



VOLUME 24

FABRÍCIO GOMES GONÇALVES
WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE
PEDRO GUTEMBERG DE ALCÂNTARA SEGUNDINHO
JUAREZ BENIGNO PAES (ORGS.)

Pesquisa e Produção

na Engenharia Madeireira





Esta obra foi selecionada para integrar a “Coleção Pesquisa Ufes”, a partir de Chamada Pública feita pela Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) aos programas de pós-graduação da universidade.

A seleção teve por base pareceres que consideraram critérios de inovação, relevância e impacto.

O financiamento da Coleção foi viabilizado por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação (Proap) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e de recursos do Tesouro Nacional.



**Universidade Federal
do Espírito Santo**



Editora Universitária – Edufes

Filiada à Associação Brasileira
das Editoras Universitárias (Abeu)

Av. Fernando Ferrari, 514
Campus de Goiabeiras
Vitória – ES · Brasil
CEP 29075-910

+55 (27) 4009-7852
edufes@ufes.br
www.edufes.ufes.br

Reitor

Paulo Sergio de Paula Vargas

Vice-reitor

Roney Pignaton da Silva

Chefe de Gabinete

Aureo Banhos dos Santos

Diretor da Edufes

Wilberth Salgueiro

Conselho Editorial

Carlos Roberto Vallim, Eliana Zandonade,
Eneida Maria Souza Mendonça, Fátima Maria
Silva, Graziela Baptista Vidaurre, Isabella Vilhena
Freire Martins, José André Lourenço, Marcos
Vogel, Margarete Schat Góes, Rogério Borges
de Oliveira, Sandra Soares Della Fonte, Sérgio da
Fonseca Amaral

Secretaria do Conselho Editorial

Douglas Salomão

Administrativo

Josias Bravim
Washington Romão dos Santos

Seção de Edição e Revisão de Textos

Fernanda Scopel, George Vianna,
Jussara Rodrigues, Roberta
Estefânia Soares

Seção de Design

Ana Elisa Poubel, Juliana Braga,
Samira Bolonha Gomes, Willi Piske Jr.

Seção de Livraria e Comercialização

Adriani Raimondi, Dominique Piazzarollo,
Marcos de Alarcão, Maria Augusta
Postinghel, Maria de Lourdes Zampier



Este trabalho atende às determinações do Repositório Institucional do Sistema Integrado de Bibliotecas da Ufes e está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.



Diretora da MC&G Editorial

Maria Clara Costa



Secretaria do Conselho Editorial

Helena Pires Coelho

Seção de Edição e Revisão de Textos

Joyce Guimarães | Carlos Otávio Flexa | Roberto Azul

Seção de Design

Glauco Coelho | Moises Collares

Conselho Editorial

Alexandra Santos Pinheiro | UFGD | Brasil
Angélica Ferrarez de Almeida | UERJ | Brasil
Antonio Liberac C. Simões Pires | UFRB | Brasil
Arlindo Nkadibuala | UniRovuma | Moçambique
Juan Miguel González Velasco | UMSA | Bolívia
Luciano Brito | UFRB | Brasil
Maria Alice Resende | UFRB | Brasil
Núria Lorenzo Ramírez | UB-GREC | Barcelona
Rosy de Oliveira | UFRB | Brasil
Thayse Figueira Guimaraes | UFGD | Brasil

Preparação de texto

Carlos Otávio Flexa

Projeto gráfico

Edufes

Diagramação e capa

Glauco Coelho

Revisão de texto

Roberto Azul

Fotografia da capa banco imagens Shutterstock

Demais imagens abertura capítulos:

Cap. 1: Pixabay®

Cap. 2: Walter Torezani Neto Boschetti®

Cap. 3: Fabricio Gomes Gonçalves®

Cap. 4: Adrian Schüpbach® no Pixabay

Cap. 5: Fabricio Gomes Gonçalves®

Cap. 6: Katherine Duff® no Pixabay

Esta obra foi composta com a família tipográfica Crimson Text.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

P474 Pesquisa e produção na engenharia madeireira [recurso eletrônico] / organizadores Fabricio Gomes Gonçalves ... [et al.]. — Vitória : EDUFES; Rio de Janeiro : MC&G, 2022.

Dados eletrônicos (e-Pub). — (Coleção Pesquisa UFES ; 24).

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-65-88077-00-9 [coleção]

ISBN: 978-85-7772-490-1

1. Engenharia florestal. 2. Engenharia Industrial Madeireira. 3. Indústria madeireira. 4. Ciência florestal. I. Gonçalves, Fabricio Gomes. II. Andrade, Wendel Sandro de Paula. III. Segundinho, Pedro Gutemberg de Alcântara. IV. Paes, Juarez Benigno. V. Título. VI. Coleção.

CDD23: 338.4763492

Elaborado por Priscila Pena Machado CRB-7/6971

FABRICIO GOMES GONÇALVES
WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE
PEDRO GUTEMBERG DE ALCÂNTARA SEGUNDINHO
JUAREZ BENIGNO PAES (ORGS.)

Pesquisa e produção

na Engenharia Madeireira



Vitória, 2022

Apresentação

Prezados Leitores,

É com muita satisfação que apresento o volume 2 da obra *Pesquisa e produção na Engenharia Madeireira*, organizada pelos Professores Fabricio Gomes Gonçalves, Wendel Sandro de Paula Andrade e Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Conheço o Professor Fabricio de longa data e tenho maior orgulho dele ter sido meu primeiro bolsista de Iniciação Científica na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Tenho a certeza de que os organizadores se esforçaram e deram o melhor de si para que esta obra fosse finalizada, a qual trata de assuntos fundamentais para o conhecimento e utilização do material Madeira.

Uma excelente leitura, sem dúvida.

Prof. Dr. Roberto Carlos Costa Lelis

Departamento de Produtos Florestais

Instituto de Florestas

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Prefácio

Os cursos de Engenharia Florestal e de Engenharia Industrial Madeireira ainda podem ser considerados relativamente novos na Universidade Federal do Espírito Santo e sendo pertencentes ao também recente Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, mais especificamente ancorados no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), também assim definido em período de tempo relativamente curto. Como destacado, em um período de tempo relativamente curto, foi criada no sul do estado do Espírito Santo uma massa crítica altamente qualificada e atuante de forma sólida nas ciências florestal e da madeira. Além da elevada qualidade dos egressos profissionais destas duas importantes áreas das Ciências Agrárias e Engenharias, o DCFM também possui um papel importantíssimo na capacitação ao nível de pós-graduação com a formação de mestres e doutores ofertados ao mercado de trabalho nacional e internacional.

Toda *expertise* do DCFM tem produzido, neste curto período de existência, uma gama muito grande de publicações na forma de artigos em periódicos de elevado fator de impacto, em anais de importantes eventos e também na publicação de literatura especializada na forma de livros textos, ainda muito carentes no Brasil. A grande parte da literatura especializada nas áreas florestal e, sobretudo, da ciência da madeira utilizada pelos alunos brasileiros é redigida em língua estrangeira, notadamente a inglesa.

Com o propósito de cobrir esta lacuna no que diz respeito à literatura especializada é que os Professores Doutores Fabricio Gomes Gonçalves (Ufes), Roberto Carlos Costa Lelis (UFRRJ) e Wendel Sandro de Paula Andrade (Ufes) editaram primeiramente o título *EPesquisa e produção na Engenharia Madeireira*, publicado em 2018 pela Editora da UFRRJ-Edur. Os temas abordados na primeira edição foram distribuídos em 12 capítulos relevantes como o uso de adesivos naturais, painéis, uso estrutural da madeira, energia da biomassa até a otimização de raio econômico para o abastecimento de madeira para fins de tratamento. Cada um dos capítulos foi redigido por especialistas das respectivas áreas de diferentes instituições

de ensino e pesquisa do Brasil, obviamente com expressiva participação de professores e estudantes de pós-graduação do DCFM.

Novamente com o trabalho dedicado dos organizadores Professores Doutores Fabricio Gomes Gonçalves, Wendel Sandro de Paula Andrade e Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, ambos os professores do DCFM, é agora lançada a obra *Pesquisa e produção na Engenharia Madeireira*, volume 24 desta Coleção Pesquisa Ufes. Os temas agora abordados em seis capítulos são referentes ao que existe de mais atual relativo às pesquisas na área da ciência da madeira. Os capítulos redigidos por especialistas do DCFM e de outras instituições de pesquisa englobam temas fascinantes, como as nanoceluloses, compósitos madeira-plástico, madeira lâmina cruzada (CLT), entre outros atualíssimos e de grande importância na formação dos profissionais ligados às engenharias florestal e madeireira.

Aproveito ainda esta oportunidade para parabenizar os organizadores e autores dos capítulos e enfatizar mais uma vez a importância da produção de literatura científica em língua portuguesa, que sem nenhuma dúvida constituirá suporte essencial para as disciplinas da área de tecnologia da madeira para os estudantes do curso de Engenharia Florestal e também para boa parte das disciplinas ministradas para o curso de Engenharia Industrial Madeireira. Esta publicação também é muito bem-vinda como apoio às disciplinas de linhas de pesquisas relacionadas à Tecnologia de Produtos Florestais dos programas de pós-graduação relacionados às ciências florestais e da madeira presentes em várias instituições de ensino do Brasil.

Boa leitura a todos.

José Tarcísio da Silva Oliveira

Professor aposentado

Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFm)

Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes)

Lista de figuras, tabelas e quadro

FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1: Matéria-prima, sequência e equipamentos utilizados na confecção de madeira plástica	29
Figura 2: Ciclo de preparo da matéria-prima no misturador para formação da madeira plástica.....	29
Figura 3: Ciclo de formação do pellet para confecção da madeira plástica	30
Figura 4: Ciclo de formação da madeira plástica pelo método de extrusão	31

Capítulo 2

Figura 1: Celulose nanofibrilada visualizada por micrografia eletrônica de transmissão (MET), aumento de 50.000x.....	46
Figura 2: Nanocristais de celulose visualizados por microscopia	48

Capítulo 4

Figura 1: Início da combustão em peça de madeira	104
Figura 2: Madeira em processo de combustão.....	105
Figura 3: Critérios de desempenho para resistência ao fogo	108

Capítulo 5

Figura 1: Configuração das camadas dos painéis de CLT	127
Figura 2: Etapas de fabricação da CLT	129
Figura 3: Edifício de Ciências da Terra da Universidade da Colúmbia Britânica	134
Figura 4: Edifício Forté	135
Figura 5: Edifício multifamiliar de 9 andares em Londres.....	136
Figura 6: Conjunto Dalston Lane, em Londres	137
Figura 7 a, b, c: Móveis utilizando CLT	138
Figura 8: Pisos para canteiros de obras	139
Figura 9 a, b: Bases de apoio para patolas de guindastes.....	140

Capítulo 6

Figura 1: Variação do percentual de lenho tardio dentro de uma árvore de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	151
Figura 2: Linha radial representativa em peça contendo medula (A) e em peça sem medula (B).....	153
Figura 3: Configuração da carga e diagrama de deformação para obtenção da resistência à compressão e rigidez perpendicular às fibras.....	159

Figura 4: Conjunto de teste de compressão perpendicular às fibras, mostrando o método de aplicação de carga e medição de deformação por meios de compressômetro.....	161
Figura 5: Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras	162

QUADRO

Quadro 1: Comparação entre os produtos ignífugos e intumescentes.....	113
--	-----

TABELAS

Capítulo 5

Tabela 1: Valores característicos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320: 2017 para CLT	133
--	-----

Capítulo 6

Tabela 1: Classes de resistência das coníferas com valores na condição-padrão de referência ($U = 12\%$).....	149
--	-----

Tabela 2: Classes de densidade com base nos anéis de crescimento para coníferas	152
--	-----

Tabela 3: Médias de módulos de elasticidade encontrados para três espécies de pinus	156
--	-----

Sumário

Madeira plástica, tendências e perspectivas para a indústria florestal..... 16

Yonny Martinez Lopez

Fabricio Gomes Gonçalves

Juarez Benigno Paes

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Anna Clara Theodoro Nantet

Introdução	16
1 Contextualização ambiental do problema	18
1.1 Poluição ambiental e resíduos sólidos	18
1.2 Resíduos da indústria florestal e seu uso	19
1.3 Resíduos de plástico e seu uso industrial	19
1.4 Benefícios ambientais, econômicos e sociais da madeira plástica	20
2 Contextualização acerca dos painéis madeira plástica	21
2.1 Resenha histórica sobre o uso de resíduos na produção de painéis	21
2.2 Peculiaridades da indústria de painéis	21
2.3 Características dos painéis madeira plástica	23
2.3.1 Aditivos potenciais na manufatura de painéis madeira plástica	23
2.3.2 A madeira plástica e suas características – Plastic Lumber (PL)	24
2.3.3 Compósito madeira plástica – Wood Plastic Composite (WPC)	26
2.4 Painéis sanduíche WPC	28
2.5 Desenho tecnológico dos painéis madeira plástica	28
2.5.1 Matérias-primas e máquinas	28
2.5.2 Processo de mistura da matéria-prima	29
2.5.3 Corte dos painéis	31
2.6 Tendências da indústria de painéis madeira plástica no Brasil	32
3 Considerações finais	32
Referências	34

Nanoceluloses: produção e aplicações.....42

Elaine Cristina Lengowski

Renato Augusto Pereira Damásio

Walter Torezani Neto Boschetti

Introdução	42
1 Classificação, produção e propriedades da nanocelulose	43
1.1 Celulose micro e nanofibrilada	45
1.2 Celulose nanocristalina.....	47
2 Aplicações das nanoceluloses.....	49
2.1 Uso das nanoceluloses na indústria de papéis e embalagens.....	49
2.2 Uso das nanoceluloses em adesivos	56
2.3 Uso das nanoceluloses na indústria eletrônica.....	59
2.4 Uso das nanoceluloses na indústria farmacêutica e tratamentos médicos	60
3 Considerações finais	61
Referências	62

Materiais não tradicionais na fabricação de painéis ou compósitos.....84

Emilly Soares Gomes da Silva

Jaqueline Rocha de Medeiros

Fabricio Gomes Gonçalves

Wendel Sandro de Paula Andrade

Juarez Benigno Paes

Introdução	84
1 Matéria-prima utilizada na fabricação de painéis.....	85
1.1 Materiais lignocelulósicos não tradicionais.....	85
1.2 Adesivos não comumente utilizados pela indústria.....	89
2 Retardantes de fogo	90
3 Considerações finais	92
Referências	93

Tratamentos realizados na madeira para minimizar riscos de incêndios.....102

Bárbara Maria Mateus Gonçalves

Leonor da Cunha Mastela

Fabricio Gomes Gonçalves

Ananias Francisco Dias Júnior

Wendel Sandro de Paula Andrade

Introdução	102
------------------	-----

1 Comportamento da madeira sob ação do calor	103
1.1 Degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira	105
1.2 Taxa de carbonização	106
2 Resistência da madeira ao calor	107
2.1 Tratamentos químicos na madeira para proteção contra incêndio	108
2.1.1 Impregnação	109
2.1.2 Recobrimento	110
2.2 Tratamentos aplicados em derivados de madeira	111
2.3 Escolha do tratamento a ser aplicado	112
3 Produtos utilizados no tratamento da madeira.....	113
3.1 Verniz CKC-VR®	114
3.2 Tinta CKC-268®	114
3.3 Antichamas	114
4 Normatização aplicada à segurança contra incêndios em madeira.....	115
5 Considerações finais	116
Referências	118

Madeira laminada cruzada (CLT): prescrições técnicas de confecção e utilização..... 125

Nayara Franzini Lopes

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Fabricio Gomes Gonçalves

Rafael Gonçalves Espósito de Oliveira

Introdução	125
1 Caracterização do painel	126
2 Produção da CLT	128
3 Propriedades da CLT	132
4 Principais obras com CLT	133
5 Considerações finais	140
Referências	142

Relação entre anéis de crescimento e características físico-mecânica e visuais da madeira de *Pinus spp*..... 147

Raynord Mayard

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Lorenzo Lube dos Santos
Fabricio Gomes Gonçalves
Leonor da Cunha Mastela
Rejane Costa Alves

Introdução	147
1 Aspectos gerais normativos	149
2 Anéis de crescimento da madeira da análise econômica do dente.....	150
2.1 Densidade aparente da madeira.....	153
2.2 Módulo de elasticidade	155
2.3 Resistência da madeira à compressão normal às fibras	156
3 Avaliação da deformação no ensaio de compressão normal.....	158
3.1 ISO 13910:2013	158
3.2 COPANT (1972)	160
3.3 ASTM D143	160
3.4 NBR 7.190:1997	162
3.5 Comparação entre os resultados dos ensaios ISO 13910 e a Norma NBR 7.190	162
4 Considerações finais	163
Referências	164
Índice	170
Sobre os organizadores.....	172
Sobre os autores.....	174



Madeira plástica, tendências e perspectivas para a indústria florestal

Yonny Martinez Lopez

Fabricio Gomes Gonçalves

Juarez Benigno Paes

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Anna Clara Theodoro Nantet

INTRODUÇÃO

A indústria florestal tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos durante a transformação primária e secundária da madeira. Esses resíduos, assim como diversos outros de origem de processos industriais, serviços e residenciais, podem constituir uma ameaça ao meio ambiente quando são descartados incorretamente ou devido à falta de conhecimento para sua reutilização sustentável (ARNANDHA *et al.*, 2017).

O uso de subprodutos florestais e/ou industriais é relativamente pouco utilizado, a exemplo da serragem, aparas e plásticos. Estes, na maioria das vezes, são descartados, armazenados, incinerados ou enterrados, sem se avaliar que eles possam ter um valor agregado significativo para outras indústrias, quando reciclados (KESKISAARI; KÄRKI, 2018). Existem alternativas para o uso desses resíduos. Embora sejam frequentemente utilizados na produção de celulose, papel e fertilizantes, eles têm amplas perspectivas para a indústria de papelão, como em misturas com os resíduos termoplásticos (CHAUDEMANCHE *et al.*, 2018).

Os resíduos termoplásticos, largamente utilizados em todas as áreas de consumo, são possível e amplamente transformados em produtos manufaturados destinados a curtos períodos de uso (como as embalagens). Após o período de uso, causam problemas de poluição ambiental, uma vez que não são biodegradáveis (em sua maioria), causam danos à saúde humana e constituem um desperdício irracional de recursos. No entanto, eles também podem ser uma fonte importante de matéria-prima para outros segmentos industriais (DEAC; TUTUNARU; GASPARG, 2016).

O aumento da produção e do consumo de produtos de maior valor agregado (PMVA), como molduras, elementos para portas, janelas, pisos e móveis, implica elevada concorrência entre os materiais de construção (ASHORI; NOURBAKHS, 2010). Tradicionalmente, os produtos de madeira apresentam ampla disponibilidade geográfica, sendo utilizados em muitas aplicações, ocorrendo assim concorrência em seu uso. Dentre os produtos de madeira da América Latina com maior destaque estão os painéis de madeira (OSB), painéis de fibra de média densidade (MDF), madeira compensada e os painéis de partículas com madeira serrada.

O desenvolvimento de materiais derivados da reciclagem de plásticos e madeira está se tornando uma alternativa real e vantajosa, abrindo toda uma gama de oportunidades e possibilidades para sua aplicação em produtos para diferentes áreas, devido às inúmeras vantagens que apresentam, especialmente para uso ao ar livre (HORTA; SIMÕES; MATEUS, 2017). Esses painéis podem ser fabricados a partir da mistura de termoplásticos, partículas de madeira, fibras vegetais e materiais lignocelulósicos; sendo este produto misto de crescente interesse na ciência e engenharia de materiais (KABOORANI, 2017).

Os termoplásticos reciclados são os mais amplamente utilizados na fabricação desses tipos de painéis, pois são mais abundantes, menos densos e com propriedades mecânicas aceitáveis. Seu valor ambiental é evidenciado de acordo com o uso de resíduos, e a partir deles podem ser fabricadas estruturas recicladas e recicláveis que favorecem a reutilização e a recuperação desses resíduos (LISPERGUER *et al.*, 2013).

Esse tipo de painel oferece resistência sob condições climáticas, possui boas propriedades físico-mecânicas, o que atribui uma vida útil superior à madeira e aos painéis convencionais comumente usados na construção (OLIVEIRA; PAES, 2019). Sua comercialização é incentivada com base no benefício a longo prazo, uma vez ser sua durabilidade maior em relação a produtos semelhantes e, devido às suas propriedades, resistir a condições que a madeira não suporta; portanto, a médio e longo prazo, constitui uma vantagem competitiva entre materiais de construção (LOPEZ *et al.*, 2018).

1.1 Poluição ambiental e resíduos sólidos

Muitos resíduos de espécies vegetais ou animais podem ser incorporados em certos ciclos biológicos. No entanto, este não é o caso de resíduos termoplásticos sintéticos, como: tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidade (HDPE) e baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e cloreto de polivinila (PVC). Apesar de não estarem isentos de serem utilizados comercialmente como recipientes ou embalagens de substâncias ou itens alimentares, a grande maioria é descartada no ambiente após o uso. No total de plásticos descartáveis depositados em aterros, destaca-se nos últimos anos o aumento sustentado dos contêineres de tereftalato de polietileno (PET), principalmente de garrafas descartáveis de água de mesa, óleos e bebidas alcoólicas e não alcoólicas (LOPEZ *et al.*, 2015).

Desse modo, surge o problema associado à contaminação ambiental, muitas vezes como resultado dos resíduos de plásticos de alta e baixa densidade, cuja acumulação pode causar sérias consequências, potencializando a ocorrência de algumas doenças, a exemplo da dengue, em decorrência da estagnação de água, que serve como criadouro para o inseto vetor de várias doenças. Eles também dificultam o embelezamento de algumas áreas, estabelecimentos, municípios e cidades, com a poluição visual (TURKU *et al.*, 2017).

Por sua vez, o acúmulo de resíduos em serrarias pode dificultar o desenvolvimento do processo de produção, e ainda causar problemas de saúde aos funcionários, em razão da exposição à poeira da serragem. Isso implica que eles sejam descartados imediatamente, sendo, geralmente, enviados para aterros, onde passam muito tempo servindo como criadouro de insetos que causam doenças graves. Os efeitos adversos associados à exposição ao pó da serragem incluem dermatites e efeitos alérgicos ao sistema respiratório. Quando um trabalhador é sensibilizado à poeira de serragem, ele pode experimentar uma reação alérgica após exposições repetidas. Outros efeitos à saúde, em razão da exposição ao pó da serragem, conforme Lopez *et al.* (2014), são: irritação ocular, asma, secura e obstrução nasal; e dor de cabeça frequente.

No entanto, esses resíduos podem ser uma fonte valiosa de matéria-prima para a fabricação de outros materiais, como placas de madeira plástica. Seu baixo uso levou a baixas expectativas no setor, deixando claro que não há uma solução clara e única para esse problema, considerando que apenas a reciclagem pode ser a melhor opção do ponto de vista econômico (ORTEGA *et al.*, 2018).

1.2 Resíduos da indústria florestal e seu uso

Os resíduos florestais gerados na produção de madeira podem ser classificados em dois tipos: subprodutos das atividades florestais e resíduos do processamento de madeira. Estes últimos, por estarem concentrados em um determinado local, têm seu uso mais viável, por implicar menor custo. Esses resíduos possuem mercado consumidor definido, como cavacos para a fabricação de celulose, matérias-primas para a fabricação de aglomerados e fibras, além de lenha e materiais de construção.

Os resíduos são amplamente utilizados, a exemplo de suas aplicações na produção de energia em fornos, como combustível na forma de briquetes, ou ainda como carvão ativado. Outra utilidade desses resíduos é como um complemento alimentar para animais, uma vez que serragem, lascas e cascas, de algumas espécies, podem conter substâncias utilizáveis para ração, preparações vitamínicas e produtos químicos semiacabados (MORENO; SARON, 2017). O comportamento desses resíduos como melhoradores da fertilidade do solo é estudado a partir da mistura com diferentes materiais, como solo, cinzas, guano e diversas fontes de matéria orgânica, para o desenvolvimento de algumas culturas agrícolas.

Para a produção de painéis madeira plástica, a serragem é considerada uma importante matéria-prima, sendo um material renovável, abundante e econômico. Possui ainda as características de ser menos abrasiva ao processo de fabricação e neutra nas emissões de CO₂. Entre as serragens, aquelas provenientes do gênero pinus são as mais utilizadas, e geralmente são provenientes de resíduos da indústria florestal (OU *et al.*, 2014).

1.3 Resíduos de plástico e seu uso industrial

Os plásticos são substâncias químicas sintéticas chamadas polímeros de estruturas semelhantes. Não possuem um ponto fixo de evaporação, porém com propriedades de elasticidade e flexibilidade durante uma faixa de temperatura, permitindo que sejam moldados e adaptados a diferentes formas e aplicações. Essas características os tornam um material muito útil para o desenvolvimento da indústria.

Os plásticos foram fabricados para atender às demandas de uma ampla variedade de usos, dando origem a um vasto ramo no segmento industrial, contribuindo para a melhoria das condições de vida humana e o crescimento acelerado da ciência e da tecnologia. Esses fatos se deram, em parte, pelo fato de o plástico ser um dos materiais mais versáteis, leves e eficientes no uso de recursos, uma vez que sua produção pode se dar por meio do consumo de insumos, pela reutilização e pela reciclagem (MRAD *et al.*, 2018).

O Sistema de Codificação da Sociedade das Indústrias de Plástico (SPI) é um meio de identificá-los, aceito em todo o mundo, dos EUA à China, passando pela Europa. A identificação de embalagens plásticas recuperáveis é realizada observando a codificação do *American Identification System*, que aparece na parte inferior da embalagem, cercada por três setas. No interior, aparece um número e, na parte inferior, algumas siglas. Tanto o número quanto as siglas se referem à composição química do plástico, que por sua vez indica o tratamento que deve ser dado para reciclá-lo (LOPEZ *et al.*, 2018).

Os termoplásticos, como uma característica essencial, amolecem devido à ação do calor, derretendo, e, quando a temperatura é reduzida, tornam-se sólidos e rígidos novamente. Por esse motivo, podem ser moldados muitas vezes, sem perder suas propriedades, o que favorece a reciclagem, e, geralmente, são os mais utilizados na fabricação de embalagens. Mais de 80% dos plásticos são termoplásticos. A grande maioria das embalagens plásticas é feita segundo uma das seis resinas plásticas já mencionadas anteriormente. O SPI também inclui um código identificado como “outro”. Esse código indica que o produto em questão é fabricado com uma resina diferente das seis anteriores ou com uma combinação delas. Esta classificação é regulada pelos regulamentos europeus sobre recipientes e embalagens (94/62/UE). Em geral, quanto menor o número, mais fácil é a reciclagem.

1.4 Benefícios ambientais, econômicos e sociais da madeira plástica

O maior benefício deste tipo de produto está no sentido da contribuição para solucionar parcialmente o grave problema ambiental: o acúmulo de resíduos plásticos no ambiente. Por meio da reciclagem, são produzidos substitutos para madeira, concreto, aço e plástico injetado. Portanto, não se trata apenas de solucionar o problema dos resíduos sólidos urbanos, mas tornar seu uso abrangente. O lixo pode se tornar um ramo importante da economia. Para resolver um problema de acumulação, pode ser gerada uma atividade econômica que produza importantes fontes de emprego (LOPEZ *et al.*, 2014).

A sociedade desempenha um papel muito importante, já que com sua efetiva participação será possível contar com um ambiente equilibrado e o fortalecimento da economia, como previsto no artigo 225 da Constituição Federal Brasileira (BRASIL, 1988). Nesse sentido, os benefícios alcançados com o desenvolvimento dessas ações têm um impacto social favorável, pois contribuem para melhoria da cultura e aumentam a conscientização ecológica da população, melhorando seus hábitos de uso racional e consumo de recursos. Contribuem ainda para práticas de separação de resíduos e reciclagem de materiais, melhorando assim as condições de vida das famílias deles dependentes, e também para a formação de uma sociedade mais bem informada, com maior conscientização e comprometimento em manter e melhorar seu ambiente.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO ACERCA DOS PAINÉIS MADEIRA PLÁSTICA

2.1 Resenha histórica sobre o uso de resíduos na produção de painéis

A necessidade de usar os resíduos derivados do processo primário de transformação de madeira foi predominante na fabricação do primeiro painel de partículas na Alemanha, em 1910. Em 1951, o painel de três camadas foi fabricado pela primeira vez, ecoando em todo o mundo, e nesse mesmo ano a primeira fábrica foi instalada na Espanha para produzir esse tipo de painel.

Por sua vez, os painéis de fibra provêm da tecnologia de pasta mecânica de papel. A fabricação de chapas duras começou em 1926 nos EUA, as primeiras chapas foram produzidas na Europa em 1931 e na Espanha, especificamente na cidade de Valladolid, foram fabricadas pela primeira vez em 1946. O painel de fibras (MDF) é fabricado em Nova York em 1966, na Europa em 1973 e na Espanha em 1976 em Cella (Teruel). No entanto, o painel de partículas orientadas (OSB) teve origem nos EUA em 1954 e na Europa em 1979.

Por sua vez, os painéis madeira plástica foram fabricados nos Estados Unidos nos anos 1960, sendo usados principalmente em aplicações de caixilhos de janelas e portas. A indústria de janelas e portas, que tem experiência com materiais de madeira, plástico e alumínio, examinou maneiras de usar materiais mais econômicos; portanto, a serragem parecia ser leve e barata. O país com maior produção desse material são os Estados Unidos, embora na Europa, Ásia e outros países sua pesquisa e desenvolvimento tenham aumentado nos últimos anos, já que o uso desse tipo de material pode reduzir custos, aproveitando todo o desperdício de madeira e plásticos (MRAD *et al.*, 2018).

