéria-prima eucalipto na indústria moveleira como estratégia para o desenvolvimento sustentável. In: **CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO**, Niterói. 2008.

FERREIRA, É. S. **Propriedades físico-mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos com resinas convencionais e modificadas com tanino de Acácia Negra**. 2010. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná.

FIGUEROA, M. J. M. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

FREIRE, A. L. F. et al. Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados- uma revisão de literatura. **Revista Espacios**, v. 36, n 10, 2015.

GANEV, S. et al. Mechanical properties of MDF as a function of density and moisture content. **Wood and fiber science**, v. 37, n. 2, p. 314-326, 2005.

GARDNER, D. J. et al. Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 22, n. 5-6, p. 545-567, 2008.

GORRINI, B. et al. Tableros de partículas y MDF de *Eucalyptus nitens*: Ensayos a escala industrial. **Bosque (Valdivia)**, v. 25, n. 3, p. 89-97, 2004.

HABIBI, Y. et al. Langmuir–Blodgett films of cellulose nanocrystals: Preparation and characterization. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 316, n. 2, p. 388-397, 2007.

HABIBI, Y. Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 5, p. 1519-1542, 2014.

- HABIBI, Y.; DUFRESNE, A. Highly filled bionanocomposites from functionalized polysaccharide nanocrystals. **Biomacromolecules**, v. 9, n. 7, p. 1974-1980, 2008.
- HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; ROJAS, O. J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. **Chem. Rev**, v. 110, n. 6, p. 3479-3500, 2010.
- HIZIROGLU, S. Surface roughness analysis of wood composites: a stylus method. **Forest Products Journal**, v. 46, n. 7, 8, p. 67, 1996.
- HUANG, P. et al. One-Step Dispersion of Cellulose Nanofibers by Mechanochemical Esterification in an Organic Solvent. **ChemSusChem**, v. 5, n. 12, p. 2319-2322, 2012.
- HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. Cambridge University Press, 1996.
- IBÁ – INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual da IBÁ 2017, ano base 2016**. 77 p. Disponível em: <<http://www.iba.org>>. Acesso em: 18/10/2017.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 247 p, 2005.
- KASHIWAGI, T. et al. Thermal and flammability properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites. **Polymer**, v. 45, n. 12, p. 4227-4239, 2004.
- KAUSHIK, M. et al. An improved methodology for imaging cellulose nanocrystals by transmission electron microscopy. **Nordic Pulp Paper Res J**, v. 29, n. 1, p. 77-84, 2014.
- KAUSHIK, M. et al. Transmission electron microscopy for the characterization of cellulose nanocrystals. In: **The Transmission Electron Microscope-Theory and Applications**. InTech, 2015.
- KLOCK, U. et al. Química da madeira. **Curitiba: UFPR**, v. 3, 2005.
- KONTTURI, E.; TAMMELIN, T.; ÖSTERBERG, M. Cellulose - model films and the fundamental approach. **Chemical Society Reviews**, v. 35, n. 12, p. 1287-1304, 2006.
- KOVACS, T. et al. An ecotoxicological characterization of nanocrystalline cellulose (NCC). **Nanotoxicology**, v. 4, n. 3, p. 255-270, 2010.
- KRISHNAMOORTI, R.; VAIA, R. A. (Ed.). **Polymer nanocomposites: synthesis, characterization, and modeling**. American Chemical Society, 2001.
- KRZYSIK, A. M. et al. Medium density fiberboard made from *Eucalyptus saligna*. **Forest products journal**, v. 51, n. 10, p. 47-50, 2001.

KUMAR, A. et al. Influence of aluminum oxide nanoparticles on the physical and mechanical properties of wood composites. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6231-6241, 2013.

KVIEN, I.; TANEM, B. S.; OKSMAN, K. Characterization of cellulose whiskers and their nanocomposites by atomic force and electron microscopy. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 6, p. 3160-3165, 2005.

LE NORMAND, M.; MORIANA, R.; EK, M. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from spruce bark in a biorefinery perspective. **Carbohydrate polymers**, v. 111, p. 979-987, 2014.

LEITE, F. L. et al. Theoretical models for surface forces and adhesion and their measurement using atomic force microscopy. **International journal of molecular sciences**, v. 13, n. 10, p. 12773-12856, 2012.

LU, P.; HSIEH, Y. Preparation and properties of cellulose nanocrystals: rods, spheres, and network. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 2, p. 329-336, 2010.