2.2 Peculiaridades da indústria de painéis

Os painéis, de uma forma geral, são produtos engenheirados madeireiros obtidos por várias fontes tecnológicas, a mais comum é compressão, colagem e prensagem de ripas, folheados, cavacos, partículas ou fibras de madeira (AITIM, 2011). Há ainda termos semelhantes, como compósito e aglomerado, uma vez as partículas de madeira são misturadas com outros materiais, como vidro, plásticos e materiais lignocelulósicos. Um dos objetivos do uso dos painéis é tirar proveito de madeiras de baixa qualidade e densidade, de pequenas dimensões ou resíduos resultantes. Para a indústria de painéis, pode ser utilizado qualquer tipo de madeira, embora a preferência seja para aquelas cuja densidade não exceda 700 kg m^{-3} , recomendando que a densidade da madeira seja menor que a do painel fabricado com ela, verificada de acordo com a taxa de compressão (MACHADO *et al.*, 2016).

Para os painéis madeira plástica, as propriedades físico-mecânicas, o efeito de altas densidades da madeira, podem causar uma diminuição nas propriedades mecânicas devido a partículas muito pequenas. O teor de umidade da madeira é um fator que afeta a produção de painéis. Estima-se que 1 kg de serragem apresente 0,2 kg de água, determinada por gravimetria (estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) em escala laboratorial, e tenha 0,8 kg de massa seca. Em escala industrial, esse procedimento é realizado em secadores do tipo suspensão com gases, gases de combustão, ar quente ou ambos, cujas temperaturas de entrada e saída variam entre $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $117\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Partículas contendo até 6% de umidade são consideradas ideais (LOPEZ *et al.*, 2020).

Existe uma tendência predominante em muitos países latino-americanos de fabricar e usar cada vez mais painéis de madeira, pois podem ser usados para fins estruturais ou decorativos. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) distingue quatro tipos de painéis: de partículas, compensado, fibra e aglomerado. Destes, apenas o compensado e o painel de partículas podem ter uma aplicação estrutural, uma vez que os painéis de fibra não possuem as propriedades necessárias para serem usadas na construção. Considerando que cada tipo de painel se distingue por suas características particulares, em geral, eles apresentam vantagens em relação ao uso de madeira maciça (TERZI *et al.*, 2018).

A indústria de painéis de madeira utiliza processos de produção de alta tecnologia que aproveitam a reciclagem de embalagens de palhetes, estacas da indústria de carpintaria, móveis e uma grande variedade de madeiras em fim de vida útil (da indústria e coleta seletiva) para fabricar seus produtos. Dessa forma, a sustentabilidade do setor se manifesta na minimização do impacto ambiental, bem como no seu compromisso com a certificação florestal, que garante que as matérias-primas sejam provenientes de florestas manejadas de forma sustentável (MORENO; HIRAYAMA; SARON, 2018).

A empresa *Composite Technologies Corporation* (CTC) apresentou painéis fabricados por meio de um processo exclusivo de moldagem por extrusão e compressão. O processo consome nada menos que 5.500 toneladas por ano de resíduos para fabricar painéis de quadras de basquete, reforçados com 15% de fibra de vidro. A decoração das placas é feita no molde de compressão, laminando-as com filmes pré-impresos. A tecnologia CTC está disponível no C.A. Lawton, nos Estados Unidos. Outra tecnologia permite que partículas de madeira sejam adicionadas aos resíduos de plástico para que se obtenham várias propriedades próximas às do primeiro material. A *Trex Company*, de Winchester, Va, consome cerca de 90.000 toneladas de resíduos de sacolas, plásticos retráteis e outros resíduos de polietileno por ano para fabricar tábuas de madeira plásticas, nas quais são adicionadas 50% de partículas de madeira (SOCCALINGAMEA *et al.*, 2015).

2.3 Características dos painéis madeira plástica

A madeira plástica não racha, lasca ou enferruja, e é resistente a pragas e insetos que atacam a madeira. Também são estáveis às mudanças na temperatura ambiente; é inodora, insípida, possui certo grau de flexibilidade, possui boa resistência térmica e boas propriedades dielétricas. As propriedades podem variar porque são fabricadas com polietilenos reciclados de vários tipos. Eles têm boa trabalhabilidade, ou seja, podem ser cortados, grampeados e perfurados com facilidade (SAE-LIM; AHT-ONG, 2013).

Este painel é fabricado aproveitando qualquer tipo de resíduo termoplástico, razão pela qual adquire propriedades muito importantes que lhe conferem deterioração quase imperceptível, mantendo-o em bom uso por muitos anos. Ele também possui uma vida útil mais longa que a madeira natural, aço e concreto em condições climáticas, umidade e salinidade, o que permite ir além dos usos semelhantes da madeira convencional (MRAD *et al.*, 2018).

Suas dimensões universais são 1,22 m de largura × 2,44 m de comprimento e espessura variando de 12 mm a 100 mm, com uma cor natural manchada. Os revestimentos podem ser preparados de acordo com o gosto do cliente, além de possibilitar a usinagem de várias maneiras, para que suas aplicações sejam ampliadas.

2.3.1 Aditivos potenciais na manufatura de painéis madeira plástica

No processo de produção de madeira plástica, há uma ampla gama de aditivos que afetam o produto, fornecendo certas propriedades que contribuem para sua estabilidade. Dentre os aditivos que podem ser utilizados, destacam-se:

- Ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$): geralmente usado entre 0,3% e 0,5%. É um excelente lubrificante e tem um efeito de estrutura cromatográfica. Seu uso não deve ser exagerado para facilitar a pulverização. Sua temperatura de fusão é de 60 °C a 70 °C, tendo o efeito de acelerar a velocidade de aglutinação.

- Estearato de cálcio ($C_{36}H_{70}CaO_4$): é um carboxilato de cálcio, classificado como sabão de cálcio, na cor branca. É componente de alguns lubrificantes e surfactantes. Serve para aumentar a estabilidade térmica e melhorar a lubrificação das partículas, e sua temperatura de fusão é de 80 °C a 90 °C.

- Estearato de zinco ($C_{36}H_{70}O_4Zn$): é um metal com sabão estabilizador de calor, geralmente é usado conjuntamente com cálcio e outros agentes estabilizadores térmicos. É inibidor

de manchas e evita a contaminação com enxofre orgânico, o que pode melhorar a estrutura do painel. É também considerado como um agente lubrificante amaciante.

- Carbonato de cálcio (CaCO_3): em forma de agulha, sendo pequenas partículas de $1,0 \mu\text{m}$ a $16 \mu\text{m}$ com densidade de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, cuja função é melhorar as propriedades de fabricação e a qualidade do produto, sendo muito eficaz no processo para aumentar a estabilidade do calor na fabricação do painel.

- Polietileno clorado (CPE) 135° cloro = 35%: dependendo da quantidade de cloro de HDPE, pode haver influência na formação do plástico. É resistente a impactos e variações no clima, ao frio e apresenta boa resistência à umidade.

- Cera de polietileno (PE Wax): atua como lubrificante interno aplicável ao processo de extrusão do plástico, geralmente é utilizado de 0,1% a 1% para aumentar o processo de eficiência. Possui temperatura de fusão de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $110 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Dióxido de titânio (TiO_2): pode ser refletido ou refratado, pode absorver completamente as ondas de raios ultravioleta. Possui uma absorção de ondas de 410 nm e pode ser usado como um agente de proteção da luz ultravioleta. Possibilita melhorias em relação à durabilidade dos painéis.

- Agente de acoplamento (Zb 99): quando utilizado corretamente, possibilita melhorar a união das partículas de plástico e madeira com diferença de polaridade.

2.3.2 A madeira plástica e suas características – Plastic Lumber (PL)

A indústria da madeira plástica define dois tipos de produtos, entre os quais a *Plastic Lumber* é uma forma plástica de “madeira” feita de plástico virgem ou reciclado, sendo constituída de 100% de plástico. Esse tipo de material é fácil de identificar visualmente em relação à madeira natural. Os fabricantes afirmam que é mais ecológica e requer menos manutenção que os compósitos de madeira plástica (*Wood Plastic Composites* – WPC) e também é 100% reciclável após o uso original pretendido, oferecendo, ainda, melhores propriedades físicas do que a madeira serrada (GARCÍA *et al.*, 2009; WEI *et al.*, 2013; AZWA *et al.*, 2013; THANATE; KAMPANART, 2018).

A *Plastic Lumber* é composta de plásticos virgens ou resíduos pós-consumo, incluindo polietileno de alta densidade (HDPE), cloreto de polivinil (PVC), polipropileno (PP), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), poliestireno (PS) e ácido polilático (PLA). O material plástico é misturado até formar uma massa a uma temperatura próxima de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e depois

extrusado ou moldado na forma desejada. Aditivos como corantes, agentes de acoplamento, estabilizadores, agentes de sopro, agentes de reforço e lubrificantes ajudam a formar o produto final. O material é, assim, idealizado em perfis sólidos, ocós ou maciços, em peças e produtos moldados por injeção (VILASECA *et al.*, 2018).

a. Propriedades da madeira plástica – *Plastic Lumber*

A *Plastic Lumber* pode ser flexionada e formar fortes curvas em arco. Sua estrutura permite que funcione como a madeira, uma vez que pode ser moldada, perfurada e cortada com ferramentas convencionais da mesma maneira que a madeira é trabalhada.

É à prova d'água (DIAS; ALVAREZ, 2017) e resistente a todos os tipos de podridão, mofo e insetos que afetam a estabilidade dimensional da madeira, como cupins (STRÖMBERG; KARLSSON, 2009; AZWA *et al.*, 2013), embora não seja tão rígida quanto a madeira e possa se deformar levemente em climas extremamente quentes (LAMPO; NOSKER, 1997).

O processo de produção permite um acabamento adequado e em condições de utilização, considerando que não precisa ser pintada, além de requerer pouca manutenção. Embora as propriedades de compressão deste painel sejam iguais ou superiores às da madeira, o módulo de elasticidade é muito baixo. O uso em estruturas de carga requer considerações diferentes e também pode apresentar problemas com a contenção de incêndio, uma vez que se deforma facilmente em altas temperaturas (LAMPO; NOSKER, 1997; MALVAR; TICHY; PENDLETON, 2001; DIAS; ALVAREZ, 2017).

b. Usos gerais da madeira plástica – *Plastic Lumber*

Seu uso é amplamente comprovado em coberturas externas, assim como em móveis de jardim, molduras de bancos de parques e *decks*. É um produto altamente resistente a trincas e fendas. Quando instalado adequadamente, sua trabalhabilidade permite que seja moldado com ou sem detalhes de madeira simulados.

Além disso, a *Plastic Lumber* pode ser usada em muitas outras aplicações, tais como:

- Pisos em superfície plana capaz de suportar peso, geralmente construída ao ar livre, elevada do solo.
- Trilhos e cercas que envolvam uma área determinada ao ar livre, construída a partir de postes conectados por painéis, fios, trilhos ou redes.
- Paisagismo em conjunto com outros materiais, como madeira, metal, tijolo, vinil alumínio, misturas de cimento e poliestireno reciclado.

- Janelas, portas e calços para uso industrial para apoiar objetos variados.
- Mobiliário variado para usos no interior de ambientes residenciais e comerciais.
- Estacas marinhas (ou paredão) construídas onde o mar e os processos costeiros associados impactam diretamente as formas de relevo da costa. Com o objetivo de proteger áreas de habitação humana, conservação e atividades de lazer.

2.3.3 *Compósito madeira plástica* – **Wood Plastic Composite (WPC)**

A madeira plástica (*Wood Plastic Composites* – WPC) é um tipo de material composto de fibra ou serragem de madeira e de termoplásticos, inclui PET, HDPE, LDPE, PP e PVC. A matéria-prima é 100% reciclada ou não, dependendo da origem. A mistura de polímeros mais fibras naturais confere alta resistência e durabilidade aos perfis produzidos por extrusão, coextrusão, no caso dos materiais mais modernos, ou compressão. O material utiliza de 30% a 50% de polímeros e o restante pode ser oriundo de outros setores, como das indústrias florestais, do agronegócio, e de outros materiais lignocelulósicos.

Este tipo de painel tem alta resistência a rachaduras, é impermeável e não gera subprodutos ou resíduos na fabricação. Pode ser trabalhado de maneira similar à madeira tradicional. Após o ano de 2010, esses produtos passaram a dominar o mercado devido à sua maior estabilidade em relação à manutenção da cor original e menor dilatação e contração. Estima-se que a origem do plástico no composto pode ser uma forma de reciclagem de plásticos, colaborando fortemente para evitar a derrubada de árvores. Nesse sentido, se valora que por cada 25 metros quadrados é evitada a derruba de uma árvore adulta.

a. *Produção de Wood Plastic Composite*

Este tipo de painel é produzido misturando-se partículas de madeira moídas e resina termoplástica aquecida. O método mais comum de produção é a extrusão, em que o material pode ser produzido de acordo com a forma desejada, embora também seja usada moldagem por injeção (FABIYI *et al.*, 2008). Os painéis WPC podem ser produzidos a partir de termoplásticos virgens ou reciclados, incluindo HDPE, LDPE, PVC, PP, ABS, PS e PLA.

Os painéis WPC à base de polietileno são os mais comuns. Aditivos como corantes, agentes de acoplamento, estabilizadores de UV, agentes de expansão, agentes espumantes e lubrificantes ajudam a adaptar o produto final à área de aplicação desejada. Podem apresentar variações de produtos sólidos ou ocos, além de peças moldadas por injeção, o que podem ser fabricados desde painéis de portas automotivas até capas de celulares. Clemons (2002) já

mencionava sua utilização em *decks*, grades, cercas, madeiras para paisagismo, revestimentos e tapumes, bancos de parque, quadros e interiores de móveis.

Devido à adição de material orgânico, os WPC geralmente são processados a temperaturas menores do que os plásticos tradicionais durante a extrusão e a moldagem por injeção.

Os WPC tendem a ser processados a temperaturas próximas a 28 °C inferiores ao mesmo material não preenchido. O processamento de WPC a temperaturas excessivamente altas aumenta o risco de cisalhamento, queima ou descoloração resultante do empuxo de um material muito quente por uma pequena abertura.

b. Vantagens e desvantagens

Os WPC não se corroem e são altamente resistentes ao apodrecimento, deterioração e ataque de agentes xilófagos, embora absorvam água nas fibras de madeira incorporadas no material (SCHIRP *et al.*, 2008; CATTO *et al.*, 2016). A absorção de água é mais pronunciada nos WPC com uma matriz hidrofílica como o PLA (ácido poliláctico), que também leva à diminuição da rigidez e resistência mecânicas.

As partículas de madeira contidas em sua composição são suscetíveis ao ataque de fungos, embora não tanto quanto a madeira maciça, e o componente polimérico é vulnerável à degradação por UV. É possível que a resistência e a rigidez sejam reduzidas pelo ciclo de congelamento e degelo, embora ainda estejam sendo realizados testes nesta área. Porém, algumas formulações de WPC são sensíveis à coloração de uma variedade de agentes (HOSSEINIHASHEMI; BADRITALA, 2017).

Embora esses materiais continuem a vida útil considerável, os polímeros e adesivos adicionados podem dificultar a reciclagem do compósito novamente após o uso. No entanto, eles podem ser reciclados facilmente em um novo composto madeira-plástico, semelhante ao concreto. Uma vantagem sobre a madeira é a capacidade de o material ser moldado para atender a quase qualquer formato desejado. Um WPC pode ser flexionado e fixado para formar fortes curvas de arco (TARRÉS *et al.*, 2019).

Outro ponto importante desse tipo de material é a falta de necessidade de tinta. Eles são fabricados em uma variedade de cores, mas estão amplamente disponíveis em tons de cinza e terra. Apesar do teor de celulose de até 70% (embora 50/50 seja mais comum), o comportamento mecânico dos WPC é mais semelhante aos polímeros puros, os quais são polimerizados sem adição de solventes (MURAYAMA *et al.*, 2018). Isso significa que os WPC têm menor resistência e rigidez do que a madeira e experimentam um comportamento dependente do tempo e da temperatura, sendo indicados, na maioria dos casos, para uso como elemento estrutural com alta inércia de momento, como parede (ARNANDHA *et al.*, 2017).

2.4 Painéis sanduíche WPC

Os painéis WPC mostram um bom conjunto de desempenho, mas as composições monolíticas são relativamente pesadas (geralmente mais pesadas que os plásticos puros), o que limita seu uso a aplicações onde o baixo peso não é essencial, como, por exemplo, em portas, mesas, janelas, móveis, cadeiras. O WPC na forma de composto estruturado em sanduíche permite uma combinação dos benefícios dos compósitos de polímeros de madeira tradicionais com a leveza de uma tecnologia de painel de plástico (TARRÉS *et al.*, 2019).

Os painéis tipo sanduíche WPC consistem em partículas de madeira na extremidade e no centro, polímeros de baixa densidade, o que leva a um aumento muito eficaz da rigidez do painel. As placas sanduíche WPC são usadas, principalmente, em aplicações automotivas, de transporte e construção, mas também em móveis. Processos de produção integrados, eficientes e em linha permitem produzir este tipo de painel mais resistente e rígido a custos mais baixos, em comparação com os painéis plásticos tradicionais ou os painéis WPC monolíticos (HAO *et al.*, 2018).

2.5 Desenho tecnológico dos painéis madeira plástica

2.5.1 Matérias-primas e máquinas

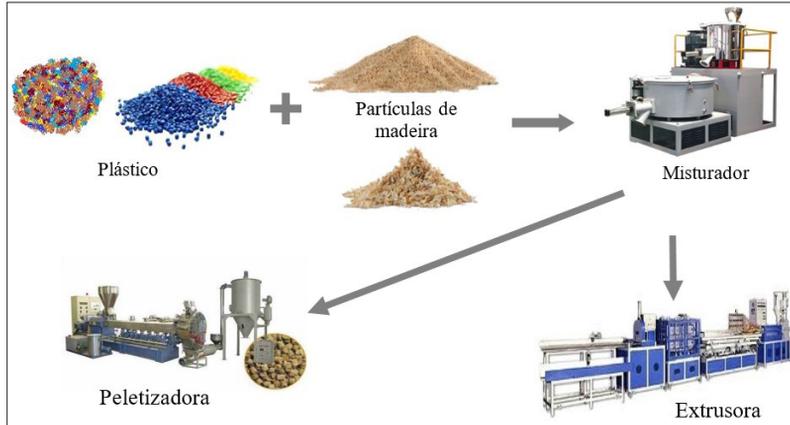
Geralmente, na produção de painéis madeira plástica, as empresas produtoras no mundo usam termoplásticos como PP, HDPE, LDPE, PET, e com mais frequência do que os de PVC, PS e outros, porque exigem temperaturas de processamento mais baixas, que oscilam entre 150 °C e 180 °C. Essas condições são adequadas para trabalhar com fibras e partículas lignocelulósicas, pois são temperaturas às quais as paredes celulares podem resistir antes da desnaturação térmica (LOPEZ *et al.*, 2018).

Por outro lado, o PVC e o restante dos termoplásticos exigem temperaturas de processamento mais altas (210 °C e 250 °C), e os compostos feitos com esses termoplásticos também exigem métodos de fabricação especiais que reduzam o tempo de exposição de fibras ou farinhas vegetais a altas temperaturas. Além disso, os termoplásticos podem ser reciclados para serem usados como matrizes de novos compostos, seja em misturas com fibras ou partículas de madeira, seja com termoplásticos virgens (ESPINACH, 2017).

No que diz respeito aos equipamentos, os painéis de madeira plástica podem ser manufaturados mediante três vias tecnológicas: extrusão, injeção e compressão. Cada tipo possui as características específicas de produção, tratamento da matéria-prima e condições de produção, como temperatura, pressão e tempo diferentes (Figura 1). No entanto, é mais comum

a produção por extrusão, sendo conferidas melhores propriedades físico-mecânicas, assim como o acabamento pode atingir padrões de qualidades maiores (ESSABIR *et al.*, 2017).

Figura 1: Matéria-prima, sequência e equipamentos utilizados na confecção de madeira plástica

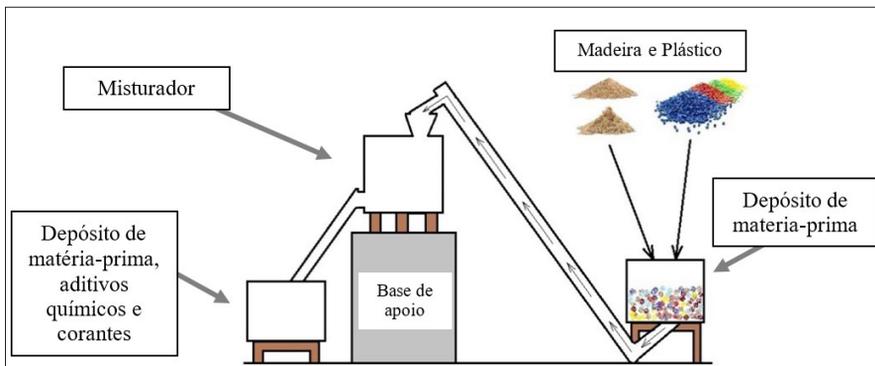


Fonte: Os autores.

2.5.2 Processo de mistura da matéria-prima

É realizado com o objetivo de obter uma boa interação entre cada um dos componentes do painel. Os resíduos termoplásticos passam pelo processo de amolecimento, tendo em conta que pode ser realizado em condições de temperatura de 100 °C durante 30 minutos, ou também pode ser feito sem usar a temperatura (Figura 2).

Figura 2: Ciclo de preparo da matéria-prima no misturador para formação da madeira plástica.



Fonte: Os autores.

Esse processo contribui para a qualidade do processo tecnológico, pois permite homogeneizar todos os componentes. Além disso, na mistura podem ser usados também corantes e aditivos químicos para atingir características e propriedades desejadas nos painéis (LOPEZ *et al.*, 2020).

a. Processo de peletização

O material misturado é transferido para uma máquina peletizadora, onde amolece o plástico a temperaturas que podem subir até 225 °C. Nesse processo, uma melhor homogeneidade do material é obtida pela fusão do plástico com as partículas de serragem de madeira. Essa mistura é transformada em pastilhas, que serão o subproduto que dará origem ao painel de madeira plástica (Figura 3). É importante mencionar que a temperatura de fusão dos resíduos termoplásticos não exceda a temperatura do processo tecnológico, pois eles podem ficar dispostos granularmente (sem fusão) dentro do painel, como pode acontecer em painéis madeira plástica manufaturado por compressão (ZHANG *et al.*, 2018).

Isso pode influenciar na diminuição das propriedades mecânicas pela dificuldade na formação das interfaces entre as partículas de plásticos e a serragem, assim como a mistura com os outros componentes, como aditivos e corantes. A produção do painel é possível porque uma vez que a matéria-prima misturada se agita e se insere pela entrada da máquina de granulação (peletizadora), o fluxo tecnológico da máquina permite o aquecimento a alta temperatura, a desidratação e o resfriamento (AGUILAR *et al.*, 2018).

Figura 3. Ciclo de formação do *pellet* para confecção da madeira plástica.



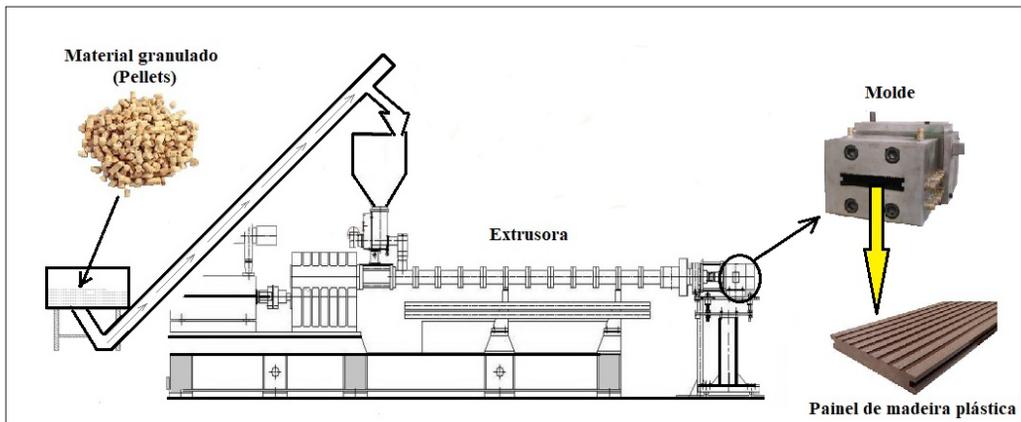
Fonte: Os autores.

b. Processo de extrusão

Neste processo, o sistema da máquina de extrusão, cuja resistência é enrolada em torno da parede na forma de espiral, permite o aquecimento pela condução de calor, assim o material é aquecido e favorece a estrutura e formação dos painéis madeira plástica. Isto é possível porque o material granulado é transportado por um espaço entre o parafuso em espiral. Neste local, a temperatura de fusão permite a formação de interfaces entre a matéria-prima e a parede do parafuso, comprimindo-a por meio da cabeça da extrusora e a saída do material moldado, permitindo assim se obter painéis de diferentes formas, como mencionado por Taufiq *et al.* (2018) (Figura 4).

Este é um processo contínuo em que o material deixa a matriz de extrusão em um estado semimacio, através da abertura da boca do molde, tomando a forma do produto a ser obtido, se desliza em uma bancada onde é resfriado por ar ou água, endurecendo-se à medida que esfria.

Figura 4: Ciclo de formação da madeira plástica pelo método de extrusão.



Fonte: Modificado de Taufiq *et al.* (2018).

2.5.3 Corte dos painéis

De acordo com as necessidades do cliente, é definido o comprimento do painel de madeira plástica. Para isso, é acionado o sensor da serra circular pelas lâminas de corte inferior e superior. Durante esse processo de extrusão, o painel mostra uma textura característica fornecida por um acabamento natural que o exime de pintura, verniz ou outros produtos que são usados nos diferentes painéis convencionais para melhor acabamento. A cor pode ser modificada durante o processo com um concentrado de cor (LOPEZ *et al.*, 2015).

2.6 Tendências da indústria de painéis madeira plástica no Brasil

Ainda não existem números oficiais que ofereçam informação sobre a situação das indústrias de painéis madeira plástica no Brasil. A madeira natural ainda é a preferência dos consumidores, apesar de serem conhecidas as vantagens dos painéis madeira plástica devido as suas propriedades, além do seu potencial no setor da construção civil. Isso faz com que o setor da indústria da madeira plástica siga em expansão.

As fábricas de madeira plástica pioneiras no Brasil têm observado sua produção aumentar muito ao longo dos últimos anos. O leque de produtos é vasto e as aplicabilidades vão desde dormentes para ferrovias e tampas de bueiros até móveis, cercas, bancos, espreguiçadeiras, lixeiras, e até artefatos utilizados na construção. Um bom exemplo neste sentido está em São Paulo e no Rio de Janeiro, com aquisição de tampas para bueiros, reduzindo um problema social relacionado ao furto de tampas, uma vez que o ferro fundido (utilizado nas tampas antigas) possui um alto valor agregado no mercado (TRIGUEIRO; BOCARDI, 2012), o que acaba incentivando e aquecendo este novo ramo industrial da madeira plástica.

Além das tampas de bueiro, locais públicos, como o Parque Nacional de Itatiaia, investiram em bancos, e três pontes foram construídas com o material. Um shopping, no Estado do Rio de Janeiro, possui bancos de madeira plástica na estrutura de sua praça, inclusive, assim como um shopping no município de Rio de Claro, SP, onde um *deck* e bancos de madeira plástica compõem um bonito ambiente.

Segundo algumas indústrias de madeira plástica no país, apontam que, em termos de preço, a madeira plástica ainda é, em média, 30% mais cara que a madeira tradicional, comparável ao preço das madeiras nobres, mas as vantagens desse material, que serão apresentadas posteriormente e a durabilidade do mesmo o tornam viável e competitivo.

No Brasil, o responsável pelas primeiras pesquisas sobre reciclagem do plástico, durante a década de 1990, foi o Instituto de Macromoléculas, por meio da Professora Eloísa Mano, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Este instituto realizou pesquisas nas áreas de propriedades físicas e mecânicas das madeiras plásticas, possuindo, inclusive, uma marca registrada, o que demonstra as perspectivas de expandir o desenvolvimento deste material no país.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no apresentado, pode-se inferir sobre a importância no desenvolvimento da indústria de painéis madeira plástica no Brasil. O processo tecnológico usado na manufatura desses painéis permite obter produtos de alta qualidade, com perspectivas competitivas, comparativamente a outros produtos derivados da madeira, em condições de intempérie adversas.

A predominância dos pressupostos ambientais, em função da reciclagem de resíduos altamente poluentes ao meio ambiente, permite inferir que o modelo da indústria de painéis madeira plástica possibilita o uso racional de recursos naturais. Isso propicia um aumento do valor agregado dos produtos florestais e oferece produtos de usos diversos com potencialidades inovadoras na construção civil.

O sistema produtivo dos painéis madeira plástica abrange os setores sociais, ambientais e econômicos, existindo desta forma uma inter-relação forte entre estes setores. A sociedade adquire conhecimentos sobre a importância da reciclagem de resíduos e contribui para um ambiente equilibrado e menos poluído, além de dispor de um produto de alta qualidade de grande demanda para satisfazer as necessidades sociais.

Referências

AGUILAR, M.; VILASECA, F.; TARRÉS, Q.; JULIÁN, F.; MUTJÉ, P.; ESPINACH, F. X. Extending the value chain of corn agriculture by evaluating technical feasibility and the quality of the interphase of chemo-thermomechanical fiber from corn stover reinforced polypropylene biocomposites. **Composites Part B: Engineering**, v. 137, p. 16-22, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.006>

ARNANDHA, Y.; SATYARNO, I.; AWALUDIN, A.; SEPTIA, I.; PRASETYA, Y.; AGUNG, D.; CAKRA, D. M.; AMALIA, A. Physical and mechanical properties of WPC board from sengon sawdust and recycled HDPE Plastic. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 695-704, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.412>

ASHORI, A.; NOURBAKHSI, A. Reinforced polypropylene composites: Effects of chemical compositions and particle size. **BioResource Technology**, v. 101, n. 7, p. 2515-2519, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.022>

AZWA, Z. N.; YOUSIF, B. F.; MANALO, A. C.; KARUNASENA, W. A Review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, v. 47, n. 5, p. 424-442, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988, 292 p. Disponível em: https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988_26.06.2019/ind.asp. Acesso em: 10 abr. 2020.

CATTO, A. L.; MONTAGNA, L. S.; ALMEIDA, S. H.; SILVEIRA, R. M. B. SANTANA, R. M. C. Wood plastic composites weathering: Effects of compatibilization on biodegradation

in soil and fungal decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 109, p. 11-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.026>

CHAUDEMANCHE, S.; PERROT, A.; PIMBERT, S.; LECOMPTE, T.; FAURE, F. Properties of an industrial extruded HDPE-WPC: The effect of the size distribution of wood flour particles. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 543-552, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.061>

CLEMONS, C. Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 6, p. 10-18, 2002. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/8778>

DEAC, T.; TUTUNARU, L.; GASPAR, F. Environmental impact of sawdust briquettes use-experimental approach. **Energy Procedia**, v. 85, p. 178-183, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.324>

DIAS, B. Z.; ALVAREZ, C. E. Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic composites. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p. 201-219, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000200153>

ESSABIR, H.; BENSALAH, M. O.; RODRIGUE, D.; BOUHIFID, R.; QAISS, A. A comparison between bio- and mineral calcium carbonate on the properties of polypropylene composites. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 549-555, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.199>

ESPINACH, F. X.; MÉNDEZ, J. A.; GRANDA, L. A.; PELACH, M. A.; AGUILAR, M.; MUTJÉ, P. Bleached kraft softwood fibers reinforced polylactic acid composites, tensile and flexural strengths. *In*: LAU, K. A.; HUNG, A. P. Y. **Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites**, Chapter 5, p. 73-90. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100656-6.00005-4>

FABIYI, J. S.; MCDONALD, A. G.; WOLCOTT, M. P.; GRIFFITHS, P. R. Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 8, p. 1405-1414, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.024>

GARCÍA, M.; HIDALGO, J.; GARMENDIA, I.; GARCÍA-JACA, J. Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 11, p. 1772-1776, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.010>.

HAO, X.; ZHOU, H.; XIE, Y.; MU, H.; WANG, Q. Sandwich-structured wood flour/HDPE composite panels: Reinforcement using a linear low-density polyethylene core layer. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 489-496, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.246>.

HORTA, J. F.; SIMÕES, F. J.; MATEUS, A. Study of wood-plastic composites with reused high-density polyethylene and wood sawdust. **Procedia Manufacturing**, v. 12, p. 221-229, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.026>.

HOSSEINIHASHEMI, S.; BADRITALA, A. The Influence of a treatment process on the reaction to water of durable and water-resistant wood/plastic composites. **Drewno**, v. 60, n. 200, p. 21-34, 2017. <http://doi.org/10.12841/wood.1644.3985.221.05>.

KABOORANI, A. Characterizing water sorption and diffusion properties of wood/plastic composites as a function of formulation design. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 164-172, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.120>.

KESKISAARI, A.; KÄRKI, T. The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 257-261, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.023>.

LAMPO, R. G.; NOSKER, T. J. **Development and testing of plastic lumber materials for construction applications**. DIANE Publishing. USACERL Technical Report 97/95, 1997. 88 p.

LISPERGUER, J.; BUSTOS, X.; SARAIVIA, Y.; ESCOBAR, C.; VENEGAS, H. Efecto de las características de harina de madera en las propiedades físico-mecánicas y térmicas de poli-propileno reciclado. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 15, n. 3, p. 321-336, 2013. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000025>.

LOPEZ, Y. M.; PAES, J. B.; RODRÍGUEZ, E. M.; GUSTAVE, D.; GONÇALVES, F. G. Wood particleboards reinforced with thermoplastics to improve thickness swelling and

mechanical properties. **Cerne**, v. 24, n. 4, p. 369-378, 2018. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042582>.

LOPEZ, Y. M.; PAES, J. B.; GUSTAVE, D.; GONÇALVES, F. G.; MENDEZ, F. C.; NAN-TET, A. C. T. Production of wood-plastic composites using *Cedrela odorata* sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 118723, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>.

LOPEZ, Y. M.; GONZÁLEZ, M. G.; RODRÍGUEZ, E. M. Impacto ambiental de residuos industriales de aserrín y plástico. Usos para la industria de tablero en Cuba. **Revista Avances**, v. 16, n. 2, p. 91-99, 2014. <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/50>.

LOPEZ, Y. M.; CONCEPCIÓN, R. R. F.; GONZÁLES, M. G.; RODRÍGUEZ, E. M. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 227-236, 2014. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.003>.

MACHADO, J. S.; SANTOS, S.; PINHO, F. F. S.; LUÍS, F.; ALVES, A.; SIMÕES, R.; RODRIGUES, J. C. Impact of high moisture conditions on the serviceability performance of wood plastic composite decks. **Materials & Design**, v. 103, p. 122-131, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.030>.

MALVAR, L. J.; TICHY, R.; PENDLETON, D. E. **Fire**. Engineered wood composites for naval waterfront facilities. *In*: INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, 46. Long Beach, California, **Anais** [...]. May. 2001.

MRAD, H.; ALIX, S.; MIGNEAULT, S.; KOUBAA, A.; PERRÉ, P. Numerical and experimental assessment of water absorption of wood-polymer composites. **Measurement**, v. 115, p. 197-203, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.011>.

MORENO, D. D.; SARON, C. Low-density polyethylene waste/recycled wood composites. **Composite Structures**, v. 176, p. 1152-1157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.076>.

MORENO, D. D.; HIRAYAMA, D.; SARON, C. Accelerated aging of pine wood waste/ recycled LDPE composite. **Polymer Degradation and Stability**, v. 149, p. 39-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.014>.

MURAYAMA, K.; YAMAMOTO, M.; KOBORI, H.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S.; AOKI, K.; ITO, H.; OGOE, S.; OKAMOTO, M. Mechanical and physical properties of wood plastic composites containing cellulose nanofibers added to wood flour. **Forest Products Journal**, v. 68, n. 4, p. 398-404, 2018. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-18-00006>.

OU, R.; XIE, Y.; WOLCOTT, M.; SUI, S.; WANG, Q. Morphology, mechanical properties, and dimensional stability of wood particle/high density polyethylene composites: Effect of removal of wood cell wall composition. **Materials & Design**, v. 58, p. 339-345, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.018>.

OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B. Biological resistance of eucalypt wood species to dry wood termites. **Floresta Ambiente**, v. 26, n. 4, e20170558, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.055817>.

ORTEGA, H. O.; LLOP, M. F.; ESPINACH, F. X.; TARRÉS, Q.; ARDANUY, M.; MUTJÉ, P. Study of the flexural modulus of lignocellulosic fibers reinforced bio-based polyamide11 green composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, p. 126-132, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.001>.

SAE-LIM, P.; AHT-ONG, D. Physical and Mechanical Properties of Wood-Plastics Composites: effect of types and contents of wood flour. **Advanced Materials Research**, v. 747, p. 379-382, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.747.379>

SCHIRP, A.; IBACH, R. A.; PENDLETON, D. E.; WOLCOTT, M. P. Biological degradation of wood-plastic composites (WPC) and strategies for improving the resistance of WPC against biological decay. *In: Development of Commercial Wood Preservatives: Efficacy, Environmental, and Health Issues*. Schultz, T. P. *et al.* (Ed.). Chapter 29, ACS SYMPOSIUM SERIES 982, Distributed by Oxford University Press: New York, p. 480-507. 2008.

SOCALINGAMEA, L.; BOURMAUD, A.; PERRINA, D.; BÉNÉZETA, J. C.; BERGERETA, A. Reprocessing of wood flour reinforced polypropylene composites: Impact of particle size and coupling agent on composite and particle properties. **Polymer Degradation and Stability**, v. 113, p. 72-85, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.020>

STRÖMBERG, E.; KARLSSON, S. The Effect of biodegradation on surface and bulk property changes of polypropylene, recycled polypropylene and polylactide biocomposites. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 63, n. 8, p. 1045-1053, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.08.003>

TARRÉS, Q.; VILASECA, F.; FRANCO, P. J. H.; ESPINACH, F. X.; AGUILAR, M. C.; MUTJÉ, P. Interface and micromechanical characterization of tensile strength of bio-based composites from polypropylene and henequen strands. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 319-326, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.010>

TAUFIQ, M. J.; MANSOR, M. R.; MUSTAFA, Z. Characterization of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend. **Composite Structures**, v. 189, p. 510-515, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.090>

TERZI, E.; KARTAL, S. N.; MUIN, M.; HASSANIN, A. H.; HAMOUDA, T.; KILIÇ, A.; CANDAN, Z. Biological performance of novel hybrid green composite produced from glass fibers and jute fabric skin by the VARTM process. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 662-677, 2018. <http://ncsu.edu/bioresources>

TURKU, I.; KESKISAARI, A.; KÄRKI, T.; PUURTINEN, A.; MARTTILA, P. Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. **Composite Structure**, v. 161, p. 469-476, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.073>

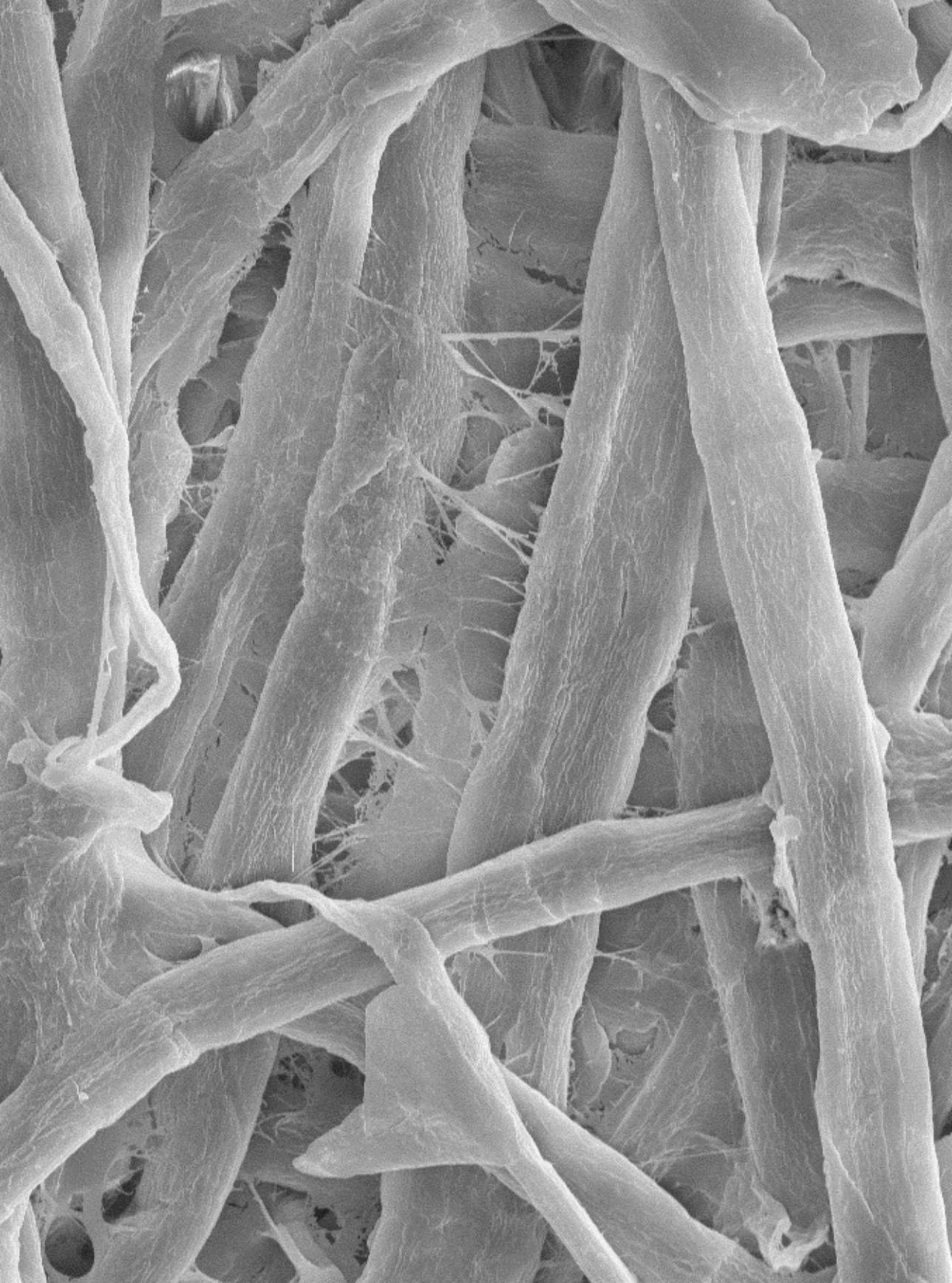
THANATE, R.; KAMPANART, T. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 349-357, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>

TRIGUEIRO, A.; BOCARDI, R. Madeira plástica evita derrubada de árvores para fabricar móveis. **Jornal da Globo**. Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2012/09/madeira-plastica-evita-derrubada-de-arvorespara-fabricar-moveis.html>. Acesso em: 20 mar. 2015.

VILASECA, F.; REY, R.; SERRAT, R.; ALBA, J.; MUTJE, P.; ESPINACH, F. X. Macro and micro-mechanics behavior of stiffness in alkaline treated hemp core fibres polypropylene-based composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 144, p. 118-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.029>

WEI, L.; MCDONALD, A. G.; FREITAG, C.; MORRELL, J. J. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodurability of wood plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 7, p. 1348-1361, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.027>.

ZHANG, X.; HAO, X.; HAO, J.; WANG, Q. Heat transfer and mechanical properties of wood-plastic composites filled with flake graphite. **Thermochimica Acta**, v. 664, p. 26-31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.04.003>.



Nanoceluloses: produção e aplicações

*Elaine Cristina Lengowski
Renato Augusto Pereira Damásio
Walter Torezani Neto Boschetti*

INTRODUÇÃO

A nanotecnologia tem proporcionado descobertas valiosas, não somente para o desenvolvimento de novos produtos, mas também no sentido de explorar os recursos de forma mais inteligente. Nos últimos anos, muita atenção foi centrada no desenvolvimento de materiais sustentáveis para diversas aplicações (KHALIL *et al.*, 2012, 2013, 2014). Neste contexto, a utilização de fontes renováveis e biodegradáveis para produção de fibras vegetais usadas no reforço de materiais compósitos possui grande destaque, devido à geração e ao desenvolvimento tecnológico de materiais em conformidade com esses conceitos (KAMEL, 2007; KALIA *et al.*, 2011).

Com o crescente desenvolvimento tecnológico, a celulose tem se destacado mundialmente como um biopolímero-alvo para estudos e pesquisas quanto à produção de nanomateriais. Os nanomateriais são partículas com pelo menos uma de suas dimensões em nanômetros. Atualmente muitos setores vêm investindo em pesquisas utilizando nanomateriais para aprimoramento e desenvolvimento de novos produtos. Dentre os diversos produtos derivados do beneficiamento da madeira ou de fibras vegetais, a nanocelulose é o que possui maior valor agregado e uma variedade de potenciais e aplicações.

As nanoceluloses podem ser obtidas por diferentes processos e em estruturas e morfologias diferenciadas. Através do processamento mecânico é produzida a celulose nanofibrilada (CNF) ou

a celulose microfibrilada (CMF); já através da hidrólise são produzidas as celuloses nanocristalinas (CNC). Para obtenção dessas nanoceluloses, existem muitos fatores de relevância, principalmente no que tange às técnicas de individualização das microfibrilas de celulose, que estão imersas em uma matriz constituída de hemiceluloses e lignina (KHALIL *et al.*, 2014; NG *et al.*, 2015).

A nanocelulose é caracterizada por ser um material leve, transparente e mais rígido do que o aço inoxidável, fatores que têm despertado grande interesse acadêmico e empresarial. Trata-se de um material abundante e originado de fibras naturais vegetais, renovável e biodegradável, que tem vantagem competitiva em relação aos materiais fósseis e industrializados (DUFRESNE, 2008; EICHHORN *et al.*, 2010).

No que tange às suas aplicações, a nanocelulose tem despertado a atenção de pesquisadores e industrialistas no desenvolvimento de novos materiais, reforço de materiais compósitos, na indústria farmacêutica, como na liberação controlada de medicamentos, e na indústria cosmética, como estabilizante de emulsões. Esse grande interesse se deve principalmente às características intrínsecas de alta resistência e rigidez desses materiais, aliadas aos seus baixos pesos moleculares. A CNF e a CNC têm grande potencial de emprego na fabricação de diversos produtos, por exemplo, muitas aplicações em nanocompósitos, fabricação de papel, aditivos de revestimentos, papéis de segurança, embalagens de alimentos e barreiras de gás em materiais compósitos (BELBEKHOUCHE *et al.*, 2011). No entanto, a grande utilização desses biopolímeros é como agente de reforço mecânico, ao serem aplicados em uma matriz polimérica (KHALIL *et al.*, 2012).

1 CLASSIFICAÇÃO, PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DA NANOCELULOSE

O termo nanocelulose começou a ser empregado nos anos 1980, embora os primeiros estudos em 1970 já apontassem para uma classe de materiais fibrilados denominada celulose microfibrilada (CMF) produzidos, por polpa celulósica por meio do microprocessamento, em que era obtido um gel de microfibrilas (TURBAK *et al.*, 1983; MITCHELL *et al.*, 2018). No entanto, o estudo das nanoceluloses como reforço em compósitos e nanocompósitos avançou muito desde a década de 1990 (FAVIER *et al.*, 1995).

Nanocelulose é um termo geral que se refere a uma classe de materiais que possui pelo menos uma de suas dimensões em escala nanométrica (LENGOWSKI *et al.*, 2019a; BHARIMALLA *et al.*, 2017). As nanoceluloses podem ser produzidas por diferentes fontes e rotas de obtenção, como fibrilação e hidrólise (química ou enzimática) ou suas combinações (BHARIMALLA *et al.*, 2017; SALAS *et al.*, 2019; FUJISAWA *et al.*, 2011).

Considerando a rota *top-down*, as nanoceluloses podem ser classificadas em três tipos: celulose nanocristalina (CNC), celulose microfibrilada (CMF) e celulose nanofibrilada (CNF) (SEHAQUI *et al.*, 2011; FUJISAWA *et al.*, 2011). Há também a nanocelulose bacteriana (CB)

(KLEMM *et al.*, 2011; MITCHELL *et al.*, 2018), obtida pela rota *bottom-top*, porém sua aplicação não será contemplada neste capítulo. Apesar das incontáveis aplicações e vantagens, um dos fatores que limitou o desenvolvimento de produtos e sua aplicação foi o gasto energético para produção, que inicialmente era elevando (SIRO; PLACKETT, 2010). No entanto, hoje há indicativos de produção de nanocelulose nanofibrilada a partir de 300 Kw/h/tonelada (LENGOWSKI *et al.*, 2020a).

Existe variada nomenclatura para designar as nanoceluloses. Nanocristais de celulose (CNC) são também conhecidos como *nanowhiskers* ou *whiskers* (JOHN; THOMAS, 2008; PETERSSON; OKSMAN, 2006; PETERSSON *et al.*, 2007), nanobastões (DUJARDIN *et al.*, 2003) e cristais de celulose (IWAMOTO *et al.*, 2007). Celulose nanofibrilada (CNF) é também conhecida como celulose nanofibrilar (AHOLA *et al.*, 2008c; STENSTAD *et al.*, 2008), nanofibras de celulose (ABE *et al.*, 2007) ou mesmo nanofibrilas de celulose (HENRIKSSON *et al.*, 2008). Os diversos termos utilizados descrevem as nanofibras de acordo com suas principais características morfológicas (comprimento, diâmetro e relação de aspecto) e, especialmente, quanto ao método de produção. Apesar de nomes diferentes, todos se referem a nanoceluloses, que são polímeros com pelo menos uma de suas dimensões na escala nanométrica.

Existem diversos métodos para extração de nanoceluloses a partir de diferentes biomassas vegetais, que variam conforme o tipo de nanocelulose (EICHHORN *et al.*, 2010). Os nanocristais de celulose (CNC) podem ser extraídos utilizando um processo químico de hidrólise ácida seguido de agitação mecânica da suspensão de nanocristais em água; já a celulose microfibrilada (CMF) e a celulose nanofibrilada (CNF) podem ser obtidas a partir de um método de desintegração mecânica da polpa celulósica em água, ou utilizando a combinação da oxidação química com o reagente 2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxy (TEMPO), seguida da desintegração mecânica em água (FUJISAWA *et al.*, 2010).

A CMF é definida como fibras de diâmetro entre 25 e 100 nanômetros, enquanto a CNF são as nanoceluloses com diâmetro entre 5 e 30 nanômetros e comprimento variável entre 2 e 10 micrômetros. Tanto a CMF quanto a CNF apresentam zonas amorfas e cristalinas compondo a sua estrutura. Por outro lado, a CNC apresenta forma de pequenos cilindros altamente cristalinos, com diâmetro de 3 a 50 nanômetros, dependendo da fonte de extração e condições de hidrólise (SEHAQUI *et al.*, 2011).

Além de altas propriedades mecânicas, as nanoceluloses apresentam outras características vantajosas, como biocompatibilidade, transparência e alta reatividade, devido à presença dos grupos hidroxílicos (ZIMMERMANN *et al.*, 2010). A principal razão para utilizar nanocelulose como reforço em compósitos deve-se à sua alta rigidez. Nanoceluloses do tipo CNC têm módulo de elasticidade maior que o de materiais como o aço, alumínio e vidro (EICHHORN *et al.*, 2010), e isto é particularmente importante, por exemplo, para a indústria automotiva (DUFRESNE, 2008).

O módulo de elasticidade ao longo da cadeia do cristal de celulose foi calculado por diferentes autores, utilizando os métodos de difração por raios X e espectroscopia Raman (GILLIS, 1970; SAKURADA; NUKUSHINA; ITO, 1962; TASHIRO; KOBAYASHI, 1991), e foi estimado entre 130 GPa e 250 GPa. O elevado desempenho mecânico das nanoceluloses pode ser explicado pelo seu alto comprimento de cadeia (DP) e pela adequada relação entre as dimensões das fibrilas de celulose, que podem ser medidos pelas técnicas de cromatografia por exclusão de tamanho (GPC) e dispersão de luz dinâmica (DLS), respectivamente.

1.1 Celulose micro e nanofibrilada

A parede celular das células da madeira é composta por camadas formadas por agregados de microfibrilas combinados com hemiceluloses e lignina (SJÖSTRÖM, 1993). A etapa inicial é a separação destas fibras, sendo esta geralmente associada ao processo químico kraft, utilizado para obtenção de polpa celulósica (LENGOWSKI *et al.*, 2019a). A partir das fibras de celulose, seguem-se para processos químicos e/ou mecânicos e/ou biológicos (FRONE *et al.*, 2011) objetivando a separação de nanoestruturas de celulose a partir da parede celular. As microfibrilas que formam a parede celular apresentam dimensões nanométricas com cerca de dezenas de nanômetros de diâmetro. As fibrilas elementares que originam a celulose nanofibrilada compõem agregados de fibrilas elementares que, em conjunto, formam as microfibrilas (CARRASCO, 2011).

As celuloses micro e nanofibrilada (CNF) são originadas a partir da desintegração mecânica das fibras celulósicas, sobretudo de suas superfícies, promovendo o rompimento da parede celular e a posterior exposição das fibrilas e microfibrilas, que estavam anteriormente situadas no interior das fibras (SYVERUD *et al.*, 2011). Esse processo resulta em aumento da superfície externa, possibilitando maior área de contato e melhor ligação entre as microfibrilas de celulose nos grupos hidroxílicos terminais reativos.

As CMF e CNF podem ser isoladas com sucesso a partir de fibras vegetais, utilizando processos que empregam forças de alto cisalhamento, homogeneização ou refinação (ZIMMERMANN *et al.*, 2004; IWAMOTO *et al.*, 2007; ABE *et al.*, 2007). Alguns métodos que podem ser empregados nessa fibrilação são a moagem, uso de homogeneização de alta pressão com nitrogênio líquido, explosão de vapor, ultrassom de alta intensidade etc. (LENGOWSKI *et al.*, 2019a).

Para um menor gasto energético e obtenção de nanoceluloses menores, alguns pré-tratamentos podem ser usados antes dos processos mecânicos para promover a acessibilidade dos grupos hidroxila, aumentar a superfície interna, alterar a cristalinidade, quebrar as ligações de hidrogênio da celulose e, assim, aumentar a reatividade das fibras. Entre os pré-tratamentos, podem ser citadas a hidrólise enzimática, química ou alcalina (ROJAS *et al.*, 2015). Além desses métodos, pode-se fazer a combinação entre eles, a fim de melhorar a

qualidade da fibrilação da parede celular. A produção de CNF pode combinar esses diferentes métodos ainda com o emprego de pré-tratamentos, para a melhoria do seu isolamento.

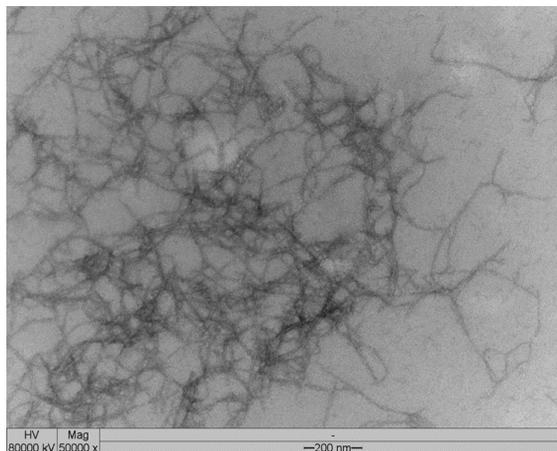
Todos esses métodos levam à produção de gel com elevado teor de água, que pode ainda ser transformado em pó, por meio de técnicas de liofilização ou através de secagem por aspersão (KOLAKOVIC *et al.*, 2011). A celulose kraft branqueada tem sido frequentemente utilizada como material de partida para a produção de celulose nanofibrilada (IWAMOTO *et al.*, 2005; JANARDHAN; SAIN, 2006; SAITO *et al.*, 2006; 2007; 2009).

Quanto às dimensões, o comprimento das cadeias destes tipos de celulose é de vários micrômetros, enquanto seu diâmetro encontra-se em escala nanométrica entre 5 nm e 60 nm (KLEMM *et al.*, 2011; CARRASCO, 2011).

A CNF apresenta zonas com elevada intensidade de fibrilações (Figura 1) devido às forças de cisalhamento a que as fibras são submetidas no processo de obtenção, e nessas fibrilas há regiões amorfas e cristalinas que compõem a cadeia mais alongada no sentido longitudinal. Dessa forma, o longo comprimento das cadeias de celulose nanofibrilada, associado à sua superfície que contém vasta gama de grupos hidroxílicos expostos, potencializa a formação de inúmeras ligações de hidrogênio (PÄÄKKÖ *et al.*, 2007).

O método mais comumente utilizado para produção de CNF e CMF é o moído de discos, em que a atuação do equipamento consiste em um conjunto de discos: um disco rotatório e um disco fixo. Há uma abertura ajustável entre os discos para que, por meio do contato mecânico, as fibras de celulose sejam desfibriladas por forças de cisalhamento e compressão geradas pelos discos de moagem (VIANA, 2013).

Figura 1: Celulose nanofibrilada visualizada por micrografia eletrônica de transmissão (MET), aumento de 50.000x.



Fonte: Os autores.

Durante o processo de desfibrilação mecânica, ocorre a diminuição significativa no tamanho das fibras e o conseqüente aumento de sua área específica, devido à constante exposição das microfibrilas de celulose. Uma área específica maior permite o maior número de ligações entre as nanofibrilas, o que resulta em maior densidade e maior transparência (JONOBI *et al.*, 2009; VIANA, 2013). Apesar disso, deve-se levar em conta o alto consumo de energia requerido no processo mecânico, uma vez que este influencia os custos de produção.

A deslignificação das fibras celulósicas favorece a fibrilação e reduz a energia consumida durante o processo de moagem e obtenção destas nanoceluloses (ABE *et al.*, 2007; IWAMOTO *et al.*, 2008; MORÁN *et al.*, 2008). Dessa forma, a remoção da lignina das fibras por processos de deslignificação é etapa de grande importância para obtenção das nanoceluloses.