MALONEY, T. M. Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing, Forest Prod. **Society, Madison, Wisconsin**, p. 681, 1993.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio – Brasil 2014/15 a 2024/5**. 2015. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/PROJECOES_DO_AGRONEGOCIO_2025_WEB.pdf> Acesso em: 25/11/2016.

MARRA, A. A. **Technology of Wood bonding: principles and practice**. New York, Van Nostrand Reinhold. 453 p. 1992.

MARTINS, J.G.; ARAÚJO, J. **Materiais de construção: Madeiras**. Série Materiais. 2ª Edição, 2005.

MCKENZIE, W. M.; KARPOVICH, H. The frictional behaviour of wood. **Wood science and technology**, v. 2, n. 2, p. 139-152, 1968.

MENG, Q.; HIRAI, T.; KOIZUMI, A. Frictional coefficients between timber and some structural sheet materials. **Journal of the Japan Wood Research Society**, v. 54, n. 5, p. 281–288, 2008.

MERLINI, A. et al. Avaliação das condições de hidrólise ácida na obtenção de nanocristais de celulose de pinus taeda. 2016. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Santa Catarina.

MIAO, C.; HAMAD, W. Y. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: a critical review. **Cellulose**, v. 20, n. 5, p. 2221-2262, 2013.

MOON, R. J. et al. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011.

MORAES, A. S. et al. Caracterização morfológica de nanocristais de celulose por microscopia de força atômica. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 532-540, 2016.

MORAIS, J. P. S. et al. Extraction and characterization of nanocellulose structures from raw cotton linter. **Carbohydrate Polymers**, v. 91, n. 1, p. 229-235, 2013.

NAKAKOSHI, M.; NISHIOKA, H.; KATAYAMA, E. New versatile staining reagents for biological transmission electron microscopy that substitute for uranyl acetate. **Journal of electron microscopy**, v. 60, n. 6, p. 401-407, 2011.

NG, H. et al. Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. **Composites Part B: Engineering**, v. 75, p. 176-200, 2015.

NI, H. et al. Cellulose nanowhiskers: preparation, characterization and cytotoxicity evaluation. **Bio-medical materials and engineering**, v. 22, n. 1-3, p. 121-127, 2012.

NJUGUNA, J.; PIELICHOWSKI, K.; ALCOCK, J. R. Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites. **Advanced Engineering Materials**, v. 9, n. 10, p. 835-847, 2007.

PEREIRA, A. L. S. **Nanocompósitos baseados em PVOH e nanocristais de celulose obtidos de pseudocaule de bananeira**. 2013. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará.

ROSA, S. E. S. et al. **O setor de móveis na atualidade: Uma análise preliminar**. BNDES Setorial, n. 25, p. 65-106, 2007.

ROSA, S. M. L. Isolamento de nanocristais de celulose de resíduos agrícolas e emprego em nanocompósitos de polipropileno. 2012. **Tese de doutorado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROSS, R. J. et al. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. 2010.

ROUMELI, E. et al. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea-formaldehyde/nanoSiO₂ resins. **Thermochimica Acta**, v. 527, p. 33-39, 2012.

SABDIN, S. **Use of Nanoparticle in the Wood Composite to Enhance the Heat Transfer**. 2010. Trabalho de conclusão de curso. Universiti Malaysia Pahang.

SACUI, I. A. et al. Comparison of the properties of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils isolated from bacteria, tunicate, and wood processed using acid, enzymatic, mechanical, and oxidative methods. **ACS applied materials & interfaces**, v. 6, n. 9, p. 6127-6138, 2014.

SAMIR, M. A. S. A. et al. Cellulose nanocrystals reinforced poly (oxyethylene). **Polymer**, v. 45, n. 12, p. 4149-4157, 2004.

SAMIR, M. A. S. A.; ALLOIN, F.; DUFRESNE, A. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 2, p. 612-626, 2005.

SHAFIEI-SABET, S.; HAMAD, W. Y.; HATZIKIRIAKOS, S. G. Ionic strength effects on the microstructure and shear rheology of cellulose nanocrystal suspensions. **Cellulose**, v. 21, n. 5, p. 3347-3359, 2014.

SHUPE, T. F. et al. Effect of silvicultural practice and wood type on loblolly pine particleboard and medium density fiberboard properties. **Holzforschung**, v. 53, n. 2, p. 215-222, 1999.

SILVA, A. P.S, CAMPOS, C.I., FERREIRA, B.S. Caracterização físico-mecânica de painéis de fibra com adição de nanopartículas de sílica. In: **XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, Curitiba, 2016.

SILVA, D. J.; D'ALMEIDA, M. L. O. Nanocristais de celulose. **O papel**, v. 70, n. 7, p. 34-52, 2009.