O potencial de reforço das nanoceluloses está diretamente relacionado com a qualidade da fibrilação (ZIMMERMANN *et al.*, 2010), e uma fibrilação de alta qualidade pode ser obtida com a escolha do pré-tratamento e da matéria-prima adequados.

Vários setores industriais, como o automobilístico, de construção civil e de embalagens, vêm desenvolvendo produtos à base de biopolímeros (compósitos e nanocompósitos), utilizando como reforço mecânico as fibras naturais e seus derivados. Portanto, pode-se antecipar que o uso comercial destas nanoceluloses terá um crescimento exponencial nos próximos anos.

1.2 Celulose nanocristalina

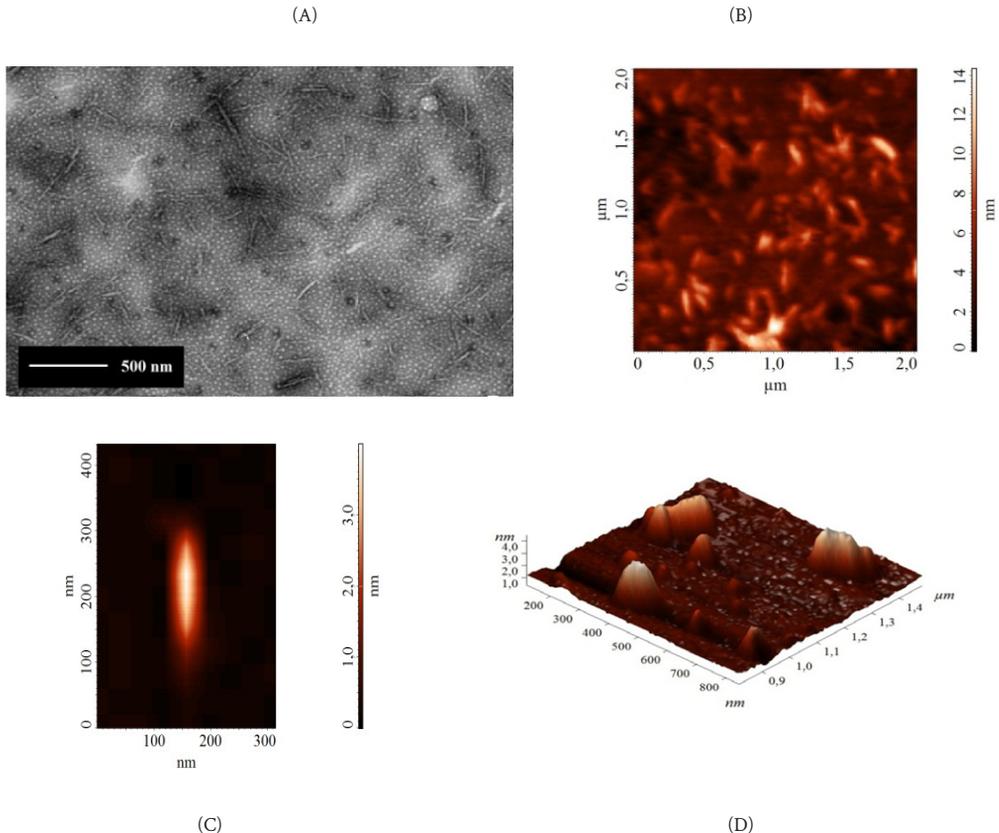
A celulose nanocristalina (CNC) é similar a pequenas agulhas, com formato cilindros ou bastonetes de carácter cristalino, isolados a partir da hidrólise ácida das fibras (Figura 2). O mecanismo de obtenção da CNC por meio de hidrólise ácida envolve a remoção das regiões amorfas das fibrilas elementares de celulose por hidrólise, restando apenas as regiões cristalinas (PÄÄKKÖ *et al.*, 2007).

Essa estrutura altamente ordenada pode conferir não somente alta resistência, mas também mudanças significativas em algumas propriedades importantes, quando agregada à composição de materiais elétricos, ópticos, magnéticos, ferromagnéticos, dielétricos e condutivos (MILEWSKI, 1994).

O processo para isolamento das CNC a partir de matérias-primas celulósicas compreende várias etapas, tendo início no pré-tratamento da matéria-prima, quando o material é deslignificado e grande parte do conteúdo de hemiceluloses é extraída. Logo após é realizada a etapa de hidrólise ácida por meio de ácido concentrado ou por ação enzimática, em que são preservados os domínios cristalinos. A hidrólise ácida, utilizando ácidos fortes como sulfúrico e clorídrico, é atualmente o método comercial utilizado para obtenção de CNC. Em seguida ocorre a lavagem por centrifugação, diálise da suspensão até neutralidade, dispersão

dos nanocristais de celulose, filtração da suspensão e secagem por liofilização ou secagem a calor (HABIBI *et al.*, 2010; LENGOWSKI *et al.*, 2013).

Figura 2: Nanocristais de celulose visualizados por (a) microscopia eletrônica de transmissão (MET); (b) microscopia de força atômica (MFA), varredura de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$; (c) MFA, varredura de $300 \times 400 \text{ nm}^2$, detalhe de um nanocristal; (d) Imagem 3D da superfície de uma população de nanocristais.



Fonte: Os autores.

O método mais utilizado de obtenção de nanocristais de celulose é a hidrólise com ácido forte, por meio da qual são obtidos nanocristais de 100 nm a 200 nm de comprimento e 20 nm a 40 nm de largura (CAO *et al.*, 2012). Pode-se dizer que a região amorfa na celulose é de mais fácil acesso ao ácido e mais suscetível à ação hidrolítica do que os domínios cristalinos. A ação do ácido forte nas fibras de celulose ocorre primeiramente nas regiões amorfas da celulose, pois, além de possuírem menor densidade em relação às regiões cristalinas, são regiões de acesso mais fácil.

Várias condições de hidrólise ácida têm sido estudadas com o objetivo de avaliar a natureza físico-química dos nanocristais de celulose obtidos. Dentre as diversas metodologias destaca-se o uso do ácido sulfúrico na concentração entre 55-64% m/m, com temperatura de reação entre 45 °C e 60 °C, e tempo de hidrólise variável (BECK-CANDANEDO *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2012). A ação do ácido sulfúrico promove a esterificação das hidroxilas pelos íons sulfato do ácido (SONESSO, 2011). Esse fato faz com que os nanocristais tenham carga superficial negativa. Essa estabilização aniônica via forças de atração/repulsão da dupla camada elétrica é provavelmente a razão da estabilidade da suspensão coloidal dos nanocristais (LU *et al.*, 2010).

A estabilidade eletrostática dos cristais depende do tipo de ácido utilizado, sendo comumente empregados o ácido sulfúrico e o clorídrico (SALAS *et al.*, 2019). Devido à presença de cargas negativas na superfície dos cristais, as CNC produzidas com ácido sulfúrico são mais estáveis e dispersas em água. Já as CNC produzidas com ácido clorídrico são mais propensas a se aglomerarem em solução aquosa (HABIBI *et al.*, 2010).

As nanopartículas têm excelentes propriedades considerando a baixa densidade da celulose, tais como elevada rigidez (TANPICHAI *et al.*, 2012), elevado módulo de elasticidade (SHINODA *et al.*, 2012) e baixo coeficiente de expansão térmica (NOGI *et al.*, 2009).

2 APLICAÇÕES DAS NANOCELULOSES

O potencial de aplicação das nanoceluloses é amplamente estendido, especialmente no que tange ao tipo de nanocompósito, celulose nanocristalina ou nanofibrilada.

A elevada resistência e rigidez bem como as pequenas dimensões das nanoceluloses fornecem propriedades úteis para reforço em matrizes poliméricas, a qual pode ser usada em uma ampla gama de aplicações, as quais são consideradas principalmente na indústria de papéis e embalagens, no setor de construção civil em adesivos estruturais e não estruturais, na indústria moveleira, nos setores automobilístico, farmacêutico, de cosméticos, de aeronáutica e de produtos eletrônicos (KALIA *et al.*, 2011; LENGOWSKI *et al.*, 2019a; 2019b; 2020a; 2020b; 2020c). Além disso, as nanoceluloses podem ser aplicadas em membranas de células combustíveis de hidrogênio, aditivo para papel eletrônico de alta qualidade, membranas de ultrafiltração para purificação da água e outros solventes, e em membranas para recuperar minerais e óleos (BROWN, 1998).

2.1 Uso das nanoceluloses na indústria de papéis e embalagens

A arte de produzir papel iniciou há mais de dois milênios devido à necessidade de se comunicar e registrar as descobertas; hoje o papel é empregado para os mais diversos usos, como

em impressão, higiene, escrita e embalagens. Desde o desenvolvimento do processo Kraft, em 1930, a indústria busca constantemente aprimorar a qualidade do papel, seja por melhora do processo, seja por emprego de aditivos.

Nas últimas décadas, alguns usos tradicionais do papel entraram em declínio, no entanto, a incorporação da nanotecnologia a partir da década de 1990 na fabricação de papel trouxe possibilidades de menor gasto energético, de desenvolver produtos de baixo custo com melhora da qualidade do papel, biocompatíveis e flexíveis com funcionalidades sofisticadas (BARHOUM *et al.*, 2017; SAMYN *et al.*, 2018). O uso da nanotecnologia permite melhorar a sustentabilidade dos processos de fabricação de papel, por exemplo:

- Uso mais eficiente de recursos: papéis mais resistentes podem ser formados com menor quantidade de fibras (gramatura);
- Utilização de materiais secundários: fibras recicladas ou fibras com propriedades inferiores podem ser convertidas em nanofibras e serem usadas como aditivos na fabricação de papel, ou, ainda, produzir papéis de boa qualidade utilizando fibras secundárias com a adição de nanofibras;
- Desenvolvimento de novos materiais: desenvolver papéis com propriedades únicas, como filmes com características plásticas, boas propriedades de barreira para embalagens inteligentes.

O desenvolvimento da resistência do papel é influenciado por vários fatores: comprimento e resistência da fibra, grau de adesividade, área de contato fibra-fibra e agentes de ligação na formação da folha seca ou úmida (TAIPALE *et al.*, 2010; KLEMM *et al.*, 2011; ANKERFORS *et al.*, 2013a; 2013b). Devido às propriedades da nanocelulose, existe uma tendência crescente para o uso desta como um aditivo de reforço para papel (OSONG; NOR-GREN; ENGSTRAND, 2016).

Muitas pesquisas já foram realizadas utilizando a nanocelulose na fabricação de papel como aditivo e filmes; seja para melhora de propriedades de resistência, melhora nas propriedades de barreira em embalagens de alimentos, melhora do brilho de papel, melhora da impressão, redução da gramatura do papel sem perdas nas propriedades mecânicas, melhora das propriedades térmicas e prover capacidade antimicrobianas em embalagens (ANDRESEN *et al.*, 2007; DUFRESNE, 2008; EICHHORN *et al.*, 2010; LUU; BOUSFIELD; KETTLE, 2011; HASSAN; HASSAN; OKSMAN, 2011; WANG *et al.*, 2013; OSONG; NOR-GREN; ENGSTRAND, 2016; SAINI *et al.*, 2016).

A funcionalidade dos nanopapéis emerge das propriedades intrínsecas da rede nanofibrosa, do carregamento adicional de nanomateriais específicos ou da deposição adicional e modelagem de filmes finos de nanomateriais sobre a superfície do papel (BARHOUM *et al.*, 2017).

Segundo Zimmermann, Bourdeanu e Strub (2010) e Helbert, Cavailé e Dufresne (1996), os sítios reativos expostos na superfície da CMF realizam a formação de uma rede de nanofibras devido às ligações de hidrogênio formadas. Por causa da escala manométrica, a quantidade dessas ligações é potencializada pela maior superfície de contato entre nanofibras e fibras. Esse fato ocasiona aumento da densidade aparente do papel, tornando-o mais resistente à passagem de ar e de umidade, além de ganho nas propriedades mecânicas (KUMAR; SINGH; SINGH, 2014; MOHANTY; DRASAL; MISRA, 2003; PODSIADLO *et al.*, 2005).

Como aditivo, a nanocelulose tem efeito similar ao produzido pelo refino da polpa (GONZÁLEZ *et al.*, 2012, 2013; POTUSKI *et al.*, 2014; LENGOWSKI, 2016), permitindo ganhos significativos nas propriedades mecânicas do papel, seja este produzido por fibras virgens (POTUSKI *et al.*, 2014), seja por fibras secundárias (POTULSKI, 2016).

Saito e Isogai (2005) declararam que a propriedade de resistência úmida é a principal funcionalidade para papel de seda, toalhas de papel, papelão e outros tipos de papel. Eles também relataram que o polieletrólito catiônico (Poli Amidaamina Epicloridrina – PAE) desenvolvido na década de 1950 tem sido usado como aditivo de resistência à umidade no processo de fabricação de papel. Trabalhos empregando nanocelulose e aditivos como PAE (AHOLA *et al.* 2008a, 2008b) e amido anfótero (LENGOWSKI; BONFATTI JÚNIOR, 2017) visando ao aumento das propriedades mecânicas do papel já foram efetuados.

Torvinen (2014) começou a investigar a possibilidade de usar a CMF e a CNF como agente de reforço e enchimento em um experimento piloto usando diferentes graus de fibrilação e misturas de enchimento (CMF, CNF, carbonato de cálcio precipitado, poliácridamida catiônica e dois tipos de amido). O autor observou que a CNF melhorou as propriedades de resistência (Índice Scott e índice de tração) mais do que a CMF, e também que a CNF associada ao amido apresentou melhor resistência à tração estando úmido. Por fim, o autor concluiu que, em conjunto com a CMF ou CNF, o conteúdo de enchimento poderia ser aumentado de 30% a 40%, o que implicaria economia potencial de 3-6,5% em comparação a folhas produzidas de maneira convencional.

Damásio (2015) descobriu que uma dose de 6% de CNF aplicada promoveu economia de cerca de 40% de energia; enquanto a dose de 12% reduziu em 85% o gasto energético, em relação à testemunha, para produzir polpas a 35 °SR.

Rantanen e Maloney (2013) concluíram que o processo de secagem e umedecimento de papéis com nanocelulose depende da quantidade de nanocelulose adicionada, já que as

nanoceluloses obstruem os poros e apresentam maior quantidade de ligações interfibrilares, impedindo ligações fibra-água no reumedecimento.

Rantanen *et al.* (2014) destacaram que poderiam ser empregados 6-12% de CMF na mistura para produção de papel; já Potulski *et al.* (2014) afirmaram que índices acima de 5% ocasionariam queda nas propriedades de tração e rasgo.

Charfeddine *et al.* (2014) e Hii *et al.* (2012) estudaram o uso de CMF como aditivo para aumentar a resistência de pastas termomecânicas para produzir novos tipos de embalagens. Além da melhora das propriedades mecânicas, os autores concluíram que a adição de 6 g/m² reduziu a permeância e a drenabilidade da massa celulósica. Já González *et al.* (2012, 2013) afirmam que o pré-tratamento enzimático combinado com forças de cisalhamento mecânico em alta pressão pode melhorar significativamente a resistência mecânica sem afetar a drenagem.

Em outro trabalho, González *et al.* (2012), ao adicionarem 9% de nanocelulose, concluíram que a porosidade e as propriedades mecânicas foram melhoradas, no entanto, o grau Schopper Riegler foi alterado, o que se torna desvantagem na etapa de drenagem e pode ocasionar problemas operacionais na secagem. Resultado similar foi encontrado por Damásio ao adicionar 6% e 12% de CNF. Kumar *et al.* (2014) constataram decréscimo do Freeness quando utilizaram nanofibras de diferentes fontes com o aumento do grau de fibrilação, devido à água embebida na cavidade celular e também à própria fibrilação interna, o que está consistente com o comportamento do °SR neste estudo. González *et al.* (2012) também confirmaram a tendência de aumento da resistência à drenabilidade com o aumento da CNF adicionada à polpa, principalmente por causa da elevada área superficial desse material.

Su *et al.* (2013) e Taipale *et al.* (2010) afirmam que a drenabilidade é influenciada pelo tamanho das fibras, forças iônicas, tipos de polieletrólitos e pelo pH da suspensão; ambos os trabalhos demonstraram que quanto maior o grau de fibrilamento, ou maior a concentração de CMF na mistura, menor a drenabilidade. No entanto, ao utilizar a mistura de polieletrólitos catiônicos e CMF, Taipale e colaboradores observaram que a drenabilidade pode ser alterada, não ao ponto de prejudicar o processo de secagem.

Em todos os estudos em que a CMF é adicionada às folhas ocorre um aumento da densidade do papel. Eriksen *et al.* (2008) relatam 4-30% de aumento de densidade para folhas de pasta termomecânica contendo 4% de CMF; Manninen *et al.* (2011) relataram aumento de 10% na densidade para 7% de CMF em folhas de polpa de kraft de coníferas e aumento de 20% na densidade para 20% de adição de CMF e Sehaqui *et al.* (2013) adicionaram 10% de CMF homogeneizado a folhas de polpa de kraft de madeira macia e encontraram aumentos de densidade de 30-50%.

Damásio (2015) demonstrou que as propriedades ópticas também sofrem influência com a adição de nanocelulose. O aumento de nanofibras na composição do papel faz com que ocorra redução significativa no coeficiente de dispersão de luz da polpa. A opacidade

também apresenta redução em seus valores devido à diminuição do coeficiente de dispersão de luz, com o aumento da transparência.

Em relação ao efeito do desenvolvimento de filmes nanocelulósicos e deposição superficial de filmes de nanocelulose em papel, há aumento da densidade superficial, diminuição da absorção de água, redução de permeância e porosidade superficial (SJÖSTRÖM; ALLEN, 1999; VIANA, 2013; LENGOWSKI, 2016). Por outro lado, o aumento da superfície das fibras com o processo de microfibrilamento favorece um maior número de ligações inter-fibras pela maior disponibilidade de grupos-OH (CARRASCO; MUTJÉ; PÈLACH, 1996; GONZÁLEZ *et al.*, 2012), o que indica uma maior capacidade de retenção de água e aumento no grau Schopper Riegler, implicando aumento do custo de secagem.

Spence *et al.* (2010b) estudaram a capacidade de retenção de água em filmes de nanocelulose produzidos a partir de polpa branqueada e não branqueada a partir de madeiras de fibra curta e longa. Os autores observaram que a retenção de água foi menor para os filmes formados por fibra longa quando comparados aos de fibra curta e em polpas não branqueadas em relação a polpas branqueadas.

Spence *et al.* (2010b) avaliaram filmes de CMFs com diferentes teores de lignina e observaram que as amostras com maior teor de lignina apresentaram maiores taxas de transmissão de vapor de água. Os referidos autores constataram que a CMF preparada a partir de madeira de folhosas não branqueadas apresentou valores de retenção de água significativamente maiores e área de superfície maior do que as outras amostras. Uma maior retenção de água para deposições superficiais de nanocelulose não branqueada também foi encontrada por Lengowski (2016), quando a fonte de umidade estava do lado contrário ao do filme superficial.

Spence (2011) justificou que a presença da lignina na produção dos seus filmes de CMF proporcionou poros mais longos, estreitos e mais conectados, aumentando assim a taxa de transmissão de água. Hu *et al.* (2000) citam que poros maiores e lignificados aumentam a taxa de transmissão de vapor de água, pois apresentam menor adsorção. Spence (2011) observou também que a área de superfície específica é fortemente correlacionada com a dificuldade de remover conteúdo de água para as polpas, sugerindo que a difusão da água é mais dependente da estrutura dos poros e da geometria da área de superfície.

Lengowski (2016) observou que o aumento da espessura do filme nanocelulósico em papel ocasionou aumento na resistência mecânica, na estabilidade térmica, porém não influenciou nas propriedades de absorção de água. Ao usar um filme de nanocelulose branqueada e não branqueada, a autora observou o aumento no índice de tração e arrebentamento para deposição de CMF branqueada, já para o rasgo a presença da lignina na CMF ocasionou um ganho nesta propriedade, não foi encontrado influência da lignina na estabilidade térmica dos papéis.

Uma superfície densa dos filmes é uma característica importante, pois esta é relacionada com a porosidade, que determina as propriedades de barreira dos filmes (NAKAGAITO *et al.*, 2009; SPENCE *et al.*, 2010a; RICHMOND, 2014). Richmond (2014) usou um recobrimento superficial de nanocelulose em papel buscando a melhora das propriedades do brilho, rugosidade superficial, a absorção e permeância. Ele notou melhora na absorção e porosidade e um impacto muito pequeno nas outras propriedades.

Para os filmes baseados em CMF, a porosidade pode ser modificada por secagem a partir de diferentes solventes, criando uma característica ajustável que proporciona uma vantagem sobre os plásticos formados por fusão. Henriksson *et al.* (2008) conseguiram modificar a porosidade dos filmes baseados em CMF secas de água de 28% para porosidades de até 40% com películas secas a partir de solventes, tais como metanol e acetona. Além disso, quando utilizado como uma camada de revestimento de CMF sobre papel, reduziu em 10% a permeabilidade do ar, como consequência da porosidade superficial (SYVERUD; STENIUS, 2009).

Vários trabalhos já foram efetuados utilizando a CMF como propriedades de barreira aos gases e líquidos (LÓPEZ-RUBIO *et al.*, 2007; SYVERUD; STENIUS, 2009; FUKUZUMI *et al.*, 2009; AULIN; GALLSTEDT; LINDSTROM, 2010; HULT; IOTTI; LEMES, 2010; NYGARDS, 2011; SIRO *et al.*, 2011; OSTERBERG *et al.*, 2013; BARDET *et al.*, 2015; LENGOWSKI, 2016; LENGOWSKI *et al.*, 2020a)

O aumento da espessura dos filmes, da quantidade de nanocelulose na massa (NYGARDS, 2011) reduz a permeabilidade ao oxigênio, à água, a óleos e ao gás carbônico (SYVERUD; STENIUS, 2009; AULIN; GALLSTEDT; LINDSTROM, 2010; NYGARDS, 2011; OSTERBERG *et al.*, 2013; STENIUS, 2014), indicando que a utilização de espessuras maiores ou maior percentual na massa atua simplesmente um aumento do caminho tortuoso de oxigênio e um aperfeiçoamento das propriedades de barreira. Acredita-se que a permeância ao ar dos filmes diminuiu devido à desconexão dos poros da superfície dos filmes (AULIN; GALLSTEDT; LINDSTROM, 2010). Contudo o desempenho é limitado pela sua capacidade higroscópica, e suas propriedades de barreira perdem eficiência em umidades relativamente altas (AULIN; GALLSTEDT; LINDSTROM, 2010; NYGARDS, 2011; OSTERBERG *et al.*, 2013). Quando amostras nanocelulósicas estão em contato com umidade, ocorre uma redução das forças interfibrilares, aumentando assim a permeabilidade.

A porosidade é uma propriedade importante para a impressão. Em papéis com maior porosidade, pode haver uma maior penetração da tinta, podendo ocasionar defeitos de impressão (D'ALMEIDA, 1981).

Rampazzo *et al.* (2017) utilizaram CNC para formar um filme para barreira de gases para embalagens de alimentos; os resultados encontrados foram muito promissores, proporcionando valores de permeabilidade ao oxigênio e ao dióxido de carbono centenas de

vezes menores do que aqueles de igual espessura em comparação com polímeros sintéticos de barreira comuns, em uma ampla gama de temperaturas.

Em seu estudo, Saini *et al.* (2016) adicionaram nisina à CNF e avaliaram seu potencial como agente microbiano em embalagens para alimentos. Tanto a incorporação direta na CNF como a deposição superficial apresentaram resultados positivos como agentes antimicrobianos, sendo que a deposição superficial foi mais eficiente.

Damáσιο (2015) também produziu nanocompósitos com CNF-CNC com a técnica de casting, utilizando a CNF como a matriz polimérica de dispersão para diferentes dosagens de CNC como reforço mecânico. A adição de nanocristais de celulose permitiu a diminuição da rugosidade da superfície dos nanocompósitos produzidos, aumento das propriedades mecânicas significativamente. A incorporação de CNC permitiu redução da opacidade em até 53%, com consequentes ganhos de transparência dos nanocompósitos.

Outro campo que vem sendo explorado é o uso de nanocelulose juntamente com amido no desenvolvimento de biomateriais, buscando a substituição de polímeros derivados de petróleo. Como o amido apresenta uma característica quebradiça, é necessário o uso de plastificantes que melhorem sua flexibilidade (AZEREDO, 2012). No entanto, as propriedades mecânicas e de barreira tornam-se comprometidas.

Entre as possíveis aplicações dos biofilmes com amido podem ser aplicados nos setores alimentício, agrícola, farmacêutico e em diversos setores onde a biodegradabilidade é requerida (BASTIOLI, 2005; BATISTA *et al.*, 2005; LENGOWSKI *et al.*, 2020a). Alguns exemplos de produtos em estudo são: sacos de lixo, filmes para proteger alimentos, fraldas, hastes flexíveis; na agricultura, como filme na cobertura do solo e recipientes para plantas e na produção de fertilizantes de liberação lenta. Também podem ser usados na preparação de cápsulas, na liberação de medicamentos, na substituição do isopor, na proteção de equipamentos durante o transporte e em diversas outras aplicações (RÓZ, 2003; TUOVINEN; PELTONEN; JÄRVINEN, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2006; FAKHOURI *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2012).

Cheng *et al.* (2017) ao incorporar diferentes tipos de nanocelulose (CNF, CMF e CNC) como agente de reforço em filmes de amido. Todos os filmes apresentaram excelente transparência e aumento da estabilidade térmica. Já em relação às propriedades mecânicas, os melhores resultados foram para os filmes reforçados com CMF devido a maior razão de aspecto apresentado por esse tipo de fibra.

Lengowski *et al.* (2020a) demonstraram que o grau de fibrilação das nanoceluloses interfere na permeabilidade, e indicaram uso de graus de fibrilamento intermediário, tendo em vista a melhora desta propriedade associada aos ganhos mecânicos em filmes com matriz de amido.

Uma das principais dificuldades do uso de nanoceluloses é sua tendência a floculação e aglomeração na matriz (LENZE *et al.*, 2016). Campano *et al.* (2018), ao usarem agentes dispersantes na composição, encontraram uma maior homogeneidade na matriz; também foram

avaliados diferentes agentes de retenção na mistura, o que possibilitou maior retenção das nanopartículas, ocasionando aumento de tração com menores cargas. Os referidos autores sugerem que mais estudos devem ser realizados com agentes de retenção e dispersante com nanoceluloses a fim de aplicar industrialmente tal aditivo. Já Lenze *et al.* (2016) utilizaram a CNC como agente de retenção de finos na produção de papel. A carga altamente negativa da CNC permitiu uma forte interação entre polieletrólitos catiônicos, promovendo boa drenagem e grande retenção de micro e nanopartículas.

Segundo Abdul Khalil *et al.* (2018), filmes à base de polímero biodegradável reforçado com nanocelulose apresentam grande potencial e inúmeros benefícios para uso, como de embalagem. No entanto, o desenvolvimento deste tipo de biocompósito ainda está no estágio inicial, sendo necessário aprofundar o conhecimento em vários aspectos, como sua qualidade, custo e utilidade.

2.2 Uso das nanoceluloses em adesivos

O potencial de aplicação das nanoceluloses é amplamente estendido, especialmente no que tange ao tipo de nanocompósito, celulose nanocristalina ou nanofibrilada.

A melhora das ligações adesivas é um processamento rotineiro na indústria da madeira (EICHHORN *et al.*, 2010), já que é uma das etapas-chave para a produção de painéis. As alterações na adesão à madeira são desejáveis em termos de melhoria de desempenho e economia de adesivo (GINDL-ALTMUTTER; VEIGEL, 2015). Dentre as várias oportunidades que a nanotecnologia oferece para a indústria de produtos florestais (CANDAN; AKBULUT, 2014), o reforço de adesivos com nanocelulose já é uma oportunidade que vem sendo explorada, mostrando resultados na melhora das propriedades físicas e mecânicas dos painéis (GINDL-ALTMUTTER; VEIGEL, 2015; LENGOWSKI *et al.*, 2021).

A obtenção de fibras de celulose em nanoescala e sua aplicação como reforço de compósitos e nanocompósitos biodegradáveis tem despertado grande atenção nos últimos anos devido às propriedades de alta razão de aspecto, cristalinidade e área superficial, excelentes propriedades mecânicas combinadas com baixo peso, biodegradabilidade e aos benefícios ambientais causados pelo seu uso (EICHHORN *et al.*, 2010; MONDRAGON *et al.*, 2015).

Assim a possibilidade de utilizar nanocelulose na formulação de adesivos pode ser uma forma de promover ganhos nas propriedades destes, pois a adesão entre componentes de madeira, bem como entre outros materiais, depende de uma série de parâmetros relacionados às características físico-químicas do adesivo e do material a ser colado, além dos parâmetros operacionais no processo de colagem, da forma geométrica e do tamanho das peças a serem coladas (EICHHORN *et al.*, 2010).

Embora as modificações na química dos adesivos sejam um caminho de otimização de características mecânicas, a adição de partículas de enchimentos ou fibrosas apresenta uma possível rota alternativa de modificação deste (GINDL-ALTMUTTER; VEIGEL, 2015). Ao adicionar enchimentos, as limitações impostas pela química do polímero podem ser superadas, sendo esta abordagem comum em adesivos de alto desempenho, que podem ser reforçados com nanopartículas (ZHANG *et al.*, 2008; AHAMAD; ANSELL; SMEDLEY, 2010; MAY; WANG; AKID, 2010; KNOEE; HASSANI, 2010) ou nanofibras (HSIAO; ALMS; ASVANI, 2003; KHALILI *et al.*, 2008; KHALILI; JAFARKARIMI; ABDOLLAHI, 2009; PROLONGO; GUDE; URENA, 2009; PROLONGO; GUDE; URENA, 2010; YOON *et al.*, 2010).

Damásio *et al.* (2017) avaliaram a adição de CNC na batida de cola ureia-formaldeído e observaram que apenas a viscosidade apresentou variação, aumentando à medida que aumentava o percentual adicionado na batida de cola. Para os ensaios de resistência da linha de cola de painéis compensados a seco, o aumento da porcentagem de CNC no adesivo ocasionou o aumento gradativo da resistência, onde a máxima adição de CNC (8%) resultou em um aumento de 56% quando comparado à testemunha, o que mostra que os nanocristais aumentam as ligações e interação madeira-adesivo-madeira (HU *et al.*, 2014). Já para resistência a úmido, todas as adições aumentaram esta propriedade em relação à testemunha, porém o maior ganho ocorreu com a adição de 2% de nanocelulose.

Em painéis produzidos com resina ureia-formaldeído, a adição de CNF de 0,5-5% permitiu um ganho significativo na tensão e força até a falha (EICHHORN *et al.*, 2010). Segundo os autores, o adesivo ureia-formaldeído pertence a uma classe de adesivos para madeira de baixo preço, largamente utilizada, que são bem conhecidos pela sua fragilidade pronunciada e por sua tendência em desenvolver microfissuras que limitam o seu desempenho mecânico. Além disso, o adesivo ureia-formaldeído é pouco resistente à umidade devido à redução da relação molar ureia: formaldeído, deixando grupos livres da ureia que se ligam às moléculas de água (SELLERS, 1994). A adição de CNC contribuiu para melhora dos dois pontos fracos deste tipo de adesivo, tanto da resistência da linha de cola a seco quanto da resistência à umidade (DAMÁSIO *et al.*, 2017).

Cardoso *et al.* (2016) avaliou a adição de CNC produzida sem a neutralização da carga superficial na batida de cola de ureia-formaldeído. Eles observaram que a nanocelulose ácida reduziu o tempo do processo de cura da resina UF e reduziu o inchamento em espessura, em comparação ao painel produzido apenas com sulfato de amônio. No entanto, a absorção de água foi maior para os painéis com a adição de nanocelulose.

Eichhorn *et al.* (2010) citam que o grupo de pesquisas liderado por Wolfgang Gindl e Josef Keckes vem investigando o reforço de adesivos com nanocelulose. Para este fim, o grupo testou a adição de CMF e de fibras de folhosas como reforço da resina. Ao adicionar 5% de fibras de polpa não tratadas, eles não observaram efeito significativo na resistência a

cisalhamento, que foi de 9,9 MPa. Em forte contraste, a adição de 5% de nanocelulose, que resultou em um aumento significativo da resistência ao cisalhamento para um valor de 13,8 MPa. Os pesquisadores justificam esse aumento pela inexistência de fissuras comumente observadas em linhas de cola de ureia-formaldeído. Além disso, afirmam que a melhora das propriedades da resina UF pode abrir portas para painéis de usos estruturais.

Zhang *et al.* (2011) modificaram a CNC com 3-aminopropiltriétoxissilano (APTES) e 3-metacriloxipropiltrimetoxissilano (MPS) e avaliaram a resistência de ligação, assim como a emissão de formaldeído de painéis compensados. Os resultados mostraram maior eficiência para modificação com APTES, onde 1,5% de CNC modificada reduziu em 53,2% a emissão de formaldeído e aumentou em 23,6% a resistência de ligação, enquanto para modificação com MPS os resultados foram 21,3% e 7,0%, respectivamente. Ayrilmis *et al.* (2016) usaram a CMF produzida a partir de serragem de pinus e avaliaram a emissão de compostos orgânicos voláteis e em painéis LVL a diferentes temperaturas. A adição de CMF foi eficiente para reduzir a emissão até 35 °C, podendo ser empregada para móveis de uso interno.

Mahrtdt *et al.* (2016) demonstraram que a adição de CMF à batida de cola da resina ureia-formaldeído ocasionou um retardamento da formação das ligações químicas e mecânicas da cura da resina, além do aumento da viscosidade do adesivo. No entanto, a adição de CMF permitiu melhor distribuição do adesivo na madeira, com menor formação de coágulos de cola, que não contribuem para a ligação adesiva, além de apresentar a mesma penetração na madeira. Em estudo similar, Lengowski *et al.*, (2021) observaram que a adição de CNF ao adesivo causou aumento na viscosidade e diminuição do tempo de gel, enquanto o pH permaneceu constante. A aplicação da nanocelulose causou uma melhoria das propriedades reológicas, o que pode diminuir o custo do adesivo. Já para as propriedades mecânicas, foi observada a melhora nas propriedades de cisalhamento da linha de cola.

Cui *et al.* (2015) produziram painéis de partículas reforçados com CNF em adesivos à base de taninos. O tempo de gelatinização e a viscosidade da batida de cola aumentaram com a adição de CNF (1-3% m/m). A adição de 2% (m/m) melhorou notavelmente as propriedades mecânicas dos painéis de madeira produzidos; já a absorção de água não teve alteração significativa.

Em adesivos à base de poliuretano ou isocianato, a CNF sem modificação química não pode ser dispersa devido à elevada polaridade. Para adição de CNF em resina à base de poliuretano, Richter *et al.* (2009) não encontraram ganhos significativos. Já Lopez-Suevos *et al.* (2010) e Kaboorani *et al.* (2012), ao adicionarem CNF e CNC, melhoraram significativamente as forças de ligação e durabilidade dos painéis.

Utilizando PVA como matriz, a CNF contribuiu para o aumento da resistência a úmido e a elevada temperatura (LOPEZ-SUEVOS *et al.*, 2010). Já a CNC aumentou, além destas propriedades, a resistência a seco (KABOORANI *et al.*, 2012).

Para painéis OSB e MDP produzidos com melamina-ureia-formaldeído, a adição da CNF ocasionou uma redução no inchamento após 24 horas em contato com a água, e aumentou significativamente a ligação interna, resistência a flexão e ruptura, sendo os resultados mais expressivos para os painéis OSB (VEIGEL *et al.*, 2012). Esse resultado mostra que a combinação de partículas maiores, com a resina MUF reforçada, contribuiu para esse ganho significativo.

Para adição de CNC como reforço em resinas lignina-fenol-formaldeído, Liu *et al.* (2015) concluíram que as melhores propriedades das linhas de cola testadas a seco e a úmido ocorreram com a adição de 0,25-0,5% de CNC. Os autores concluíram que não há reação entre a resina e a CNC, já que as curvas de DSC apresentaram somente um pico similar a todas as composições e que a adição da nanocelulose não afeta a energia de ativação da resina.

Gindl-Altmutter e Veigel (2015) citam que os resultados iniciais indicam que a cura adesiva não é excessivamente prolongada devido à presença de nanocelulose. Por outro lado, o aumento severo da viscosidade causado pela adição de nanocelulose pode representar um obstáculo sério para aspersão da resina e impregnação na madeira.

SHEYKHI *et al.* (2016), ao adicionarem 1% e 3% de nanocelulose produzida a partir de painéis MDF velhos na composição de painéis MDF com fibras novas e duas quantidades de resina ureia-formaldeído, sendo estas 8% e 12%, encontraram resultados promissores. Os resultados mostraram que o maior módulo de ruptura (14,47 MPa) e módulo de elasticidade (1359,09 MPa) foram dos painéis produzidos com 12% de cola e 3% de nanocelulose, bem como a maior ligação interna (0,5 MPa); o menor inchamento em espessura (4,72% e 9,86% após 2 e 24 horas em imersão de água) e a menor absorção de água (33,11% e 80,63% após 2 e 24 horas em imersão de água).

Diante dos aspectos levantados, mais pesquisas precisam ser efetuadas, seja na aplicação da nanocelulose e sua modificação em diferentes tipos de resina, seja em tecnologias de aplicação apropriadas às novas condições dos adesivos.

2.3 Uso das nanoceluloses na indústria eletrônica

A nanocelulose tem alta velocidade sônica e baixa perda dinâmica, propriedades que permitam o seu uso em diafragmas acústicos (KALIA *et al.*, 2011). A velocidade sônica do filme feito apenas com nanocelulose obtida de bactérias é equivalente à do alumínio e do titânio (IGUCHI *et al.*, 2000). Os filmes de nanocelulose para a composição de diafragmas acústicos são desidratados e comprimidos até uma espessura de 20 microns. A vantagem da nanocelulose é filmes ultrafinos, além das excelentes propriedades acústicas. Essas vantagens fizeram com que umas das maiores empresas do meio acústico utilizasse filmes de nanocelulose na composição de diagramas acústicos de fones de ouvido (JONAS; FARAH, 1988).

Por ser estável dimensionalmente e ter uma aparência semelhante a um papel, a nanocelulose também pode ser usada como estrutura básica do papel eletrônico, e consequentemente em displays digitais, agregando vantagens como reflexividade, flexibilidade, contraste e biodegradabilidade (SHAH; BROWN, 2005). E ainda pode ser usada como material de reforço em plásticos opticamente transparentes, por exemplo, como substrato para displays flexíveis, no qual o compósito permanece opticamente transparente e com altos teores de fibras (YANO; SUGIYAMA, 2005).

Ainda, a nanocelulose pode ter outras utilizações eletrônicas, como, por exemplo, aerogel ou filmes catalizadores para evitar a decomposição de metais dentro de estruturas eletrônicas, uma vez que dados experimentais comprovaram que a nanocelulose possui grupos redutores capazes de iniciar a precipitação de paládio, ouro e prata a partir da solução aquosa (EVANS *et al.*, 2003; LENGOWSKI *et al.*, 2020d).

2.4 Uso das nanoceluloses na indústria farmacêutica e tratamentos médicos

A celulose nanocristalina (CNC) ou microcristalina é amplamente empregada na indústria farmacêutica na composição de remédios. Funciona como agente dosador e possui um sistema avançado de granulação, liberando de forma controlada os princípios ativos do remédio no organismo (WATANABE *et al.*, 2002; BAUMANN *et al.*, 2009; LENGOWSKI *et al.*, 2020c). A elevada área superficial e a carga negativa dos nanocristais implicam que grandes quantidades de drogas podem estar ligadas à sua superfície, com potencial para altas doses e ter um bom controle da dosagem com o tempo (SHAIKH *et al.*, 2007).

Os abundantes grupos hidroxílicos nas superficiais da celulose nanocristalina proporcionam um local para a modificação superficial do material, com uma gama de grupos químicos e por meio de uma variedade de métodos, como, por exemplo, a carboximetil celulose. A modificação da superfície pode ser usada para modular o carregamento e a liberação de drogas que, normalmente, não se ligariam à nanocelulose, como drogas não ionizada e hidrofóbica (KALIA *et al.*, 2011). Além disso, a celulose nanocristalina é um material prontamente abundante de um recurso sustentável e renovável, seu uso proporciona uma vantagem ambiental substancial em comparação com outros nanomateriais.

A nanocelulose tem o potencial como um biomaterial para uso no campo farmacêutico, especialmente nos campos de liberação controlada de drogas e na melhoria da solubilidade de drogas de baixa solubilidade em água. Estudos demonstram que a aplicação da nanocelulose, seja CNF, seja CNC nos medicamentos, aumenta a biodisponibilidade, trazendo consequentemente benefícios para a administração oral do medicamento (LENGOWSKI *et al.*, 2020c).

Na biomedicina, a nanocelulose tem sido descrita como os olhos de um biomaterial que é altamente aplicável à indústria biomédica, a qual inclui substituições de peles para queimaduras e feridas; crescimento de vasos sanguíneos; reconstrução de nervos; reconstrução de tecidos; cobertura de *stent* e reconstrução óssea (KLEMM *et al.*, 2001; NEGRÃO *et al.*, 2006; CZAJA *et al.*, 2007).

Em decorrência das propriedades da nanocelulose, a engenharia de tecidos tem procurado testar a nanocelulose como dispositivo que possa interagir positivamente com os tecidos biológicos, trabalhando como base *in vitro* para o crescimento celular ou reorganizando e desenvolvendo tecidos a serem implantados no organismo humano (CROCE *et al.*, 2004). Ainda cabe ressaltar que a interação superfície da nanocelulose e célula é extremamente importante na efetividade do implante, incluindo sua rejeição, uma vez que a interação é totalmente compreendida em um nível celular (KUMARI *et al.*, 2001).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nanoceluloses como CNF e CNC são biopolímeros que podem ser extraídos a partir de inúmeros materiais lignocelulósicos. São nanomateriais com características de rigidez, transparência, biocompatibilidade e biodegradabilidade que permitem sua aplicação e emprego na formulação de um vasto contingente de produtos, sejam como bens duráveis ou não duráveis, sobretudo para atender às atuais exigências do mercado, a qual será voltado na utilização de produtos com menor impacto ambiental.

Como descrito neste capítulo, há uma grande tendência da aplicação das nanoceluloses na indústria de painéis e de embalagens, em adesivos, especialmente os voltados para a colagem da madeira, na indústria eletrônica, na indústria farmacêutica, cosmética e para tratamentos médicos. Todavia, o conhecimento da estrutura físico-química das nanoceluloses, bem como dos processos que regem sua produção, é de grande importância, uma vez que se espera que esses nanomateriais tragam grandes benefícios para o aprimoramento e descoberta de novas formas de produção e utilização de biopolímeros, os quais permitam o incremento de diversas propriedades em materiais e produtos. Somente assim será possível alcançar um patamar de conhecimento científico para o emprego e a utilização desses nanobiomateriais.

O maior desafio da nanotecnologia é encontrar e reconhecer aplicações comerciais das pesquisas já realizadas, assim como o desenvolvimento de larga escala e a redução dos custos dos nanomateriais. Além disso, o desenvolvimento de uma rota para melhoria de processos ou produtos, assim como o desenvolvimento de produtos melhores e/ou mais competitivos.

Referências

ABDUL KHALIL, H. P. S.; TYE, Y. Y.; LEH, C. P.; SAURABH, C. K.; FIZREE, H. M.; MOHAMED, A.; SURIANI, A. B. Cellulose Reinforced Biodegradable Polymer Composite Film for Packaging Applications. *In*: JAWAID, M.; SWAIN, S. (ed.) **Bionanocomposites for Packaging Applications**. Springer; Cham, 2018. p. 49-69. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67319-6_3

ABE, K.; IWAMOTO, S.; YANO, H. Obtaining Cellulose Nanofibers with a Uniform Width of 15 nm from Wood. **Biomacromolecules**, v. 8, n. 10, p. 3276-3278, 2007. <http://doi.org/10.1021/bm700624p>

AHMAD, Z.; ANSELL, M. P.; SMEDLEY, D. Epoxy adhesives modified with nano- and micro-particles for in situ timber bonding: effect of microstructure on bond integrity. **International Journal of Mechanical and Materials**, v. 5, p. 59-67, 2010.

AHOLA, S.; TURON, X.; OSTERBERG, M.; LAINE, J.; ROJAS, O. J. Enzymatic hydrolysis of native cellulose nanofibrils and other cellulose model films: effect of surface structure. **Langmuir**, v. 24, n. 20, p. 11592-11599, 2008a. <https://doi.org/10.1021/la801550j>

AHOLA, S.; SALMI, J.; JOHANSSON, L. S.; LAINE, J.; OSTERBERG, M. Model films from native cellulose nanofibrils. Preparation, swelling, and surface interactions. **Biomacromolecules**, v. 9, n. 4, p. 1273-1282, 2008b. <https://doi.org/10.1021/bm701317k>

AHOLA, S.; OSTERBERG, M.; LAINE, J. Cellulose nanofibrils-adsorption with poly (amidedamine) epichlorohydrin studied by QCM-D and application as a paper strength additive. **Cellulose**, v. 15, p. 303-314, 2008c. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9167-3>

ANDRESEN, M.; STENIUS, P. Water-in-oil emulsions stabilized by hydrophobized microfibrillated cellulose. **Journal of Dispersion Science Technology**, v. 28, n. 6, p. 837-844, 2007. <https://doi.org/10.1080/01932690701341827>

ANKERFORS, M.; DUKER, E.; LINDSTROM, T. Topo-chemical modification of fibres by grafting of carboxymethyl cellulose in pilot scale. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 28, n. 1, p. 6-14, 2013a.

ANKERFORS, M.; LINDSTROM, T.; HENRIKSSON, G. Method for the manufacture of microfibrillated cellulose. US patent, US20090221812A1, n. 8; p. 546-558 2013b.

AULIN, C.; GALLSTEDT, M.; LINDSTROM, T. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. **Cellulose**, v. 17, n. 3, p. 559-574, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-009-9393-y>

AYRILMIS, N.; LEE, Y.-K.; KWON, J. H.; HAN, T.-H.; KIM, H.-J. Formaldehyde emission and VOCs from LVLs produced with three grades of urea-formaldehyde resin modified with nanocellulose. **Building and Environment**, v. 97, p. 82-87, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.009>

AZEREDO, H. M. C. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. Brasília: Embrapa, 2012.

BAUMANN, M. D.; KANG, C. E.; STANWICK, J. C.; WANG, Y.; KIM, H.; LAPITSKY, Y.; SHOICHET, M. S. An injectable drug delivery platform for sustained combination therapy. **Journal of Controlled Release**, v. 138, n. 3, p. 20-213, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2009.05.009>

BARDET, R.; REVERDY, C.; BELGACEM, N.; LEIRSET, I.; SYVERUD, K.; BARDET, M.; BRAS, J. Substitution of nanoclay in high gas barrier films of cellulose nanofibrils with cellulose nanocrystals and thermal treatment. **Cellulose**, v. 22, n. 2, p. 1227-1241, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0547-9>

BARHOUM, A.; SAMYN, P.; OHLUND, T.; DUFRESNE, A. Review of recent research on flexible multifunctional nanopapers. **Nanoscale**, v. 9, p. 15181-15205, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7NR04656A>

BASTIOLI, C. **Handbook of biodegradable polymers**. Shawbury: Rapra Technology Limited, 2005.

BATISTA, J. A.; TANADA-PALMU, P. S.; GROSSO, C. R. F. Efeito da adição de ácidos graxos em filmes a base de pectina. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 4, p. 781-788, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400025>

BELBEKHOUCHE, S.; BRAS, J.; SIQUEIRA, G.; CHAPPEY, C.; LEBRUN, L.; KHELIFI, B.; MARAIS, S.; DUFRESNE, A. Water sorption behavior and gas barrier properties of cellulose whiskers and microfibrils films. **Carbohydrate Polymer**, v. 83, p. 1740-1748, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.036>

BECK-CANDANEDO, S.; ROMAN, M.; GRAY, D. G. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 2, p. 1048-1054, 2005. <https://doi.org/10.1021/bm049300p>

BHARIMALLA, A. K.; DESHMUKH, S. P.; VIGNESHWARAN, N.; PATIL, P. G.; PRASAD, V. Nanocellulose-polymer composites for applications in food packaging: current status, future prospects and challenges. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 56, p. 805-823, 2017. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233281>

BROWN, R. M. Microbial Cellulose: a new resource for wood, paper, textiles, food and specialty products. **Position Paper**. 1998. Disponível em: . Acesso em: 02 Dez. 2017.

CAMPANO C.; MERAYO, N.; BALEA, A.; TARRÉS, Q.; DELGADO-AGUILAR, M.; MUTJE, P.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Mechanical and chemical dispersion of nanocelluloses to improve their reinforcing effect on recycled paper. **Cellulose**, v. 25, p. 269-280, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1552-y>

CAO, X.; DING, B.; YU, J.; AL-DEYAB, S. S. Cellulose nanowhiskers extracted from TEMPO-oxidized jute fibers. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, n. 2, p. 1075-1080, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.046>

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. *In*: EBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO EM

MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15., Curitiba, PR. **Anais [...]** Parque Barigui, Curitiba, PR, 09 a 11 mar. 2016.

CARRASCO, G. C. Cellulose fibres, nanofibrils and microfibrils: The morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view. **Nanoscale Research Letter**, v. 6, n. 1, p. 417, 2011. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417>

CHARFEDDINE, M. A.; ROUSSIERE, F.; BLOCH, J. F.; RIDGWAY, C.; GANE, P. A. C.; MANGIN, P. J. Impact on paper properties of z-direction structuring by the layered addition of micronano-fibrillated cellulose (MNFC). *In*: TAPPI INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY FOR RENEWABLE MATERIALS, Vancouver: British Columbia Canada; 23-26 June, 2014.

CHENG, G.; ZHOU, M.; WEI, Y. J.; CHENG, F.; ZHU, P-X. Comparison of mechanical reinforcement effects of cellulose nanocrystal; cellulose nanofiber and microfibrillated cellulose in starch composites. **Polymer Composites**, v. 40, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1002/pc.24685>

CUI, J.; LU, X.; ZHOU, X.; CHRUSCIEL, L.; DENG, Y.; ZHOU, H.; ZHU, S.; BROSSE, N. Enhancement of mechanical strength of particleboard using environmentally friendly pine (*Pinus pinaster* L.) tannin adhesives with cellulose nanofibers. **Annals of Forest Science**, v. 72, p. 27-32, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0392-2>

CZAJA, W. K.; YOUNG, D. J.; KAWECKI, M.; BROWN, R. M. The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications. **Biomacromolecules**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2007. <http://doi.org/10.1021/bm060620d>

CROCE, M. A.; SILVESTRI, C.; GUERRA, D.; CARNEVALI, E.; BORALDI, F.; TIOZZO, R.; PARMA, B. Adhesion and proliferation of human dermal fibroblasts on collagen matrix. **Journal of Biomaterials Applications**, v. 18, n. 3, p. 209-222, 2004. <http://doi.org/10.1177/0885328204039692>

DUJARDIN, E.; BLASEBY, M.; MANN, S. Synthesis of mesoporous silica by sol-gel mineralisation of cellulose nanorod nematic suspensions. **Journal of Material Chemistry**, v. 13, p. 696-699, 2003. <https://doi.org/10.1039/B212689C>

D'ALMEIDA; M. L. O. **Celulose e papel**: tecnologia de fabricação de pasta celulósica .2. ed. v.1. São Paulo: IPT-SENAI, 1981.

DAMÁSIO, R. A. P. **Caracterização e aplicações de celuloses nanofibrilada (CNF) e nanocristalina (CNC)**. 2015. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

DAMÁSIO, R. A. P.; CARVALHO, A. G.; FERREIRA, J. C.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Interação de nanocristais de celulose com o adesivo uréia-formaldeído em juntas coladas de *Eucalyptus* sp. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 169-176, 2017. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n113.17>

DUFRESNE, A. Polysaccharide nanocrystal reinforced nanocomposites. **Canadian Journal of Chemistry**, v. 86, n. 6, p. 484-494, 2008. <https://doi.org/10.1139/v07-152>

EICHHORN, S. J.; DUFRESNE, A.; ARANGUREN, M.; MARCOVICH, N. E.; CAPADONA, J. R.; ROWAN, S. J.; WEDER, C.; THIELEMANS, W.; ROMAN, M.; RENNECKAR, S.; GINDL, W.; VEIGEL, S.; KECKES, J.; YANO, H.; ABE, K.; NOGI, M.; NAKAGAITO, A. M.; MANGALAM, A.; SIMONSEN, J.; BENIGHT, A. S.; BISMARCK, A.; BERGLUND, L. A.; PEIJS, T. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. **Journal of Materials Science**, v. 45, p. 1-33, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3874-0>

ERIKSEN, O.; SYVERUD, K.; GREGERSEN, Ø. The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 23, n. 3, p. 299-304, 2008. <https://doi.org/10.3183/npprj-2008-23-03-p299-304>

EVANS, B. R.; O'NEILL, H. M.; MALYVANH, V. P.; LEE, I.; WOODWARD, J. Palladium-bacterial cellulose membranes for fuel cells. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 18, n. 7, p. 917-923, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(02\)00212-9](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(02)00212-9)

FAKHOURI, F. M.; FONTES, F. M. B.; GONÇALVES, P. V. M.; MILANEZ, C. R.; STEEL, C. J.; COLLARES-QUEIROZ, F. P. Filmes e coberturas comestíveis compostas à base de amidos nativos e gelatina na conservação e aceitação sensorial de uvas Crimson. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 2, p. 369-375, 2007.

FAVIER, V.; CANOVA, G. R.; CAVAILLÉ, J. Y.; CHANZY, H.; DUFRESNE, A.; GAUTHIER, C. Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers. **Polymer for Advanced Technology**, v. 6, p. 351-355, 1994.

FAVIER, V.; CANOVA, G. R.; CAVAILLÉ, J. Y.; CHANZY, H.; DUFRESNE, A.; GAUTHIER, C. Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers. **Polymer for Advanced Technology**, v. 6, n. 5, p. 351-355, 1995. <https://doi.org/10.1002/pat.1995.220060514>

FRONE, A. N.; PANAITESCU, D. M.; DONESCU, D. Some aspects concerning the isolation of cellulose micro- and nano- fibers. **UPB Scientific Bulletin, Series B**, v. 73, n. 2, p. 133-152, 2011.

FUJISAWA, S.; OKITA, Y.; FUKUZUMI, H.; SAITO, T.; ISOGAI, A. Preparation and characterization of TEMPO-oxidized cellulose nanofibril films with free carboxyl groups. *Carbohydrate Polymers*, v. 84, n. 1, p. 579-583, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.029>

FUKUZUMI, H.; SAITO, T.; IWATA, T.; KUMAMOTO, Y.; ISOGAI, A. Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation. **Biomacromolecules**, v. 10, n. 1, p. 162-165, 2009. <http://doi.org/10.1021/bm801065u>

GILLIS, P. P. The elastic constants of cellulose. **Cellulose Chemistry Technology**, v. 4, p. 123-135, 1970.

GINDL-ALTMUTTER, W.; VEIGEL, S. **Nanocellulose-modified Wood Adhesives**. Handbook of Green Materials. Universidade China de Hong Kong. 2015.

GONZÁLEZ, I.; BOUFI, S.; PÈLACH, M. A.; ALCALÀ, M.; VILASECA, F.; MUTJÉA, P. Nanofibrillated cellulose as paper additive in *Eucalyptus* pulps. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5167-5180, 2012.

GONZÁLEZ, I.; VILASECA, F.; ALCALA, M.; PELACH, M. A.; BOUFI, S.; MUTJÈ, P. Effect of the combination of biobeating and NFC on the physico-mechanical properties of paper. **Cellulose**, v. 20, n. 3. p. 1425-1435, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9927-1>

GONZÁLEZ, I.; BOUFI, S.; PÈLACH, M. A.; ALCALÀ, M.; VILASECA, F.; MUTJÉ, P. Nanofibrillated cellulose as paper additive in *Eucalyptus* pulps. **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5167-5180, 2012.

HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; ROJAS, O. J. Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. **Chemical reviews**, v. 10, n. 6, p. 3479-3500, 2010. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>

HASSAN, E. A.; HASSAN, M. L.; OKSMAN, K. Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n. 1, p. 76-82, 2011.

HELBERT, W.; CAVAILLÉ, C. Y.; DUFRESNE, A. Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. Part I: processing and mechanical behaviour. **Polymer Composites**, v. 17, n. 4, p. 604-611, 1996. <https://doi.org/10.1002/pc.10650>

HENRIKSSON, M.; BERGLUND, L.; ISAKSSON, P.; LINDSTROM, T.; NISHINO, N. Cellulose nanopaper structures of high toughness. **Biomacromolecules**, v. 9, n. 6, p. 1579-1585, 2008. <https://doi.org/10.1021/bm800038n>

HII, C.; GREGERSEN, Ø. W.; CHINGA-CARRASCO, G.; ERIKSEN, Ø. The effect of MFC on the pressability and paper properties of TMP and GCC based sheets. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 27, n. 2, p. 388-396, 2012. <http://doi.org/10.3183/NPPRJ-2012-27-02-p388-396>

HSIAO, K. T.; ALMS, J.; ADVANI, S. G. Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites. **Nanotechnology**, v. 14, n. 7, p. 791-793, 2003. <http://doi.org/10.1088/0957-4484/14/7/316>

HU, Y.; TOPOLKARAEV, V.; HILTNER, A.; BAER, E. Measurement of water vapor transmission rate in highly permeable films. **Journal Applied Polymer Science**, v. 81, n. 7, p. 1624-1633, 2000. <https://doi.org/10.1002/app.1593>

HU, K.; KULKARNI, D. D.; CHOI, I.; TSUKRUK, V. V. Graphene-polymer nanocomposites for structural and functional applications. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 11, p. 1934-1972, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.03.001>

HULT, E. L.; IOTTI, M.; LENES, M. Efficient approach to high barrier packaging using microfibrillar cellulose and shellac. **Cellulose**, v. 17, n. 3, p. 575-586, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9408-8>

IGUCHI, M; YAMANAKA, S; BUDHIONO, A. Bacterial cellulose - amasterpiece of nature's arts. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 2, p. 261-270, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1004775229149>

IWAMOTO, S.; NAKAGAITO, A. N.; YANO, H.; NOGI, N. Optically transparent composites reinforced with plant fibre-based nanofibres. **Applied Physics A: Material Science & Processing**, v. 81, p. 1109-1112, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00339-005-3316-z>

IWAMOTO, S.; NAKAGAITO, A. N.; YANO, H. Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites. **Applied Physics A**, v. 89, n. 82, p. 461-466, 2007. <http://doi.org/10.1007/s00339-007-4175-6>

IWAMOTO, S.; KENTARO, A.; YANO, H. The Effect of hemicelluloses on wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. **Biomacromolecules**, v. 9, n. 3, p. 1022-1026, 2008. <http://doi.org/10.1021/bm701157n>

JANARDHANNAN, S.; SAIN, M. Isolation of cellulose microfibrils - an enzymatic approach. **BioResources**, v. 1, p. 176-188, 2006.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymer**, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

JONAS, R.; FARAH, L.F. Production and application of microbial cellulose. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, n 1-3, p. 101-106, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00197-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00197-3)

JONOBI, M.; HARUN, J.; SHAKERI, A.; MISRA, M.; OKSMAND, K. Chemical composition, crystallinity, and thermal degradation of bleached and unbleached kenaf bast (*Hibiscus cannabinus*) pulp and nanofibers. **BioResources**, v. 4, n. 2, p. 626-639, 2009.