SILVA, D. J.; D'ALMEIDA, M. L. O.; KOGA, M.T. Isolamento de nanocristais a partir de pasta celulósica Kraft branqueada de eucalipto. In: **44º Congresso e Exposição Internacional de papel e celulose**, São Paulo, 2011.

SILVA, J. E. E. Estudo da influência das resinas termofixas uréia formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF) nas características físicas e mecânicas de painéis MDF. 2013. **Trabalho de conclusão de curso**. Universidade Estadual Paulista.

SILVA, M. E. C. M. Apontamentos de tecnologia dos produtos florestais: composição química da madeira. **Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD)**, 2010.

SILVÉRIO, H. A. et al. Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from corncob for application as reinforcing agent in nanocomposites. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 427-436, 2013.

SIQUEIRA, G.; MATHEW, A. P.; OKSMAN, K. Processing of cellulose nanowhiskers/cellulose acetate butyrate nanocomposites using sol-gel process to facilitate dispersion. **Composites Science and Technology**, v. 71, n. 16, p. 1886-1892, 2011.

SJÖSTRÖM, E.; WESTERMARK, U. The chemical composition of wood and pulps: basic constituents and their distribution. In: **Analytical methods in wood chemistry pulping and papermaking**. Springer Berlin Heidelberg, 1999.

SJOSTROM, E. **Wood Chemistry fundamentals and applications**. New York: Academic Press, 1981.

SOUZA, S. F. Obtenção de nanofibras de curauá e aplicação como reforço em compósitos baseados em PVA. 2010. **Dissertação de mestrado**. Universidade Estadual Paulista.

SOUZA, V. C.; QUADRI, V. C. Influência da fonte celulósica e da energia sonora nas características geométricas de nanocristais de celulose. In: **XX Congresso de Engenharia Química**. Florianópolis, 2014.

SPEROTTO, F. Q. A expansão do setor de celulose de mercado no Brasil: condicionantes e perspectivas. **Indic. Econ. FEE**, Porto Alegre, v. 41, n. 4, p. 85-100, 2014.

STEIN, F. R. Modelagem da produção industrial de celulose Kraft com modelos aditivos generalizados e redes neurais. 2010. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Viçosa.

ŠTURCOVÁ, A.; DAVIES, G. R.; EICHHORN, S. J. Elastic modulus and stress-transfer properties of tunicate cellulose whiskers. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 2, p. 1055-1061, 2005.

SUCHSLAND, O.; WOODSON, G. E. Fiberboard manufacturing practices in the United States. **Agriculture handbook/United States. Dept. of Agriculture (USA)**, 1987.

SVENSSON, B. A. et al. Frictional testing of wood - Initial studies with a new device. **Tribology International**, v. 42, n. 1, p. 190-196, 2009.

SWAIN, P. T. R.; BISWAS, S. Abrasive Wear Behaviour of Surface Modified Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites. **Materials Research**, n. AHEAD, p. 0-0, 2017.

TAIPINA, M. O. **Nanocristais de celulose: obtenção, caracterização e modificação de superfície**. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

TEIXEIRA, D. S. **Influência do estado e da legislação sobre o setor florestal do rio grande do sul**. 2016. Dissertação de mestrado. 2016. Universidade Federal de Santa Maria.

TORQUATO, L. P. Caracterização dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil. 2008. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

TUFFI SANTOS, L.D. et al. Crescimento e morfoanatomia foliar de eucalipto sob efeito de deriva do glyphosate. **Planta Daninha**, v. 23, n. 1, p. 133-142, 2005.

UREÑA-BENAVIDES, E. E.; BROWN, P. J.; KITCHENS, C. L. Effect of jet stretch and particle load on cellulose nanocrystal - alginate nanocomposite fibers. **Langmuir**, v. 26, n. 17, p. 14263-14270, 2010.

WANG, Y.; CHEN, X. Carbon nanotubes: A promising standard for quantitative evaluation of AFM tip apex geometry. **Ultramicroscopy**, v. 107, n. 4, p. 293-298, 2007.

XU, M. et al. Effects of surface roughness and wood grain on the friction coefficient of wooden materials for wood–wood frictional pair. **Tribology Transactions**, v. 57, n. 5, p. 871-878, 2014.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series, v. 10, 1987.

APÊNDICE A – ANOVA DA TRAÇÃO PERPENDICULAR

ANOVA: Tração perpendicular RESUMÓ

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	4	1,6008	0,4002	0,0016
P2	4	0,6181	0,1545	0,0083
P4	4	0,5279	0,1320	0,0017
P6	4	0,4895	0,1224	0,0022

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,21	3,00	0,07	20,49	5,17E-05	3,49
Dentro dos grupos	0,04	12,00	0,00			
Total	0,25	15,00				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	-0,245671491	-0,368705186	-0,122637796	0,000349682
P4-P0	-0,268217064	-0,391250759	-0,145183369	0,000155591
P6-P0	-0,277820575	-0,40085427	-0,154786881	0,000111472
P4-P2	-0,022545573	-0,145579268	0,100488122	0,946394883
P6-P2	-0,032149084	-0,155182779	0,090884611	0,863888426
P6-P4	-0,009603511	-0,132637206	0,113430184	0,995374551

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P0	0,4001976	a
P2	0,1545261	b
P4	0,1319805	b
P6	0,122377	b

APÊNDICE B – ANOVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

ANOVA: Módulo de elasticidade

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	4	11681,31	2920,33	335296,22
P2	4	8299,09	2074,77	26692,65
P4	4	7966,42	1991,61	10500,59
P6	4	8659,76	2164,94	14289,78

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2193195	3	731065,15	7,56	4,22E-03	3,49
Dentro dos grupos	1160338	12	96694,81			
Total	3353533	15				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	-845,5560981	-1498,359367	-192,7528297	0,010810943
P4-P0	-928,722776	-1581,526044	-275,9195075	0,005611127
P6-P0	-755,3894121	-1408,192681	-102,5861436	0,022166565
P4-P2	-83,16667783	-735,9699463	569,6365907	0,980700004
P6-P2	90,16668605	-562,6365824	742,9699545	0,975684909
P6-P4	173,3333639	-479,4699046	826,1366324	0,858365332

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P0	2920,328	a
P6	2164,939	b
P2	2074,772	b
P4	1991,605	b

APÊNDICE C – ANOVA DO MÓDULO DE RUPTURA

ANOVA: Módulo de ruptura

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	4	103,59	25,90	31,91
P2	4	65,71	16,43	1,83
P4	4	52,01	13,00	1,90
P6	4	69,89	17,47	3,32

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	359,67	3	119,89	12,31	0,00	3,49
Dentro dos grupos	116,88	12	9,74			
Total	476,55	15				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	-9,468716087	-16,02045871	-2,916973462	0,005001526
P4-P0	-12,8936996	-19,44544223	-6,341956975	0,000398527
P6-P0	-8,424885553	-14,97662818	-1,873142927	0,011348868
P4-P2	-3,424983514	-9,976726139	3,126759112	0,439376837
P6-P2	1,043830535	-5,507912091	7,59557316	0,963610961
P6-P4	4,468814048	-2,082928577	11,02055667	0,232446773

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P0	25,89627	a
P6	17,47139	b
P2	16,42756	b
P4	13,00257	b

APÊNDICE D – ANOVA DA DUREZA SHORE D

ANOVA: Dureza Shore D

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	581,0	72,63	10,39
P2	8	497,2	62,15	21,79
P4	8	515,0	64,38	63,64
P6	8	548,0	68,50	8,12

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	514,19	3	171,40	6,60	0,0016	2,95
Dentro dos grupos	727,57	28	25,98			
Total	1241,76	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	-10,475	-17,43389992	-3,516100076	0,001683454
P4-P0	-8,25	-15,20889992	-1,291100076	0,015469857
P6-P0	-4,125	-11,08389992	2,833899924	0,384979103
P4-P2	2,225	-4,733899924	9,183899924	0,81868879
P6-P2	6,35	-0,608899924	13,30889992	0,083259062
P6-P4	4,125	-2,833899924	11,08389992	0,384979103

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P0	72,625	a
P6	68,5	ab
P4	64,375	b
P2	62,15	b

APÊNDICE E – ANOVA DA RUGOSIDADE (Ra)

ANOVA: Rugosidade média (Ra)

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	78,57	9,82	2,44
P2	8	87,95	10,99	2,14
P4	8	91,36	11,42	6,09
P6	8	91,53	11,44	0,93

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,88	3	4,63	1,60	0,2127	2,95
Dentro dos grupos	81,20	28	2,90			
Total	95,08	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	1,1725	-1,152256353	3,497256353	0,523644072
P4-P0	1,599	-0,725756353	3,923756353	0,260174747
P6-P0	1,6205	-0,704256353	3,945256353	0,249656257
P4-P2	0,4265	-1,898256353	2,751256353	0,95818111
P6-P2	0,448	-1,876756353	2,772756353	0,952035394
P6-P4	0,0215	-2,303256353	2,346256353	0,999994066