KABOORANI, A.; RIEDL, B.; PLANCHET, B.; FELLIN, M.; HOSSEINAIE O.; WANG, S. Nanocrystalline cellulose (NCC): a renewable nano-material for polyvinyl acetate (PVA)

adhesive. **European Polymer Journal**, v. 48, n. 11, p. 1829-1837, 2012. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.08.008>

KALIA, S.; DUFRESNE, A.; CHERIAN, B.M.; KAITH, B.S.; AVEROUS, L.; NJUGUNA, J.; NASSIOPOULOS, E. Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review. **International Journal of Polymer Science**, ID837875, p. 1-35, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/837875>

KAMEL, S. Nanotechnology and its applications in lignocellulosic composites, a mini review. **Express Polymer Letters**, v. 1, n. 9, p. 546-575, 2007. <http://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.78>

KLEMM, D.; SCHUMANN, D.; UDHARDT, U.; MARSCH, S. Bacterial synthesized cellulose - artificial blood vessels for microsurgery. **Progress in Polymer Science**, v. 26, n. 9, p. 1561-1603, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(01\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(01)00021-1)

KLEMM, D.; KRAMER, F.; MORITZ, S.; LINDSTRÖM, T.; ANKERFORS, M.; GRAY, D.; DORRIS, A. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. **Angewandte Chemi International Edition**, v. 50, n. 24, p. 5438-5466, 2011. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>

ABDUL KHALIL, H. P. S.; BHAT, A. H.; YUSRA, I. A. F. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. **Carbohydrate Polymer**, v. 87, n. 2, p. 963-979, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>

ABDUL KHALIL, H. P. S.; APRILIA, N. A. S.; BHAT, A. H.; JAWAID, M.; PARIDAH, M. T.; RUDI, D. A *Jatropha* biomass as renewable materials for biocomposites and its applications. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 22, p. 667-685, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.036>

ABDUL KHALIL, H. P. S.; DAVOUDPOUR, Y.; ISLAM, N.; MUSTAPHA, A.; SUDESH, K.; DUNGANI, R.; JAWAID, M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 99, p. 649- 665, 2014. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069>

KHALILI, S. M. R.; SHOKUHFAR, A.; HOSEINI, S. D.; BIDKHORI, M.; KHALILI S.; MITTAL, R. K. Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap

joints for composite structures subjected to mechanical loads. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 28, n. 8, p. 436-444, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.04.009>

KHALILI, S. M. R.; JAFARKARIMI M. H.; ABDOLLAHI, M. A. Creep analysis of fibre reinforced adhesives in single lap joints-experimental study. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 6, p. 656-661, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2009.02.007>

KHOEE, S.; HASSANI, N. Adhesion strength improvement of epoxy resin reinforced with nanoelastomeric copolymer. **Material Science and Engineering A - Structural Materials Properties Microstructure and Processing**, v. 527, n. 24-25, p. 6562-6567, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.013>

KUMAR, A.; SINGH, S. P.; SINGH, A. K. Preparation and characterization of cellulose nanofibers from bleached pulp using a mechanical treatment method. **Tappi Journal**, v. 13, n. 5, p. 25-31, 2014.

KOLAKOVIC, R.; PELTONEN, L.; LAAKSONEN, T.; PUTKISTO, K.; LAUKKANEN, A.; HIRVONEN, J. Spray-Dried cellulose nanofibers as novel tablet excipient. **American Association of Pharmaceutical Scientists**, v. 12, n. 4, p. 1366-1373, 2011. <https://doi.org/10.1208/s12249-011-9705-z>

KUMARI, T. V.; VASUDEV, U.; KUMAR, A.; MENON, B. Cell surface interactions in the study of biocompatibility. **Trends in Biomaterials and Artificial Organs**, v. 15, n. 2, p. 37-41, 2001.

LAINE, J.; LINDSTRÖM, T.; NORDMARK, G. G.; RISINGER, G. Studies on topochemical modification of cellulosic fibres - part 2. The effect of carboxymethyl cellulose attachment on fibre swelling and paper strength. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 17, n. 1, p. 50-56, 2002.

LENGOWSKI, E. C. **Formação e caracterização de filmes com nanocelulose**. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2016.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JUNIOR, E. A. Incorporação de amido anfótero e nanocelulose no papel. *In: SEMANA DE APERFEIÇOAMENTO EM ENGENHARIA FLORESTAL – SEAFLORE*. **Anais** [...]. Universidade Federal do Paraná. 2017.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; CALDONAZO, A.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose application in encapsulation and controlled drug release. *In: Intellectual property issues in nanotechnology*, Ed. 1, Chapter 9. KESWANI, C. (ed.). Taylor & Francis Group, 2020c. <http://doi.org/10.1201/9781003052104-12>

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; DALLO, R.; NISGOSKI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G. Nanocellulose-reinforced phenol-formaldehyde resin for plywood panel production. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 23, n. 1, 2021.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; KUMODE, M. M. N.; CARNEIRO, M. E.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose in the paper making, *In: INAMUDDIN; THOMAS, S.; KUMAR, M. R.; ASIRI, A. (eds.). Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites*. Springer International Publishing, Cham, p. 1027-1066, 2019a. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4_36

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; KUMODE, M. M. N.; CARNEIRO, M. E.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose in the Paper Making, *In: INAMUDDIN; THOMAS, S.; KUMAR, M. R.; ASIRI, A. (eds.), Sustainable. Polymer Composites and Nanocomposites*. Springer International Publishing, Cham, p. 1001-1026. 2019b:

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose-Improved Food Packaging. *In: Advance applications of polysaccharides and its composites*. AL-AHMED, A.; INAMUDDIN. 1ª ed. Millersville: Materials Research Forum, v. 73, p. 136-183, 2020b.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; SIMON, L.; MUNIZ, G. I. B; ANDRADE, A. S.; NISGOSKI, S.; KLOCK, U. Different degree of fibrillation: strategy to reduce permeability in nanocellulose-starch films. **Cellulose**, 2020a. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03232-4>

LENGOWSKI, E. C.; CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; COLDOBELLA, R.; BONFATTI JÚNIOR, E. A. Nanocellulose aerogels. *In: Materials research foundations*, INAMUDDIN; RANGREEZ, T. A.; AHAMED, M. I.; BODDULA, R. (eds.) v. 84, p. 1-33, 2020d.

LENGOWSKI, E. C.; MUNIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E. Cellulose acquirement evaluation methods with different degrees of crystallinity. **Scientia Forestalis**, v. 41, p. 185-194, 2013.

LENZE, C. J.; PEKSA, C. A.; SUN, W.; HOEGER, I. C.; SALAS, C.; HUBBE, M. A. Intact and broken cellulose nanocrystals as model nanoparticles to promote dewatering and fine-particle retention during papermaking. **Cellulose**, v. 23, p. 3951-3962, 2016. <http://doi.org/10.1007/s10570-016-1077-9>

LÓPEZ-RUBIO, A.; LAGARON, J. M.; ANKERFORS, M.; LINDSTRÖM, T.; NORDQVIST, D.; MATTOZZI, A.; HEDENQVIST, M. S. Enhanced film forming and film properties of amylopectin using micro-fibrillated cellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 68, n. 4, p. 718-727, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.08.008>

LOPEZ-SUEVOS, F.; EYHOLZER, C.; BORDEANU N.; RICHTER, K. DMA analysis and Wood bonding of PVAc latex reinforced with cellulose nanofibrils. **Cellulose**, v. 17, p. 387-398, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9396-8>

LU, P.; HSIEH, Y. L. Preparation and properties of cellulose nanocrystals: rods, spheres, and network. **Carbohyd Polym**, v. 82, n. 2, p. 329-336, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.073>

LUI, Z.; ZHANG, Y.; WANG, Z.; RODRIGUE, D. Reinforcement of lignin-based Phenol-formaldehyde adhesive with nano-crystalline cellulose (NCC): Curing behavior and bonding property of plywood. **Materials Sciences and Applications**, v. 6, n. 6, p. 567-575, 2015. <http://doi.org/10.4236/msa.2015.66060>

LUU, W. T.; BOUSFIELD, D. W.; KETTLE, J. **Application of nano-fibrillated cellulose as a paper surface treatment for inkjet printing**. PAPERCON, 2011; Covington. Disponível em: <http://www.tappi.org/Downloads/Conference-Papers/2011/2011-Paper-Con-Conference/11PAP34.aspx>. Acesso em: 02 Fev. 2016.

MORÁN, J. I.; ALVAREZ, V. A.; CYRAS, V. P.; VÁSQUEZ, A. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibres. **Cellulose**, v. 15, n. 1, p. 149-159, 2008. <http://doi.org/10.1007/s10570-007-9145-9>

MAHRDT, E.; PINKL, S.; SCHMIDBERGER, C.; VAN HERWIJNEN, H. W. G.; VEIGEL, S.; GINDL-ALTMUTTER, W. Effect of addition of microfibrillated cellulose to urea-formaldehyde on selected adhesive characteristics and distribution in particleboard, **Cellulose**, v. 23, p. 571-580, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0818-5>

MANNINEN, M.; KAJANTO, I.; HAPPONEN, J.; PALTAKARI, J. The effect of microfibrillated cellulose addition on drying shrinkage and dimensional stability of wood-free paper. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 26, n. 3, p. 297-305, 2011. <https://doi.org/10.3183/npprj-2011-26-03-p297-305>

MAY, M.; WANG, H. M.; AKID, R. Effects of the addition of inorganic nanoparticles on the adhesive strength of a hybrid solgel epoxy system. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 30, n. 6, p. 505-512, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.002>

MILEWSKI, J. V. Whiskers. *In*: Concise encyclopedia of composite materials. KELLY, A. (ed.). Pergamon: New York, p. 311-314, 1994.

MITCHELL, G.; GASPAR, F.; MATEUS, A.; MAHENDRA, V.; SOUSA, D. Advanced Materials from Forests. In: MARTÍNEZ, L. M. T.; KHARISSOVA, O. V.; KHARISOV, B. I. (eds.). Handbook of Ecomaterials, 2018. p. 1-24.

MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M. Nano-reinforcement of bio-based polymers-The hope and reality. **Polymeric materials: science and engineering**, v. 88, p. 60-61, 2003.

MONDRAGON, G.; PEÑA-RODRIGUEZ, C.; GONZÁLEZ, A.; ECEIZA, A.; ARBELAIZ, A. Bionanocomposites based on gelatin matrix and nanocellulose. **European Polymer Journal**, v. 62, p. 1-9, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.003>

NAKAGAITO, A. N.; FUJIMURA, A.; SAKAI, T.; HAMA, Y.; YANO, H. Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 7, p. 1293-1297, 2009. <http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.03.004>

NAKAGAITO, A. N.; YANO, H. Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. **Applied Physics A**, v. 80, p. 155-159, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00339-003-2225-2>;

NAKAGAITO, A. N.; YANO, H. Toughness enhancement of cellulose nanocomposites by alkali treatment of the reinforcing cellulose nanofibers. **Cellulose**, v. 15, n. 2, p. 323-331, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9168-2>

NEGRÃO, S. W.; BUENO, R. D. R. L.; GUÉRIOS, E. E.; ULTRAMARI, F. T.; FAIDIGA, A. M.; ANDRADE, P. M. P.; FARAH, L. F. A Eficácia do *stent* recoberto com celulose biosintética comparado ao *stent* convencional em angioplastia em coelhos. **Revista Brasileira de Cardiologia Invasiva**, v. 14, n. 1, p. 10-19, 2006.

NOGI, M.; IWAMOTO, S.; NAKAGAITO, A. N.; YANO, H. Optically transparent nanofiber paper. **Advanced materials**, v. 21, n. 16, p. 1595-1598, 2009. <https://doi.org/10.1002/adma.200803174>

NYGARDS, S. **Nanocellulose in pigment coatings—aspects of barrier properties and printability in offset**. 42 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Paper; Pulp and Fiber Technology) – Department of Physics, Chemistry and Biology and Innventia, Linköping University, Sweden. 2011.

NG, H. M.; SIN, L. T.; TEE, T. T.; BEE, S. T.; HUI, D.; LOW, C. Y.; RAHMAT, A. R. Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. **Composites Part B**, v. 75, p. 176-200, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.008>

OLIVEIRA, A. F. D.; SOLDI, V.; COELHO, C. M. M.; MIQUELOTO, A.; COIMBRA, J. L. M. Desenvolvimento; caracterização e aplicação de biofilmes obtidos a partir de carboximetilcelulose e alginato de sódio na liberação de nutrientes. *In*: CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 2006.

OSONG, S. H.; NORGRÉN, S.; ENGSTRAND, P. Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose; and applications relating to papermaking: a review. **Cellulose**, v. 23, p. 93-123, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0798-5>

OSTERBERG, M.; VARTIAINEN, J.; LUCENIUS, J.; HIPPI, U.; SEPPALA, J.; SERIMAA, R.; LAINE, J. A fast method to produce strong NFC films as a platform for barrier and functional materials. **Applied of Material Interfaces**, v. 5, n. 11, p. 4640-4647, 2013. <http://doi.org/10.1021/am401046x>

PÄÄKKÖ, M.; ANKERFORS, M.; KOSONEN, H.; NYKÄNEN, A.; AHOLA, S.; OSTERBERG, M.; RUOKOLAINEN, J.; LARSON, P.T.; IKKALA, O.; LINDSTRÖM, T. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. **Biomacromolecules**, v. 8, n. 6, p. 1934-1941, 2007.

PETERSSON, L.; KVIEN, I.; OKSMAN, K. Structure and thermal properties of poly (lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials. **Composite Science and Technology**, v. 67, n. 11-12, p. 2535-2544, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.12.012>

PETERSSON, L.; OKSMAN, K. Biopolymer based nanocomposites: Comparing layered silicates and microcrystalline cellulose as nanoreinforcement. **Composite Science Technology**, v. 66, n. 13, p. 2187-2196, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.12.010>

PODSIADLO, P.; CHOI, S. Y.; SHIM, B.; LEE, J.; CUDDIHY, M.; KOTOV, N. A. Molecularly engineered nanocomposites: Layer-by-layer assembly of cellulose nanocrystals. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 6, p. 2914-2918, 2005. <https://doi.org/10.1021/bm050333u>

POTULSKI, D. C. **Influência da nanocelulose nas propriedades físicas e mecânicas de papel primário e reciclado de Pinus e Eucalyptus**. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2016.

POTULSKI, D. C.; MUNIZ, G. I. B.; KLOCK, U.; ANDRADE, A. L. The influence of incorporation of microfibrillated cellulose on mechanical strength properties of paper. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 345-351, 2014.

PROLONGO, S. G.; GUDE, M. R.; URENA, A. Rheological behavior of nanoreinforced epoxy adhesives of low electrical resistivity for joining carbon fiber/epoxy laminates. **Journal of Adhesion Science Technology**, v. 24, p. 1097-1112, 2010. <https://doi.org/10.1163/016942409X12584625925060>

PROLONGO, S. G.; GUDE, M. R.; URENA, A. Synthesis and characterization of epoxy resins reinforced with carbon nanotubes and nanofibers. **Journal of Nanoscience Nanotechnology**, v. 9, n. 10, p. 6181-6187, 2009. <http://doi.org/10.1166/jnn.2009.1554>

RAMPAZZO, R.; ALKAN, D.; GAZZOTTI, S.; ORTENZI M. A.; PIVA, G.; PIERGIOVANNIL, L. Cellulose nanocrystals from lignocellulosic raw materials; for oxygen barrier

coatings on food packaging films. **Packaging Technology and Science**, 2017. <https://doi.org/10.1002/pts.2308>

RANTANEN, J.; MALONEY, T. C. Press dewatering and nip rewetting of paper containing nano- and microfibril cellulose. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 28, n. 4, p. 582-587, 2013. <http://doi.org/10.3183/NPPRJ-2013-28-04-p582-587>

RANTANEN, J.; PIRTTINIEMI, J.; KUOSMANEN, P.; MALONEY, T. C. Development of a microfibrillated cellulose composite web forming method. *In*: TAPPI INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY FOR RENEWABLE MATERIALS, 2326 June, Vancouver, BC, 2014.

RICHMOND, F. **Cellulose nanofibers use in coated paper**. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de Maine, Orono. 2014.

ROJAS, J.; BEDOYA, M.; CIRO, Y. Current trends in the production of cellulose nanoparticles and nanocomposites for biomedical applications. *In*: Cellulose - Fundamental aspects and current trends, Poletto, D.M. Ed.; 2015 InTech, p. 195, 2015.

RÓZ, A. L. D. O. Futuro dos plásticos: biodegradáveis e fotodegradáveis. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 13, n. 4, p. e4-e5, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000400003>

SAKURADA, I.; NUKUSHINA, Y.; ITO, T. Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers. **Journal of Polymer Science**, v. 57, n. 157, p. 651-660, 1962. <https://doi.org/10.1002/pol.1962.1205716551>

SAINI, S.; SILLARD, C.; BELGACEM, M. N.; BRAS, J. Nisin anchored cellulose nanofibers for long term antimicrobial active food packaging. **RSC ADVANTANCES**, v. 6, n. 15, p. 12422-12430. 2016.

SAITO, T.; ISOGAI, A. A novel method to improve wet strength of paper. **TAPPI Journal**, v. 4, n. 3, p. 3-8, 2005.

SAITO, T.; NISHIYAMA, Y.; PUTAUX, J. L.; VIGNON, M.; ISOGAI, A. Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. **Biomacromolecules**, v. 7, n. 6, p. 1687-1691, 2006. <https://doi.org/10.1021/bm060154s>

SAITO, T.; KIMURA, S.; NISHIYAMA, Y.; ISOGAI, A. Cellulose nanofibres prepared by TEMPO mediated oxidation of native cellulose. **Biomacromolecules**, v. 8, n. 8, p. 2485-2491, 2007. <http://doi.org/10.1021/bm0703970>

SAITO, T.; HIROTA, M.; TAMURA, N.; KIMURA, S.; FUKUZUMI, H.; HEUX, L.; ISOGAI, A. Individualization of nano-sized plant cellulose fibrils by direct surface carboxylation using TEMPO catalyst under neutral conditions. **Biomacromolecules**, v. 10, n. 7, p. 1992-1996, 2009. <http://doi.org/10.1021/bm900414t>

SALAS, C.; HUBBE, M.; ROJAS, O. J. Nanocellulose applications in papermaking. In: Production of materials from sustainable biomass resources. **Biofuels and Biorefineries**, FANG, Z.; SMITH, Jr. R.; TIAN, X. F. (eds) Springer, Singapore, v. 9, p. 61-96, 2019. http://doi-org-443.webvpn.fjmu.edu.cn/10.1007/978-981-13-3768-0_3

SAMYN, P.; BARHOUM, A.; OHLUND, T.; DUFRESNE, A. Review: nanoparticles and nanostructured materials in papermaking. **Journal of Material Science**, v. 53, p. 146-184, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1525-4>

SELLERS, T. Adhesives in wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 599-614.

SEHAQUI, H.; ALLAIS, M.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. A. Wood cellulose biocomposites with fibrous structures at micro- and nanoscale. **Composites Science and Technology**, v. 71, n. 3, p. 382-387, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.007>

SEHAQUI, H.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v. 28, n. 2, p. 182-189, 2013. <http://doi.org/10.3183/NPPRJ-2013-28-02-p182-189>

SHAIKH, S.; BIRDI, A.; QUTUBUDDIN, S.; LAKATOSH, E.; BASKARAN, H. Controlled release in transdermal pressure sensitive adhesives using organosilicate nanocomposites. **Annals of Biomedical Engineering**, v. 35, n. 12, p. 2130-2137, 2007. <http://doi.org/10.1007/s10439-007-9369-8>

SHAH, J.; BROWN JR., R. M. Towards electronic paper displays made from microbial cellulose. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 66, n. 4, p. 352-355. 2005. <http://doi.org/10.1007/s00253-004-1756-6>

SHEYKHI, Z. H.; TABARSA, T.; MASHKOUR, M. Effects of nano-cellulose and resine on MDF properties produced from recycled MDF using electrolise method. **Journal of Wood and Forest Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 271-288. 2016.

SHINODA, R.; SAITO, T.; OKITA, Y.; ISOGAI, A. Relationship between length and degree of polymerization of TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils. **Biomacromolecules**, v. 13, p. 842-849, 2012. <https://doi.org/10.1021/bm2017542>

SIRO, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. **Cellulose**, v. 17, p. 459-494, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9405-y>

SIRO, I.; PLACKETT, D.; HEDENQVIST, M.; ANKERFORS, M.; LINDSTROM, T. Highly transparent films from carboxymethylated microfibrillated cellulose: the effect of multiple homogenization steps on key properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 119, n. 5, p. 2652-2660, 2011. <https://doi.org/10.1002/app.32831>

SONESSO, M. F. C. **Obtenção e caracterização de nanocristais de celulose a partir de algodão cru e polpa kraft**. 111 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

SJÖSTRÖM, E.; ALLEN, R. **Springer series in wood science**. Berlin: Springer, 1999.

SOUZA, A. C.; BENZE, R.; FERRÃO, E. S.; DITCHFIELD, C.; COELHO, A. C. V.; TADINI, C. C. Cassava starch biodegradable films: Influence of glycerol and clay nanoparticles content on tensile and barrier properties and glass transition temperature. **LWT - Food Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 110-117, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.018>

SPENCE, K. L.; VENDITTI, R. A.; HABIBI, Y.; ROJAS, O. J.; PAWLAK, J. J. Aspects of raw materials and processing conditions on the production and utilization of microfibrillated cellulose. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE OF NANOTECHNOLOGY FOR THE FOREST PRODUCTS INDUSTRY, 2010; Espoo, **Anais...** Espoo: TAPPI. 2010.

SPENCE, K. L.; VENDITTI, R. A.; ROJAS, O.; HABIBI, Y.; PAWLAK, J. The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: water interactions and physical properties for packaging applications. **Cellulose**, v. 17, n. 4, p. 835-848, 2010a. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9424-8>

SPENCE, K. L.; VENDITTI, R. A.; ROJAS, O.; HABIBI, Y.; PAWLAK, J. J. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. **Cellulose**, v. 18, n. 4, p. 1097-1111, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9533-z>

STENSTAD, P.; ANDRESEN, M.; TANEM, B. S.; STENIUS, P. Chemical surface modifications of microfibrillated cellulose. **Cellulose**, v. 15, p. 35-45, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9143-y>

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2. ed. London: Academic, 1993. 293 p.

STENIUS P. **Nanocellulose technology—conclusions and perspectives 2006-2014**. 5th recent advances in cellulose nanotechnology research seminar, 28-29 October, Trondheim, 2014.

SU, J.; MOSSE, W. K. J.; SHARMAN, S.; BATCHELOR, W. J.; GARNIER, G. Effect of tethered and free microfibrillated cellulose (MFC) on the properties of paper composites. **Cellulose**, v. 20, n. 4, p. 1925-1935, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9955-x>

SYVERUD, K.; STENIUS, P. Strength and barrier properties of MFC films. **Cellulose**, v. 16, n. 1, p. 75-85, 2009.

SYVERUD, K.; CARRASCO, G. C.; TOLEDO, J.; TOLEDO, P. G. A comparative study of Eucalyptus and *Pinus radiata* pulp fibres as raw materials for production of cellulose nanofibrils. **Carbohydrate Polymers**, v. 84, n. 3, p. 1033-1038, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.066>

TAIPALE, T.; ÖSTERBERG, M.; NYKÄNEN, A.; RUOKOLAINEN, J.; LAINE, J. Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. **Cellulose**, v. 17, p. 1005-1020, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9431-9>

TASHIRO, K.; KOBAYASHI, M. Theoretical evaluation of 3-dimensional elastic constants of native and regenerated celluloses: role of hydrogen bonds. **Polymer**, v. 32, n. 8, p. 1516-1530, 1991. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(91\)90435-L](https://doi.org/10.1016/0032-3861(91)90435-L)

TANPICHAI, S.; QUERO, F.; NOGI, M.; YANO, H.; YOUNG, R. J.; LINDSTROM, T.; SAMPSON, W. W.; EICHHORN, S. J. Effective Young's modulus of bacterial and microfibrillated cellulose fibrils in fibrous networks. **Biomacromolecules**, v. 13, n. 5, p. 1340-1349, 2012. <https://doi.org/10.1021/bm300042t>

TORVINEN, K. Binding fillers for high filler content papers by using CNF/CMF. *In*: TAPPI INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY FOR RENEWABLE MATERIALS, 23-26 June, Vancouver, BC, 2014.

TUOVINEN, L.; PELTONEN, P.; JÄRVINEN, K. Drug release from starch-acetate films. **Journal of Controlled Release**, v. 91, n. 3, p. 345-354, 2003. [http://doi.org/10.1016/s0168-3659\(03\)00259-1](http://doi.org/10.1016/s0168-3659(03)00259-1)

TURBAK, A.F.; SNYDER, F.W.; SANDBERG, K.R. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential, **Journal of Applied and Polymer Science**, v. 37, 1983.

ZIMMERMANN, T.; BORDEANU, N.; STRUB, E. Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 4, p. 1086-1093, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>

VEIGEL, S.; RATHKE, J.; WEIGL, M.; GINDL-ALTMUTTER, W. Particle board and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive. **Journal of Nanomaterials**, ID 158503, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/158503>

VIANA, L. C. **Desenvolvimento de filmes celulósicos nanoestruturados a partir da madeira de polpa kraft de Pinus sp.** 129 p. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

WANG, Q. Q.; ZHU, J. Y.; REINER, R. S.; VERRILL, S. P.; BAXA, U.; MCNEIL, S. E. Approaching zero cellulose loss in cellulose nanocrystal (CNC) production: recovery and characterization of cellulosic solid residues (CMC) and CNC. **Cellulose**, v. 19, n. 6, p. 2033-2047, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9765-6>

WANG, H.; LI, D.; ZHANG, R. Preparation of ultralong cellulose nanofibers and optically transparent nanopapers derived from waste corrugated paper pulp. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1374-1384, 2013.

WATANABE, Y.; MUKAI, B.; KAWAMURA, K. I.; ISHIKAWA, T.; NAMIKI, M.; UTO-GUCHI, N.; FUJII, M. Preparation and evaluation of press-coated aminophylline tablet using crystalline cellulose and polyethylene glycol in the outer shell for timed-release dosage forms. **Yakugaku Zasshi**, v. 122, n. 2, p. 157-162, 2002. <http://doi.org/10.1248/yakushi.122.157>

YANO, H.; SUGIYAMA, J.; NAKAGAITO A. N.; NOGI, M.; MATSUURA, T.; HIKITA, M.; HANDA, K. Optically transparent composites reinforced with networks of bacterial nanofibers. **Advanced Materials**, v. 17, n. 2, p. 153-155, 2005. <https://doi.org/10.1002/adma.200400597>

YOON, S. H.; KIM, B. C.; LEE K. H.; LEE, D.G. Improvement of the adhesive fracture toughness of bonded aluminum joints using e-glass fibers at cryogenic temperature. **Journal of Adhesion Science Technology**, v. 24, n. 2, p. 429-444, 2010. <http://doi.org/10.1163/016942409X12541266699635>

ZIMMERMANN, T.; POHLER, E.; GEIGER, T. Cellulose fibrils for polymer reinforcement. **Advanced Engineering Materials**, v. 6, n. 9, p. 754-761, 2004. <http://doi.org/10.1002/adem.200400097>

ZIMMERMANN, T.; BORDEANU, N.; STRUB, E. Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 4, p. 1086-1093, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>

ZHANG, Y.; YOU, B.; HUANG, H.; ZHOU, S.; WU, L.; SHARMA, A. Preparation of nano-silica reinforced waterborne silylated polyether adhesive with high shear strength. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 109, n. 4, p. 2434-2441, 2008. <http://doi.org/10.1002/app.28326>

ZHANG, H.; ZHANG, J.; SONG, S.; WU, G.; PU, J. Modified nanocrystalline cellulose from two kinds of modifiers used for improving formaldehyde emission and bonding strength of urea-formaldehyde resin adhesive. **BioResources**, v. 6, n. 4, p. 4430-4438, 2011.



Materiais não tradicionais na fabricação de painéis ou compósitos

Emilly Soares Gomes da Silva

Jaqueline Rocha de Medeiros

Fabricio Gomes Gonçalves

Wendel Sandro de Paula Andrade

Juarez Benigno Paes

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria do setor florestal está em ascensão, junto a isso a demanda de madeira no Brasil tem sido cada vez mais marcante. Nesse sentido, uma das formas de otimizar a utilização da madeira tem sido por meio da produção de painéis e compósitos fabricados à base de materiais lignocelulósicos (ARAÚJO *et al.*, 2017).