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P6	11,4415	a
P4	11,42	a
P2	10,9935	a
P0	9,821	a

APÊNDICE F – ANOVA DA RUGOSIDADE (Rq)

ANOVA: Rugosidade quadrática média (Rq)

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	100,29	12,54	4,65
P2	8	111,23	13,90	3,62
P4	8	114,40	14,30	9,25
P6	8	115,08	14,39	1,28

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	17,58	3	5,86	1,25	0,31	2,95
Dentro dos grupos	131,64	28	4,70			
Total	149,22	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	1,367125	-1,592871066	4,327121066	0,59448019
P4-P0	1,763375	-1,196621066	4,723371066	0,380647848
P6-P0	1,848375	-1,111621066	4,808371066	0,340120034
P4-P2	0,39625	-2,563746066	3,356246066	0,98296092
P6-P2	0,48125	-2,478746066	3,441246066	0,97025352
P6-P4	0,085	-2,874996066	3,044996066	0,999822752

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P6	14,385	a
P4	14,3	a
P2	13,90375	a
P0	12,53663	a

APÊNDICE G – ANOVA DA RUGOSIDADE (RSm)

ANOVA: Largura média do espaçamento dos elementos de perfil (RSm)

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	2,08	0,26	0,00
P2	8	3,07	0,38	0,03
P4	8	2,57	0,32	0,00
P6	8	2,47	0,31	0,00

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,06	3	0,0210	2,35	0,09	2,95
Dentro dos grupos	0,25	28	0,0090			
Total	0,31	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	0,1245	-0,004735385	0,253735385	0,062142172
P4-P0	0,061375	-0,067860385	0,190610385	0,572626947
P6-P0	0,048625	-0,080610385	0,177860385	0,735074254
P4-P2	-0,063125	-0,192360385	0,066110385	0,550013553
P6-P2	-0,075875	-0,205110385	0,053360385	0,393302696
P6-P4	-0,01275	-0,141985385	0,116485385	0,99300696

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P2	0,384125	a
P4	0,321	a
P6	0,30825	a
P0	0,259625	a

APÊNDICE H – ANOVA DA RUGOSIDADE (Rsk)

ANOVA: Fator de simetria skewness do perfil (Rsk)

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	-3,66	-0,46	0,10
P2	8	-2,42	-0,30	0,14
P4	8	-2,10	-0,26	0,21
P6	8	-1,15	-0,14	0,18

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,40	3	0,13	0,84	0,48	2,95
Dentro dos grupos	4,47	28	0,16			
Total	4,87	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	0,155875	-0,389394691	0,701144691	0,86262068
P4-P0	0,195375	-0,349894691	0,740644691	0,762781962
P6-P0	0,3135	-0,231769691	0,858769691	0,411488806
P4-P2	0,0395	-0,505769691	0,584769691	0,997193111
P6-P2	0,157625	-0,387644691	0,702894691	0,858692387
P6-P4	0,118125	-0,427144691	0,663394691	0,933818439

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P6	-0,14425	a
P4	-0,262375	a
P2	-0,301875	a
P0	-0,45775	a

APÊNDICE I – ANOVA DA TAXA DE DESGASTE ABRASIVO

ANOVA: Taxa de desgaste abrasivo

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
P0	8	2,75E-6	3,43E-7	2,79E-15
P2	8	2,49E-6	3,11E-7	7,6E-16
P4	8	2,56E-6	3,2E-7	3,19E-15
P6	8	2,6E-6	3,25E-7	1,41E-15

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,43E-15	3	1,48E-15	0,72	0,55	2,95
Dentro dos grupos	5,71E-14	28	2,04E-15			
Total	6,15E-14	31				

Teste Tukey - Comparações Múltiplas

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>P-valor</i>
P2-P0	-3,22188E-08	-9,38737E-08	2,94362E-08	0,493825737
P4-P0	-2,33125E-08	-8,49675E-08	3,83425E-08	0,732149528
P6-P0	-1,78438E-08	-7,94987E-08	4,38112E-08	0,858278248
P4-P2	8,90625E-09	-5,27487E-08	7,05612E-08	0,97878214
P6-P2	1,4375E-08	-4,728E-08	7,603E-08	0,919290035
P6-P4	5,46875E-09	-5,61862E-08	6,71237E-08	0,994888743

Agrupamento

<i>Fator</i>	<i>Médias</i>	<i>Grupos</i>
P0	3,43E-07	a
P6	3,25E-07	a
P4	3,20E-07	a
P2	3,11E-07	a