Os painéis à base de materiais lignocelulósicos vêm se destacando no mercado porque este produto agrega valor e ainda possibilita o desenvolvimento de novos produtos de melhor qualidade, oferecendo uma melhor estabilidade dimensional ao material. Isso possibilita a utilização de toras de menor dimensão, contribuindo ainda mais na valorização de madeiras de baixa e média densidade, transformando-as em painéis de alta densidade. Entretanto, além dos materiais lignocelulósicos, outros resíduos industriais vêm sendo utilizados no processo de confecção de painéis no âmbito de pesquisa, o que consequentemente contribui para a melhoria da qualidade do mesmo, podendo ainda reduzir os custos da produção (NASSER, 2019), como, por exemplo, a utilização de derivados de plásticos (LOPEZ *et al.*, 2018).

Vale ressaltar que, além dos benefícios da produção de painéis à base de matérias lignocelulósicas, o que torna determinante a sua boa inserção em mercado são os processos

que garantem a boa qualidade do material, estando entre os processos a homogeneização, isto é, quando os materiais lignocelulósicos são unidos a outros componentes, sendo esses componentes denominados compósitos. Podendo ser adicionados materiais à base de plástico, vidro, entre outros.

É importante destacar que há uma diferença a ser abordada, pois os painéis vêm sendo autodenominados compósitos. Entretanto, os compósitos, segundo Medeiros *et al.* (2016), são materiais que possuem pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas diferentes, sendo a sua própria matriz determinante nas características das propriedades importantes, como comportamento térmico e elétrico, resistência a agentes químicos, entre outros. Já os painéis produzidos com partículas de madeira são definidos como materiais que são incorporados a adesivos sintéticos e reconstituídos numa matriz randômica e consolidados através de aplicação de calor e de pressão na prensa quente (IWA-KIRI, 2005; MACEDO *et al.*, 2015).

No Brasil, em 2018, a produção de painéis de madeira reconstituída foi de 8,2 milhões de metros cúbicos, representando um aumento de 2,8% em relação a 2017, o que deixa o país em 8º lugar no ranking mundial dos maiores produtores desse segmento, segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). A produção de painéis compensados teve uma queda na produção de 1,6% em 2018 em relação a 2017 devido à estagnação da construção civil. Entretanto, apesar dessa redução, as exportações desse segmento aumentaram 9,7%, passando de 1,9 milhão de metros cúbicos de painéis compensados para 2,1 milhões de metros cúbicos (IBÁ, 2018).

1 MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA NA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS

1.1 Materiais lignocelulósicos não tradicionais

Como forma de suprir a demanda das indústrias de painéis, outros resíduos lignocelulósicos vêm sendo testados com o objetivo de propiciar alternativas potenciais que apresentem qualidades similares aos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que são madeiras tradicionalmente utilizadas na fabricação dessas estruturas. A utilização de resíduos lignocelulósicos se torna possível devido à similaridade química com as madeiras, em especial as madeiras consideradas duras, pois possuem menor teor de lignina e maior teor de hemicelulose do tipo pentosanas (IWAKIRI *et al.*, 2004; MACHADO *et al.*, 2017). Dentre os materiais estudados de forma integral ou parcial, estão inclusos:

O *bagaço de sorgo* também tem sido explorado em estudos alternativos para produção de painéis, apesar dos poucos estudos existentes. Esse tipo de material se torna uma boa alternativa para os painéis devido ele apresentar células de celulose maiores do que a madeira, o

que facilita a penetração por produtos químicos, além de possuir parede celular mais macia e fina, o que consequentemente contribui para remoção de umidade, tendo um menor requerimento de energia para a retirada desta variável (HURST *et al.*, 2013).

O *bambu* é um dos materiais renováveis, fonte de fibras, que vem sendo empregado na produção de painéis aglomerados devido a suas excelentes propriedades físico-mecânicas e rápido crescimento (KUEHL *et al.*, 2011), já possuindo escala industrial em países como China, Tailândia e Índia (GATTO *et al.*, 2007). Segundo Melo *et al.* (2015), o bambu se mostra uma alternativa viável para a produção de painéis, possuindo comportamento similar aos painéis produzidos exclusivamente com partículas de madeira.

As *fibras de bananeira*, que geralmente são utilizadas para fins industriais a fim de beneficiar significativamente o meio ambiente com suas propriedades, também vêm sendo cada vez mais exploradas para aplicação da produção de painéis. Essas fibras possuem características que agregam ainda mais valor ao material, sendo essas relacionadas a sua capacidade de absorção de umidade, resistência à tração, alta elasticidade e leveza, além de ser um material biodegradável (ROHNI, 2014). Além disso, o caule da bananeira fornece uma fibra lignocelulósica que apresenta propriedades mecânicas desejáveis devido ao seu alto teor de celulose e baixo ângulo microfibrilar, tendo também como responsável pela resistência natural a decomposição do material lignocelulósico por meio da lignina existente (MUKHOPADH-YAY *et al.*, 2008; RAGHANVENDRA *et al.*, 2012).

Na produção do *amendoim* é gerada uma grande quantidade de resíduos, cerca de 30% provenientes da casca. É utilizado em caldeiras e como alimento para gado, no entanto, apresenta propriedades mecânicas que possibilita a utilização da casca na fabricação de painéis aglomerados. A utilização da casca de amendoim em aglomerados confere ao painel um atrativo visual, sendo indicado para uso em revestimento. O resíduo possui baixa resistência biológica, logo é necessário utilizar tratamento preservativo para maior durabilidade do material. De acordo com a norma da ANSI-1993, painéis produzidos com adição de resíduos de casca de amendoim e ureia-formaldeído podem ser utilizados no meio interno, onde não seja necessário suportar altos esforços mecânicos (GATANI *et al.*, 2013).

O *bagaço da cana de açúcar* é um dos resíduos alternativos também utilizados para a fabricação de painéis, tendo em vista que o Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar no âmbito mundial, com cerca de 2.300 ha cultivados, sendo o resíduo proveniente da extração utilizado principalmente para energia. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2009), 60% do total produzido é utilizado em caldeiras para energia e 40% descartado. Atualmente estão sendo desenvolvidas pesquisas para agregar valor a esse resíduo, e uma alternativa viável é a fabricação de painéis aglomerados. O bagaço da cana-de-açúcar confere ao painel densidade média, logo os aglomerados formulados a partir de bagaço de cana podem ser utilizados para meio comercial e industrial. No entanto,

o material absorve e perde muita umidade do meio, logo é necessária a utilização de óleo de mamona como adesivo, para haver impermeabilização do material, e este ser destinado para uso interno de residências, decorativo, e como material não estrutural (FIORELLE *et al.*, 2011; BRITO *et al.*, 2020).

A *fibra de coco* é um subproduto agroindustrial do *Cocos nucifera* gerado em grande quantidade. Dentre os subprodutos vegetais, a fibra de coco é a que possui menor quantidade de celulose, porém possui alta quantidade de lignina, tendo potencial para fabricação de painel aglomerado. Entre as principais propriedades da fibra de coco encontra-se alto módulo de elasticidade, resistência ao desgaste mecânico, durabilidade natural, resistência ao ataque de fungos e térmita, atuando ainda como isolante térmico e sonoro. Diante dessas propriedades, é tecnicamente viável o uso da fibra de coco para compor painéis aglomerados (WIEDMAN, 2002).

Dentre os cereais mais produzidos no mundo, o *arroz* ocupa a terceira posição, representando 16,9% de toda a produção mundial, e o Brasil detém 1,6% desta produção, conforme dados apresentados pela Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais em 2017 (MINAS GERAIS, 2017). A casca que reveste o grão é um material fibroso, com alta concentração de sílica, sendo sua decomposição lenta, o que gera um problema de acúmulo de resíduos sólidos. Uma alternativa poderia ser a fabricação de painéis aglomerados. No entanto, cuidados devem ser tomados, como respeitar as devidas proporções, pois quanto maior a proporção de casca de arroz, maior a absorção de água, devido aos valores elevados de celulose, possuindo assim muitos sítios para absorção de água. A adição da casca de arroz em maior proporção diminui o módulo de ruptura, ocasionado pela pequena dimensão das partículas, como mencionado por Alves (2017).

Resíduos de serraria também são explorados em pesquisas, tendo em vista o grande volume de resíduos gerados durante as fases operacionais (IWAKIRI *et al.*, 2000; TINTI *et al.*, 2018). Os resíduos provenientes da madeira são lignocelulósicos, e são caracterizados por serem heterogêneos, devido à variedade, à granulometria da serragem e às diversas condições de armazenamento que podem apresentar características físicas e mecânicas variadas nos painéis, além de possuírem uma menor densidade (QUIRINO, 2007; STADLER *et al.*, 2009). Seu uso deve estar atrelado à identificação e quantificação das propriedades químicas, proporcionando desta forma um potencial de reutilização, agregando valor ao material a ser produzido ou ao processo produtivo pelo qual será utilizado (FARIA *et al.*, 2016).

As *cascas da noz de macadâmia* são subprodutos tratados como resíduos e vêm sendo inseridas na produção de painéis, pois apresentam excelentes propriedades físicas quando comparadas a madeiras de coníferas, principalmente quando expostas em locais com umidade alta. São compostas de lignina, que se apresenta em maior proporção (47%), celulose (25%), hemiceluloses (11%) e cinzas (0-2%), apresentando características como casca dura,

tenacidade à fratura e uma estrutura razoavelmente isotrópica e uniforme (WECHSLER *et al.*, 2011; MARTINS, 2016).

O *sabugo de milho* também possui potencial para ser utilizado no setor de produção de painéis devido à alta produção de milho no Brasil, que conseqüentemente gera um descarte de grande quantidade desse material (MENDES *et al.*, 2010; SCATOLINO *et al.*, 2013), sendo apenas incorporado ao solo ou sendo utilizado como alimentação animal. Os resíduos do sabugo de milho possuem boas características químicas, apresentando teores de extrativos relativamente baixos, não interferindo assim na colagem do adesivo utilizado, além de apresentarem teores de lignina significativos, sendo esta responsável pela rigidez do painel produzido (FARIA *et al.*, 2018).

A *cevada* é um dos cereais mais importantes do mundo. No Brasil, 90% da sua produção é voltada para a fabricação de cerveja (SANTOS *et al.*, 2001; CORDEIRO, 2011), sendo que 85% correspondem ao bagaço de malte que é obtido no início do processo de produção de cerveja (CORDEIRO, 2012; KNISS *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2019). Esse resíduo tem sido cada vez mais explorado para outros fins, e a produção de painéis é uma dessas alternativas de aplicação desse material, isso porque o bagaço de malte é, em sua maioria, constituído quimicamente por celulose, polioses e lignina, e minoritariamente por extrativos e cinzas, sendo esses componentes influentes na formação e performance da ligação adesiva, estando relacionados à exposição de áreas de maior ou menor concentração de extrativos na superfície a ser colada (IWAKIRI, 2005; KNISS *et al.*, 2015).

Chapas de *partículas de gesso* (GBP) que resultam da combinação de partículas de madeira numa matriz de gesso visando à obtenção de painéis com qualidades melhoradas podem ser chamadas de compósitos, uma vez que há materiais não celulósicos na formação do painel. Usualmente o GBP possui maior resistência mecânica, resistência ao fogo, fungos e cupins, além de promover boa trabalhabilidade. O gesso não possui boas propriedades de colagem. Por isso é necessário passar por um tratamento com cloreto de cálcio para melhorar as propriedades de aglutinação da madeira e fortalecer as ligações entre as matérias-primas. A principal vantagem da utilização do gesso é a economia, uma vez não ser necessária a prensagem a quente. Como desvantagem, o gesso absorve e perde muita água, afetando as propriedades de retratibilidade do painel (HASELEIN *et al.*, 2002).

Outro resíduo que vem sendo utilizado na produção de painéis é a *pena de frango*. Devido às qualidades nutricionais e ao baixo custo, o frango é um dos alimentos mais consumidos. Por causa do alto consumo, uma grande quantidade de resíduo é gerada. Minutti (2018) desenvolveu um trabalho com penas de frango e observou que os painéis produzidos possuíam irregularidades e falta de acabamento superficial, dificultando o corte dos corpos de prova e conseqüentemente as propriedades mecânicas do painel. Cada pena apresenta padrão heterogêneo, ocorrendo variações da densidade e resistência e provocando menor

estabilidade e adensamento, e com isso originando um produto quebradiço. No entanto, a utilização da pena em painel do tipo sanduíche é viável, pois a pena ajuda a melhorar as propriedades térmicas.

1.2 Adesivos não comumente utilizados pela indústria

Os painéis produzidos com pequenos fragmentos de madeira ou outros materiais lignocelulósicos são aglutinados por adesivos sintéticos ou outros aglomerantes, contribuindo então para o desenvolvimento da indústria de painéis de madeira (SCHROEDER; THOMPSON, 1990). No entanto, devido à crescente demanda pela utilização de matéria-prima renovável, materiais alternativos são testados em pesquisa a fim de promover informações sobre novos adesivos com características similares aos adesivos já utilizados no mercado (CARVALHO *et al.*, 2016). Entre os adesivos já testados estão:

1. Os adesivos à base de *tanino de barbatimão* (*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville), apesar de haver poucos estudos existentes sobre esse tipo de material, apresentam potencial comprovado, possuindo um rendimento de 30,1% (MORI *et al.*, 2003). Além das características supracitadas, esse adesivo possui outras peculiaridades importantes que também potencializam sua utilização, dentre essas sua alta viscosidade e baixo tempo de gel, o que promove a cura mais rápida, diminuindo o tempo para a aplicação, sendo a viscosidade uma variável importante a ser avaliada para a produção do adesivo, pois seu aumento excessivo reduz a absorção pela madeira, podendo resultar em uma linha de cola espessa quando aliado a uma aplicação de baixa pressão de prensagem dos painéis (IWAKIRI, 2005; LOPES *et al.*, 2009; CARVALHO *et al.*, 2016).

2. Adesivos de *poliuretano derivados de óleo de mamona* também se tornam uma alternativa viável, pois se apresentam como opção para reduzir a emissão de formaldeído que são comumente utilizados pelas indústrias de adesivos, sendo uma matéria-prima renovável que apresenta propriedades mecânicas de interesse desse segmento (JESUS, 2000; DIAS; LAHR, 2004; WILCZAK, 2014). Em estudos já realizados, foi constatado que adesivos derivados de óleo de mamona, quando comparados aos adesivos comerciais à base de formaldeído, apresentam maior resistência à flexão estática e ao cisalhamento por tração da linha de cola, sendo viável a substituição desses adesivos comerciais pelos adesivos de poliuretano derivado de óleo de mamona (WILCZAK, 2014).

3. O *amido* é uma matéria-prima renovável, de baixo custo e com grande disponibilidade no mercado, sendo explorado para produção de adesivos. Os adesivos provenientes

dessa matéria-prima apresentam resistência ao calor, boa estabilidade, boa adesão à celulose e demais substratos porosos, além de não serem tóxicos (FABRÍCIO; MAHLMANN, 2014). A viscosidade controlada, propriedades de retenção de água e colagem após a secagem agregam ainda mais valor ao amido, ampliando estudos com o intuito de expandir sua utilização na produção de painéis (MAURER, 2009; CLARINDO, 2013).

4. A *caseína*, proteína do leite, tem sido utilizada para diversas aplicações, sendo já explorada a milhares de anos, tornando-se uma opção para produção de adesivos à base de água, pois as colas já produzidas por essa proteína apresentaram alto poder de adesão, sendo um adesivo de fácil preparo. No entanto, pesquisas ainda devem ser realizadas com o objetivo de buscar melhorias em algumas propriedades dessa matéria-prima, pois a cola produzida possibilita a absorção da umidade, desenvolvendo fungos que se alimentam desse adesivo (PONTO CIÊNCIA, 2009). Apesar da desvantagem abordada, pesquisas vêm corrigindo algumas peculiaridades que agregam valor ao uso da caseína, como é o caso da adição de bicarbonato de sódio, que leva à formação do caseinato de sódio, promovendo uma cola com mais propriedades aglomerantes (FERREIRA *et al.*, 1997).

5. Adesivos à base de *proteína de soja* têm sido empregados nos últimos anos devido a sua abundância e característica de interesse ao setor de painéis. Esses adesivos são fontes renováveis e de fácil trabalhabilidade. Além disso, podem ser inseridos em painéis por colagem a quente ou a frio (XU *et al.*, 2014; TISSERAT *et al.*, 2018). Apesar do seu alto custo quando comparados a adesivos tradicionais, proporcionam alta resistência à adesão, sendo eficazes como resina (TISSERAT *et al.*, 2018).

2 RETARDANTES DE FOGO

Com todo contexto abordado, é possível constatar o quão aprofundado têm sido as pesquisas a fim de obter uma madeira com seus subprodutos possuindo propriedades desejáveis, ampliando assim a sua utilização, principalmente nas indústrias de painéis. No entanto, segundo Popescu e Pfriem (2020), outras características da madeira têm sido alvo de estudos, principalmente devido às últimas tendências globais que estão provocando um aumento nos padrões de vida, causando preocupações crescentes sobre a proteção das pessoas.

Essa preocupação tem levado a uma maior atenção às madeiras, isso porque o material é combustível, podendo ser restringido como forma de segurança. A madeira é um material inflamável que, quando exposta a altos fluxos de calor, queima e produz chamas, liberando gases inflamáveis que alimentam a combustão. O que não se decompõe em gases

voláteis se transforma em carvão, agindo então como isolante térmico e físico da madeira não carbonizada (FIGUEROA; MORAES, 2009). Apesar de essa característica possibilitar uma maior proteção ao ataque do fogo, é necessário melhorar o desempenho do material, tendo como alternativa a aplicação de tratamentos químicos retardadores de combustão (LARANJEIRA, 2012).

Os retardantes de fogo são substâncias empregadas com o objetivo de proteger a madeira do fogo, reduzindo as características de combustão da superfície do material sem deteriorar as suas propriedades. Geralmente, reduzem a quantidade de calor liberada durante a fase inicial do incêndio, retardando a propagação das chamas e limitando a produção de fumaça e voláteis inflamáveis (POPESCU; PFRIEM, 2020).

Para a indústria de painéis, a aplicação desses retardadores é importante devido à delaminação da madeira projetada provocar a deterioração drástica à resistência ao fogo, afetando a integridade estrutural do produto gerado da madeira por causa da falha do adesivo, induzindo a um aumento na propagação da chama e na taxa de liberação de calor que é provocada pelo desprendimento da camada isolante que é carbonizada superficialmente, expondo o material subjacente à chama (WANG *et al.*, 2018).

Devido à importância dos retardantes do fogo, recursos ecológicos vêm sendo explorados como aditivos com a finalidade de proporcionar um agente retardador com nocividade baixa para o meio ambiente e animais. Dentre os já existentes, tem-se o uso de ligninas e lignossulfonatos como aditivos de carbonização retardantes de fogo, os quais apresentam potenciais substitutos em função de seu caráter renovável, alto teor de carbono e estrutura aromática, sendo as duas últimas características que reduzem a taxa de combustão durante um incêndio, promovendo a formação de um carvão isolante que preserva o material da queima (ANGELINI *et al.*, 2019).

O uso de substâncias intumescentes também tem sido uma alternativa ecológica para substituir os retardadores tradicionais halogenados, como é o caso do silício, silanos e polisiloxanos, que são utilizados em virtude da eficiência de proteger os materiais contra ação do fogo sem modificar suas propriedades intrínsecas, bem como de viabilizar a utilização desses revestimentos em razão de seu custo mais econômico (GIUDICE; CANOSA, 2017).

Em estudos realizados por Son *et al.* (2012), produtos químicos inorgânicos como silicato de sódio, ácido bórico, fosfato de amônio e borato de amônio foram incorporados como forma de retardar chamas da madeira através de tratamentos com feixe de elétrons no intuito de aumentar a penetração química no material. Como resultado, a penetração dos produtos foi aprimorada e o retardado por silicato de sódio, fosfato de amônio e borato de amônio foi mais eficaz, mostrando ser alternativa viável para reduzir a emissão de CO₂.

A impregnação de vernizes à base de espécies comerciais também tem sido aplicada. Vernizes de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus dunnii* apresentaram boas respostas como retardador

do fogo em painéis compensados, contribuindo para menor taxa de liberação de calor e aumento da fração da massa residual, melhorando as propriedades mecânicas e higroscópicas da madeira compensada tratada com esses retardantes (LA *et al.*, 2015).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição de materiais tradicionais por materiais lignocelulósicos ou compósitos tem sido cada vez mais explorada na pesquisa com o intuito de promover informações importantes sobre as propriedades desses materiais na produção de painéis. Com a variedade de matérias lignocelulósicas e compósitos existentes, amplia-se a aplicação destes em diferentes segmentos, além de propiciar uma redução nos custos de produção dos painéis. Para que esse segmento seja ainda mais promissor, adesivos à base de recursos naturais vêm sendo inseridos na indústria de painéis, tornando versátil a sua aplicação, gerando um material que se torna competitivo no mercado, tendo em vista que esse segmento tem buscado novas alternativas que possam suprir os materiais tradicionais, que, devido a sua grande demanda têm se tornado cada vez mais escassos.

Contudo, ampliam-se novos caminhos para a utilização de materiais renováveis, promovendo um ganho ambiental e viabilizando um acréscimo na economia em relação aos produtos tradicionais.

Referências

ALVES, S. D. **Painéis aglomerados produzidos com casca de arroz modificada termicamente em associação com madeira de Pinus taeda**. 43 p. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2017.

ANGELINI, S.; BARRIO, A.; CERRUTI, P.; SCARINZI, G.; JACA, J. G.; SAVY, D.; PICCOLO, A.; MALINCONICO, M. Lignosulfonates as fire retardants in wood flour-based particleboards. **International Journal of Polymer Science**, v. 4, p. 1-10, 2019. <http://doi.org/10.1155/2019/6178163> Acesso em: **INFORMAR**

ARAÚJO, V. A.; GARCIA, J. N.; BARBOSA, J. C.; GAVA M.; SAVI, A. F.; MORALES, A. M.; LARH, F. A. C.; VASCONCELOS, J. S.; CHISTOFORO, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

BRITO, F. M. S.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; PAES, J. B.; BELINI, H. L.; TOMAZELLO-FILHO, M. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Construction and Building Materials**, v. 262, 120501, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120501>

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; MORI, F. A.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Adesivos naturais e sintéticos em painéis compensados. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 1, p. 28-35, 2016. <http://dx.doi.org/10.15210/cmadv7i1.6341>

CLAURINDO, A. S. **Biocompósito hidrofóbico utilizando amido modificado e celulose**. 99 p. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Boletim** Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/estimativaafra-cultura.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

CORDEIRO, L. G. Caracterização do bagaço de malte oriundo de cervejarias. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 20-22, 2012.

CORDEIRO, L. M. **Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos**. 121 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2011.

COSTA, M. A.; PAULA, M. H.; MESQUITA, R. R. S. Composição química do RUC para a produção de painéis reconstituídos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 4, Santarém, 2019. **Anais** [...]. Santarém, 2019.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. **Materials Research**, v. 7, n. 3, p. 413-420, 2004.

FABRÍCIO, R. F.; MAHLMANN, C. M. Desenvolvimento de adesivo à base de amido de milho e de mandioca. **Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 1-12, 2014. <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v18i1.3836>

FARIA, D. L.; FURTINI, A. C.; FERREIRA, J. C.; OLIVEIRA, K. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Qualidade de painéis aglomerados produzidos com sabugo de milho. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, p. 1631-1639, 2018.

FARIA, W. S.; PROTÁSIO, T.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; ANDRADE, C. R.; JUNIOR, J. B. G. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 137-147, 2016.

FERREIRA, L. H.; RODRIGUES, A. M. G. D.; HARTWING, D. R.; DERISSO, C. R. Qualidade do leite e cola de caseína. **Química Nova na Escola**. p. 32-33. Disponível em: . Acesso em: nov. 2019.

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

FIORELLI, J.; LAHAR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; SAVASTANO JUNIOR, H.; ROSSIGNOLO, J. A. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Scientiarum Technology**, v. 33, n. 4, p. 401-406, 2011. <http://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9615>

GATANI, M. P.; FIORELLE, J.; MEDINA, J. C.; ARGUELLO, R.; RUIZ, A.; NASCIMENTO, M. F.; SAVASTANO JUNIOR, H. Viabilidade técnica de produção e propriedades de painéis de partículas de casca de amendoim. **Matéria**, v. 18, n. 2, p. 1286-1293, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200004>

GATTO, D. A.; SCARAVELLI, T. L.; STANGERLIN, D. M.; HASELEIN, C. R. Desempenho físico-mecânico de painéis fabricados com bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. **Cerne**, v. 13, n. 1, p. 57-63, 2007.

GIUDICE, C. A.; CANOSA, G. Flame-retardant systems based on alkoxyxilanes for wood protection. **IntechOpen**, p. 76-89, 2017. <http://doi.org/10.5772/64916>

HASELEIN, C. R.; CALEGARI, L.; ALBERTI, L. F.; MINELLO, L. A.; SILVA, P. A.; PINTOS, R. G. F. Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 81-88. 2002. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981703>

HURST, M. C.; WOLCOTT, M.; YADAMA, V. **Composite boards made with sorghum stalks and a thermoplastic binder and processes for making same**. Patent Application Publication. p. 1-7. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/df/72/7f1b07a27544f8/US20130089700A1.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório Anual IBÁ 2019**. São Paulo. 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020.

IWAKIRI, S.; CUNHA, A. B.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; GORNIK, E.; MENDES, L. M. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agraria**, v. 1, n. 1-2, p. 23-28, 2000.

IWAKIRI, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F Painéis de madeira aglomerada. *In*: IWAKIRI, S. (ed.). **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p.123-166.

IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; PUEHRINGER, C. A.; VENSON, I.; LARROCA, C. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 883-887, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600013>

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 125 p. 2000. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2000.

KNISS, D. D. C.; VIEIRA, H. C.; GAA, A. Z. N.; RICARDO, G. C.; BALDUINO, A.; CUNHA, A. B.; RIOS, P. D.; PEREIRA, G. F. Análise química do bagaço de cevada para produção de painéis aglomerados. I: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2, Belo Horizonte, 2015. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2015.

KUEHL, Y.; HENLEY, G.; YIPING, L. The climate change challenge and bamboo: mitigation and adaptation. **INBAR Working Paper**, n. 65, 2011.

LA, H.; ZHILIN, C.; FENG, F.; MIZI, F. Investigation of factory fire retardant treatment of *Eucalyptus* plywood. **Forest Products Journal Online**, v. 65, n. 7, p. 320-326, 2015.

LARANJEIRA, J. P. S. **Reacção ao fogo de madeira antiga protegida com revestimentos retardadores de combustão**. 176 p. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.

LOPES, G. C.; SANCHES, A. C. C.; TOLEDO, C. E. M.; ISLER, A. C.; MELLO, J. C. P. Determinação quantitativa de taninos em três espécies de *Stryphnodendron* por cromatografia líquida de alta eficiência. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 45, n. 1, p. 135-141, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1984-82502009000100017>

LOPEZ, Y. M.; PAES, J. B.; RODRÍGUEZ, E. M.; GUSTAVE, D.; GONÇALVES, F. G. Wood particleboards reinforced with thermoplastics to improve thickness swelling and mechanical properties. **Cerne**, v. 24, n. 4, p. 369-378, 2018. <http://doi.org/0.1590/01047760201824042582>

MACEDO, L. B.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CAVALHEIRO, R. S.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 674-679, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p674-679>

MACHADO, N. A. F.; ANDRADE, H. A. F.; FURTADO, M. B.; SERRANO, L. J. P.; PARENTE, M. O. M.; MATOS, R. R. S. S. Propriedades físico-mecânicas de painéis multicamadas produzidas com partículas de coco babaçu e *Pinus* sp. **Revista Agro Ambiente**, v. 11, n. 3, p. 191-199, 2017. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i3.4153>

MAURER, H. W. Starch in the Paper Industry. *In*: MAURER, H. W. **Chemistry and Technology**, 3. ed. Chapter 18, p. 658-698. 2009.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; SOUSA, A. P.; CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. **Ciência Rural**, v. 45, n. 1, p. 35-42, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20120970>

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MORI, F. A.; CÉSAR, A. A. S. Efeito da incorporação de casca de café nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 3, p. 610-617, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300012>

MINAS GERAIS (Estado). SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. SUBSECRETARIA DO AGRONEGÓCIO. Belo Horizonte, 2017. 88 p. Disponível em: http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Perfil/Mundial/perfil_mundial_out_2017.pdf. Acesso em: 11 mar. 2020.

MINUTTI, F. A. A. **Uso de pena de galinha na produção de painéis para construção civil**. 110 p. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2018.

MORI, F. A.; MORI, C. L. S. O.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; MELO, V. M. Influência do sulfito e hidróxido de sódio na quantificação em taninos da casca de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*). **Floresta e Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 86-92, 2003.

NASSER, S.M. **Painéis com partículas de madeira da espécie teca e casca de amendoim com adesivo à base de mamona**. 261p. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2019.

PONTO CIÊNCIA. **Cola de caseína**. p. 1-4. Disponível em: <http://projetoeduc.cecierj.edu.br/eja/recurso-multimedia-professor/quimica/novaeja/m4u4/13.experimento-cola.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

POPESCU, C. M.; PFRIEM, A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products - An overview. **Fire and Materials**, v. 44, n. 1, p. 100-111, 2020. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA. p. 1-35. Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

RAGHAVENDRA, S.; BALACHANDRASHETTY, P.; MUKUNDA, P. G.; SATHYANARAYANA, K. G. The effect of fiber length on tensile properties of epoxy resin composites reinforced by the fibers of banana. **International Journal of Engineering Research & Technology**, n. 1, p. 1-3, 2012.

ROHNI, S. N. **Properties of compressed banana fiber composite from agriculture waste using cold-setting adhesives**. University Malaysia Kelantan. Disponível em: https://www.academia.edu/6849897/PROPERTIES_OF_COMPRESSED_BANANA_FIBER_COMPOSITE_FROM_AGRICULTURE_WASTE_USING_COLD-SETTING_ADHESIVES?-source=swp_share. Acesso em: nov. 2019.

MARTINS, R. S. F. **Caracterização de painéis aglomerados produzidos com madeira de eucalipto e resíduos lignocelulósicos agroindustriais**. 78 p. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2016.

MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R.; ARPAÇ, Y.; ŞENTÜRK, Ü. Banana fibers - Variability and fracture behavior. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 3, n. 2, p. 39-45, 2008. <http://doi.org/10.1177/155892500800300207>

SANTOS, I. J.; COUTO, S. M.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem em camada fina do malte verde de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 3, n. 1, p. 53-59, 2001.

SCATOLINO, M. V.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Use of maize cob for production of particleboard. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 4, p. 330-337, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000400006>

SCHROEDER, H. A.; THOMPSON, G. E. Substituting phenol in adhesive with demethylated kraft lignin. *In*: INTERNATIONAL PARTICLEBOARDS/COMPOSITE MATERIALS PROCEEDINGS, 23, Washington, 1990. **Anais [...]**. Washington, 1990.

SON, D. W.; KANG, M. R.; KIM, J. I.; PARK, S. B. Fire performance of the wood treated with inorganic fire retardants. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 335-342, 2012. <http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2012.40.5.335>

STADLER, K.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N.; VANZETTO, S. C. Análise do processo produtivo e geração de resíduos em uma indústria de painéis compensados. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 6, n. 1, p. 45-53, 2009.

TINTI, V. P.; GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C.; VIEIRA, M. C.; LÓPEZ, Y. M. Propiedades físicas y densitometría de rayos X en tableros de residuos de madera. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, p. 71-81, 2018.

TISSERAT, B.; HWANG, H.; VAUGHN, S. F.; BERHOW, M. A.; PETERSEN, S. C.; JOSHEE, N.; VAIDYA, B. N.; HARRY-O'KURU, R. Fiberboard created using the natural adhesive properties of distillers dried grains with solubles. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2678-2701, 2018.

XU, H.; LUO, J.; GAO, Q.; ZHANG, S.; LI, J. Improved water resistance of soybean meal-based adhesive with SDS and PAM. **BioResources**, v. 9, n. 3, p. 4667-4678. 2014.

WANG, W.; ZAMMARANO, M.; SHIELDS, J. R.; KNOWLTON, E. D.; KIM, I.; GALES, J. A.; HOEHLER, M. S.; LI, J. A novel application of silicone-based flame-retardant adhesive in plywood. **Materials & design**, v. 189, p. 448-459, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.214>

WECHSLER, A.; RAMIREZ, M.; CROSKY, A.; ZAHARIA, M.; JONES, H.; BALLERINI, A.; NUNEZ, M.; SAHAJWALLA, V. Physical properties of furniture panels from macadamia shells. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 18, Jeju Island, 2011. **Anais** [...] Jeju Island, 2011.

WIEDMAN, G. A. **Fibra de coco e resinas de origem vegetal para produção de componentes de mobiliário e da construção civil**. 126 p. 2008. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002.

WILCZAK, L. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. 79 p. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção Civil) – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, 2014.



Tratamentos realizados na madeira para minimizar riscos de incêndios

Bárbara Maria Mateus Gonçalves

Leonor da Cunha Mastela

Fabricio Gomes Gonçalves

Ananias Francisco Dias Júnior

Wendel Sandro de Paula Andrade

INTRODUÇÃO

A segurança contra incêndio é de extrema importância para minimizar os riscos à vida. Tendo em vista as tragédias ocorridas nos últimos anos, os órgãos fiscalizadores em todo o mundo têm intensificado os trabalhos no sentido de regulamentação e controle de processos construtivos a fim de evitar tais sinistros. No Brasil, a combustibilidade da madeira e a insegurança diante de potenciais riscos relacionados a incêndios são consideradas restrições para a construção de edificações que utilizam esse material em sistemas estruturais. Isso se deve, principalmente, à falta de conhecimento sobre o comportamento da madeira em relação ao fogo e a consequente ação do calor (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Ao contrário do cenário brasileiro, países como Estados Unidos, Canadá e Japão utilizam amplamente a madeira em construções com processos com alto grau de industrialização e com excelentes resultados no que diz respeito ao comportamento térmico (MORIKAWA, 2006). Estratégias adotadas na elaboração dos projetos e definições de materiais construtivos podem influenciar os fatores de risco para incêndio. Para garantir as melhores estratégias de segurança a serem adotadas, faz-se necessário definir os procedimentos de acordo com a

utilização da edificação (OSTMAN, 2013). O conhecimento do material utilizado e de suas características permite que sejam elaborados projetos eficientes com técnicas construtivas eficazes e que, no caso da utilização da madeira, possam contar com tratamentos que minimizem os riscos de incêndio (SANTANA *et al.*, 2013).

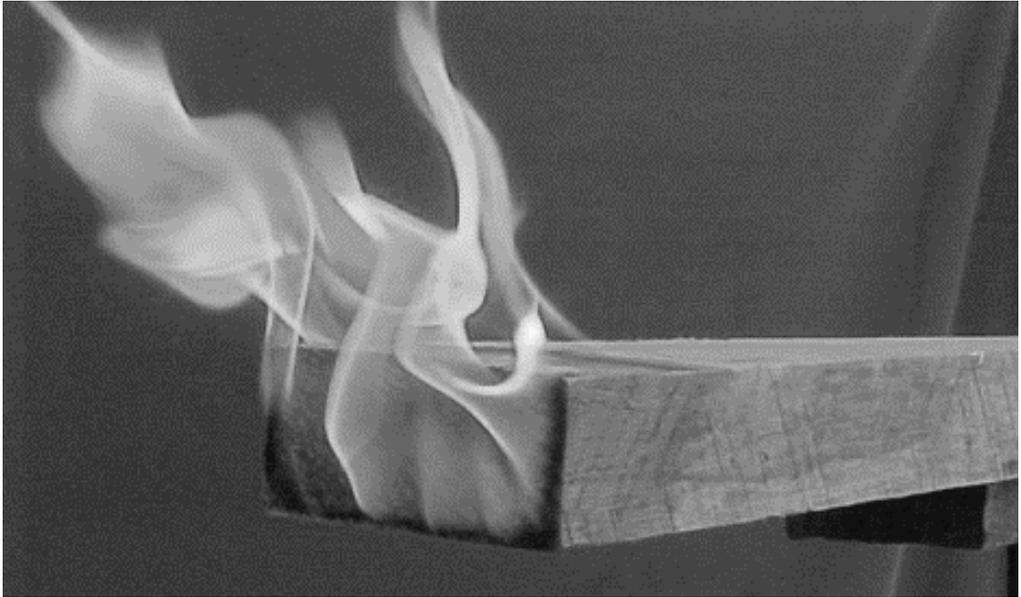
Segundo Pinto e Calil Junior (2006), uma estrutura é considerada segura contra incêndio nos casos em que esta apresenta grande probabilidade de resistir aos esforços quando submetida à ação do calor decorrente de elevadas temperaturas. Os tratamentos para minimizar os riscos de incêndio são uma alternativa para auxiliar na melhoria do sistema de segurança em relação ao fogo, permitindo a estrutura suportar elevadas temperaturas por um período maior.

Este capítulo tem como objetivo geral apresentar os principais tratamentos aplicados na madeira para minimizar os riscos de incêndio em construções. Neste contexto, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o comportamento da madeira diante da ação do calor, as propriedades que influenciam a resistência à combustão e os principais tratamentos a serem aplicados para retardar esse processo, além de produtos disponíveis no mercado brasileiro. Informações complementares sobre este também poderão ser buscadas na literatura, a exemplo de Popescu e Pfriem (2020), os quais realizaram uma vasta revisão sobre o tema.

1 COMPORTAMENTO DA MADEIRA SOB AÇÃO DO CALOR

Os materiais construtivos têm reações diversas quando submetidos a temperaturas elevadas. O concreto, amplamente utilizado na construção civil, sofre com a diminuição das propriedades mecânicas, levando ao fenômeno denominado “deslocamento”, até o colapso da estrutura. Já o aço perde a rigidez e a resistência, ocasionando severas deformações (PIERIN; SILVA; ROVERE, 2015). De forma geral, a madeira apresenta boa resistência ao fogo quando comparada aos principais materiais construtivos. Dentre suas particularidades, destaca-se que, em condições habituais, a madeira quando exposta à ação do calor não sofre queima inicialmente (WHITE; DIETENBERGER, 2010). A primeira reação que ocorre nesse caso é a decomposição do material em gases voláteis, que se convertem em chamas (Figura 1), as quais aquecem a madeira e causam a liberação de outros gases inflamáveis, o que leva a um processo em cadeia que alimenta a combustão (PINTO, 2001).

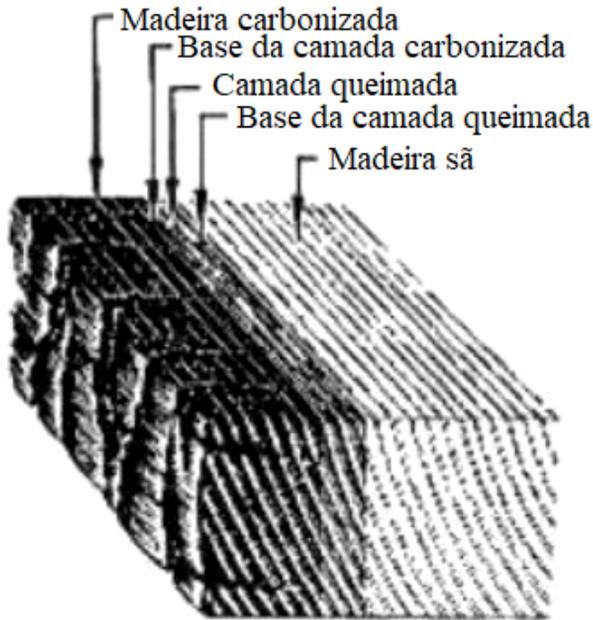
Figura 1: Início da combustão em peça de madeira



Fonte: PINTO (2001).

As consequências do fogo para a madeira são a diminuição das propriedades mecânicas, entre elas a resistência e a rigidez, além de redução da seção do elemento pela formação do carvão vegetal. Estas alterações podem ocasionar instabilidade na estrutura e, em níveis mais avançados, levá-la ao colapso. Deve-se observar que externamente o carvão originado em um primeiro momento, em um processo de combustão, funciona como isolante térmico e tem capacidade de retardar o fluxo de calor para o interior da seção da peça de madeira (Figura 2). Neste contexto, a resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira se deve à camada externa protetora que sofreu carbonização e às dimensões restantes da seção interior residual (SCHIMD *et al.*, 2015).

Figura 2: Madeira em processo de combustão



Fonte: Adaptada de White e Dietsberger (2010).

Depois da fase de ignição, a carga térmica existente no interior do edifício tem grande importância na propagação do incêndio. Como carga térmica podem ser citados o mobiliário existente, os revestimentos de paredes e tetos, que são elementos relevantes na eclosão e desenvolvimento do fogo (ANASTÁCIO, 2010). Para a avaliação e elaboração de projetos de estruturas de madeira em situações de incêndio, é importante o conhecimento das propriedades térmicas e mecânicas, dentre estas a resistência e a rigidez apresentadas pelo material.

1.1 Degradação térmica dos principais componentes químicos da madeira

A degradação térmica dos principais componentes químicos ocorre à medida que a madeira atinge temperaturas elevadas, o que afeta o desempenho estrutural da madeira. As modificações que podem ocorrer dependem da temperatura alcançada e do tempo de exposição. As primeiras alterações ocorrem em torno de 50 °C. Em um processo lento de aquecimento, denominado de “pirólise lenta”, é observada uma perda de massa uniforme do material (HASBURG; DIETENBERG, 2016).

De 100 °C a 200 °C, a madeira, além de liberar vapor d'água, libera gases não combustíveis, como gás carbônico (CO_2), ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) e ácido fórmico (CH_2O_2). As reações exotérmicas começam no intervalo de 150 °C e 160 °C. Em temperaturas superiores a 200 °C, ocorrem perda acelerada de massa e diminuição da resistência mecânica. A degradação térmica da celulose ocorre em temperaturas que variam de 200 °C a 280 °C, levando, progressivamente, à despolimerização e desidratação (BARTLETT *et al.*, 2017).

Em temperaturas acima de 280 °C até 500 °C, ocorre a volatilização de diversos componentes químicos, com liberação de gases ricos em gás carbônico (CO_2) e vapor d'água, que têm capacidade de manter a chama acesa. Na pirólise, também denominada de “destilação seca de madeira”, os gases rapidamente se tornam combustíveis. Dentre os vários fenômenos que ocorrem na pirólise, observa-se a eliminação de componentes voláteis e a concentração de carbono no carvão gerado no processo. A maior proporção de carvão retarda a penetração do calor e adia a chegada do ponto exotérmico para as camadas internas da madeira (PINTO; CALIL JUNIOR, 2006; MOHAN *et al.*, 2006; DIAS JUNIOR *et al.*, 2018).

O carvão é consumido a 500 °C e as temperatura internas permanecem constantes. Quando a temperatura da superfície atinge aproximadamente 1000 °C, o carbono é rapidamente consumido na superfície e as regiões de degradação penetram na madeira. Nesta fase, as chamas se extinguem e ocorre a queima do monóxido de carbono e do hidrogênio. Esta fase é chamada de “combustão incandescente” (FIGUEROA; MORAES, 2009).

A degradação térmica da hemicelulose ocorre de 160 °C a 260 °C. A lignina é o componente mais resistente da madeira. Dessa forma, sua degradação térmica ocorre entre 225 °C e 450 °C. Em temperaturas de até 600 °C, a perda de massa atinge mais de 80%, 95% e 60% para a celulose, hemicelulose e lignina, respectivamente (POLETTTO; ZATTERA; SANTANA, 2012; SANCHEZ-SILVA *et al.*, 2012).

1.2 Taxa de carbonização

A taxa de carbonização pode ser definida como a taxa de fornecimento de calor em relação ao tempo, pela qual a madeira é convertida em carvão vegetal e tem a função de indicar a redução da seção transversal dos elementos estruturais. A determinação deste parâmetro é feita por meio de ensaios, empregando-se peças em tamanho real submetidas ao calor (FIGUEROA; MORAES, 2009). Taxas mais rápidas implicam um maior fornecimento de calor por unidade de tempo, e neste caso existem fortes implicações para o carvão vegetal formado, assim como o líquido pirolenhoso que pode ser condensado e para os gases não condensáveis. Taxas elevadas, em madeiras de baixa permeabilidade, resultam em um carvão vegetal com fissuras e rachas, diminuindo sua resistência mecânica. Por outro lado, taxas mais lentas favorecem uma melhor transformação do carvão, porém, com um maior tempo de obtenção.

2 RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO CALOR

A resistência da madeira ao calor pode ser definida como a capacidade na qual a madeira resiste a um incêndio totalmente desenvolvido, sem ocorrência do colapso da estrutura, numa escala de tempo (ANASTÁCIO, 2010). Segundo White e Dietenberger (2010), a resistência ao fogo de um elemento ou estrutura de madeira depende da presença de uma camada protetora ou espessura da camada carbonizada da madeira e das dimensões da seção residual, as quais dependem da taxa de carbonização da espécie de madeira usada.

No que diz respeito às espécies de madeira, as propriedades físicas influenciam diretamente na resistência ao fogo, em particular quando se trata de densidade, teor de umidade, características anatômicas e composição química (WHITE; DIETENBERGER, 2010). Outras propriedades térmicas relevantes são a condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e expansão térmica. Em madeiras que apresentam maiores densidades, o início do incêndio e a combustão ocorrem mais lentamente (SANCHÉZ, 2001).

Em madeiras com alta umidade, o processo de combustão é mais lento. Isto se deve ao fato de que a umidade diminui a temperatura na área de combustão, promovendo o resfriamento da madeira, já que esta cede energia para a evaporação da água e assim reduz a quantidade de oxigênio (PINTO *et al.*, 2008). Quanto às características anatômicas, pode-se afirmar que a carbonização na direção longitudinal da grã é duas vezes superior à ocorrida na direção transversal. Além disso, observa-se que a composição química afeta a espessura relativa da camada de carvão (WHITE; DIETENBERGER, 2010). Nesse quesito, a porosidade da madeira deve ser mencionada, pois pode interferir na permeabilidade de carga de calor, em que madeiras mais porosas permitem um melhor fluxo e, conseqüentemente, maior taxa de transferência de calor entre as peças.

Em termos construtivos, a resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira deve atender a alguns requisitos de desempenho, quais sejam: capacidade de carga, integridade e isolamento, conforme apresentado na Figura 3 (OSTMAN, 2013). A capacidade de carga consiste na aptidão do elemento construtivo em suportar, durante um período e sem perda da estabilidade estrutural, a exposição ao fogo. A integridade é a capacidade do elemento de construção, com função separadora, de limitar a passagem das chamas e a transmissão dos gases para o lado oposto, como resultado da penetração destes. O isolamento é a capacidade do elemento de estrutura de resistir ao fogo aplicado em apenas um lado, sem transferir o fogo para o lado que não está exposto, como resultado da transferência significativa de calor do lado aquecido para o lado não aquecido (SANCHEZ, 2001; IZYDORCZYK; SEDLAK; SULIK, 2014).

Figura 3: Critérios de desempenho para resistência ao fogo



Fonte: Adaptado de Ostman (2013).

Além dos fatores já mencionados anteriormente que contribuem para que o incêndio não seja propagado, outros fatores referentes ao meio externo também devem ser levados em consideração, como a temperatura do fogo, o tempo de exposição da peça à queima e a ventilação do ambiente (WHITE; DIETENBERGER, 2010).

2.1 Tratamentos químicos na madeira para proteção contra incêndio

A proteção contra incêndios pode ser dada por meio de tratamentos com substâncias adicionadas ou tratamentos aplicados a um material destinado a retardar a ignição ou a reduzir ou atrasar o gradiente de desenvolvimento da combustão (ANASTÁCIO, 2010).

Sendo assim, os tratamentos químicos aplicados à madeira têm como objetivo prevenir a ignição do material combustível, bem como a propagação do fogo, de forma a controlar a contribuição da madeira como fonte de calor.

Os tratamentos de proteção a incêndio podem ser divididos em:

1 - Processos que utilizam substâncias incorporadas aos produtos derivados de madeira durante sua fabricação;

2 - A introdução de substâncias por meio de impregnação em autoclave, após a fabricação, que pode ser aplicada para madeira maciça e seus derivados;

3 - A aplicação superficial de produtos, como tintas e vernizes, em peças de madeira em serviço.

A principal característica dos produtos ignífugos é o retardo do ponto de inflamação da madeira em situações de incêndio. Esses materiais em contato com o calor se fundem formando uma camada protetora que recobre a superfície da madeira, evitando, assim, o início da combustão pelo bloqueio do acesso da superfície com o ar e o escape de produtos voláteis de pirólise. Os produtos ignífugos são classificados em intumescentes e não intumescentes, e geralmente apresentam em sua composição compostos à base de fósforo, nitrogênio, boro e silício (LEVAN; WINANDY, 1990).

Os produtos intumescentes são comumente comercializados como tintas e vernizes, que dão um acabamento como uma película ao serem aplicados na superfície da madeira. Esses produtos, quando expostos a elevadas temperaturas, se expandem consideravelmente formando uma camada termicamente isolante que inibe a ação do fogo (PURI; KHANNA, 2017).

Uma restrição com relação a sua utilização é que esses materiais devem ser aplicados em ambientes internos, pois eles possuem caráter higroscópico, ou seja, possuem elevada capacidade de absorção e acabam perdendo suas propriedades. Caso os produtos intumescentes sejam aplicados em locais sujeitos a abrasão e desgastes, deve-se garantir uma camada suficiente para não prejudicar a eficácia do tratamento. Os produtos não intumescentes são aqueles que formam uma camada vítrea que impede a entrada de oxigênio e a liberação de gases inflamáveis (EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS, 2012).

A seguir são apresentados os principais tratamentos empregados na madeira para minimizar o risco de incêndio, classificados de acordo com a forma de aplicação.

2.1.1 Impregnação

No processo de impregnação, um produto em forma líquida ou em pasta é aplicado a um substrato, e penetra abaixo da superfície. Ao secar ou curar, deposita substâncias que conferem propriedades retardantes de fogo ao substrato (EOTA, 2012). Este processo de tratamento deve ser feito antes da instalação das peças de madeira. O solvente utilizado no tratamento por impregnação é a água. Entretanto, segundo Anastácio (2010), existem três categorias de produtos que podem ser utilizadas de acordo com a aplicação desejada, quais sejam:

I – Aqueles baseados em sais simples, que podem ser aplicados para ambientes internos, por serem suscetíveis à umidade;

II – Produtos resistentes à umidade, que podem ser usados em ambientes internos e externos, desde que, neste último caso, não estejam em contato direto com intempéries;

III – Quando aplicadas resinas poliméricas resistentes à água que podem ser utilizadas em ambientes internos e externos.

Os principais sais aplicados no tratamento por impregnação são: bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), fosfato de amônia ($(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$), ácido bórico (H_3BO_3), fosfato de sódio (NaH_2PO_4), ácido fosfórico (H_3PO_4), sulfato de amônia ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) e os cloretos de zinco (ZnCl_2) e magnésio (MgCl_2). A aplicação deste método é feita, usualmente, por autoclave. Dessa forma, este tipo de tratamento garante um amplo controle do processo da madeira tratada. Além disso, ao tratamento feito na madeira para aumentar a resistência ao calor, podem ser acrescentados produtos inseticidas e fungicidas para a proteção do produto contra organismos xilófagos (CAVDAR; MENGELÖGLU; KARAKUS, 2015).

Dentre as principais desvantagens do uso da madeira que passa por esse tipo de tratamento estão o alto custo do tratamento e as restrições de uso no ambiente, dependendo do tipo de sais aplicados, que podem ser lixiviados (PINTO, 2001). Além disso, alguns dos produtos aplicados podem conter sais inorgânicos que aumentam a taxa de corrosão dos metais utilizados para ligação das peças de madeira (WHITE; DIETENBERGER, 2010).

Este tipo de tratamento não é recomendado para madeira laminada colada (MLC) e vigas pré-fabricadas, pois pode ocasionar a diminuição da resistência e durabilidade da linha de cola. Em contrapartida, o tratamento por impregnação é utilizado na fabricação de compensados. O compensado que passa por este tipo de tratamento apresenta o mesmo risco de incêndio que o gesso acartonado (WILLIAMSON, 2002).

2.1.2 Recobrimento

O recobrimento consiste na aplicação de uma camada de verniz, tinta ou emulsão na superfície da madeira, a qual tem a função de impedir que o material em contato com as chamas atinja a temperatura de ignição e aumente a velocidade de propagação do calor. A aplicação pode ser feita por pincelamento, rolo ou aspersão. Existe uma grande variedade de produtos que podem ser aplicados pelo processo de tratamento conhecido como recobrimento. Os produtos intumescentes promovem um revestimento da peça, o qual é formulado especificamente para promover uma reação química após o aquecimento, de forma a transformar o produto numa espuma expandida que proteja as superfícies do fogo (EOTA, 2012).

Os produtos não intumescentes são aqueles desenvolvidos com materiais que, quando submetidos a elevadas temperaturas produzidas pelo fogo, geram uma interface química isolante (SANCHÉZ, 2001). O recobrimento possui como vantagens a possibilidade de aplicação em peças já em utilização, menor custo, maior efeito no retardamento da propagação da chama, e alguns produtos possuem ainda efeito decorativo. Entretanto, não há controle

de qualidade quando o tratamento não é feito em fábrica, e o produto pode ser, em muitos casos, facilmente removível por abrasão (PINTO, 2001).

2.2 Tratamentos aplicados em derivados de madeira

A inflamabilidade dos derivados de madeira é uma das principais características que limitam sua utilização na construção civil. Tratamentos retardantes de incêndio podem ser aplicados nos derivados de madeira como medida preventiva de forma a atender às normas de segurança contra incêndio vigentes. Além disso, o estudo sobre tratamento retardador de chama de derivados de madeira trouxe considerável interesse industrial e científico nos últimos anos. Basicamente, os mesmos métodos aplicados para o tratamento de prevenção de incêndio de madeira podem ser aplicados nos seus derivados (PEDIEU *et al.*, 2012; TANG *et al.*, 2008).

Existem três métodos de aplicação de retardantes de chama para os aglomerados, quais sejam: aplicação de produtos retardantes durante o processo de produção, adição de partículas minerais e aplicação de ligantes não inflamáveis. O método mais comum para melhorar o desempenho do painel aglomerado à ação do fogo é o tratamento químico com retardadores de chama. A aplicação dos métodos pode ser individual ou conjunta. A adição de partículas minerais tem como função diminuir a condutividade térmica, o que garante maior resistência ao fogo (KOZLOWSKI *et al.*, 1999; TANG *et al.*, 2008).

Dentre os produtos desenvolvidos aplicados nos aglomerados com a função de retardante de chamas podem ser citados: o ácido bórico (H_3BO_3), sulfito de sódio (Na_2SO_3), fosfato dissódico (Na_2HPO_4), melamina ($C_3H_6N_6$), entre outros. Estes compostos inorgânicos apresentam como desvantagem uma elevada quantidade de aditivo, o que torna os painéis de partículas mais suscetíveis à umidade (TANG *et al.*, 2008). Os compensados possuem aplicação limitada por serem inflamáveis. Dessa forma, estudos sobre a aplicação de tratamentos antichamas têm avançado. O tratamento pode ser aplicado no produto acabado ou durante o processo de produção do compensado. Entretanto, os tratamentos retardantes de chama podem diminuir a resistência da linha de cola (CHENG; WANG, 2011).

Para tratamentos antichamas de compensados, podem ser usados produtos como: bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), ácido bórico (H_3BO_3), fosfato monoamônio ($NH_4H_2PO_4$) e fosfato diamônio ($(NH_4)_2HPO_4$). Segundo Ayrilmis *et al.* (2006), a aplicação destes compostos pode influenciar negativamente a rugosidade dos painéis e, conseqüentemente, a resistência da linha de cola. De forma geral, os compostos contendo boro são considerados com melhor eficácia para tratamentos retardantes de chama, pois possuem pH neutro, funcionam como preservantes ao ataque de organismos xilófagos e causam menor impacto sobre as propriedades mecânicas dos compensados. Em geral, produtos que apresentam

em sua constituição fosfatos monoamônio e diamônio são menos eficazes no que diz respeito à deterioração (KARTAL; AYRILMIS; IMAMURA, 2007).

No caso do painel OSB (*Oriented Strand Board*), que possui função estrutural, é possível melhorar significativamente o desempenho em situações de incêndio aplicando-se tratamento químico e, assim, ampliar as opções para sua utilização. Produtos à base de fósforos e compostos de boro são comumente adotados em tratamentos retardantes de chama para painéis OSB. Os compostos de boro são considerados eficazes por não interferirem nas propriedades mecânicas dos painéis quando comparados a outros produtos químicos retardadores de chama (AYRILMIS; CANDAN; WHITE, 2007).

2.3 Escolha do tratamento a ser aplicado

Existe uma gama de produtos no mercado que podem ser aplicados na madeira e nos seus derivados no tratamento para a proteção contra incêndios. A escolha do produto adequado está em função da aplicação das peças, quais sejam: uso estrutural, forro, *deck*, vedação, decoração, entre outros. O retardantes de fogo frequentemente usados na madeira e seus produtos reconstituídos podem ser adicionados ao adesivo no momento da produção dos painéis (uso interno) e ainda como acabamento externo, no caso de madeira bruta para uso em salas, auditórios e corredores onde os códigos exigem materiais com baixa inflamabilidade da superfície (WHITE; DIETENBERGER, 2010).

A madeira tratada com retardante pode ser utilizada para fins especiais, como andaimes de madeira e para caixilho, trilhos e degraus das portas corta-fogo. Os tratamentos retardadores de chama externos devem ser especificados sempre que a madeira for exposta às condições climáticas externas. Na definição do tratamento, deve-se considerar se o produto possui constituintes que possam ocasionar corrosão nos conectores (CARLSON, 2002). O tratamento retardador de chama geralmente resulta em reduções nas propriedades mecânicas da madeira. Para aplicações estruturais, torna-se necessário obter informações do fornecedor ou fabricante sobre o produto de madeira tratado com retardante de fogo. Isso inclui os fatores que podem ocasionar modificação do projeto para as propriedades de resistência inicial da madeira tratada, incluindo a resistência das conexões (WHITE; DIETENBERGER, 2010).

De forma geral, existem dois tipos de tintas retardantes de fogo, sendo estas:

a) Pigmentada, projetada como um acabamento semelhante aos sistemas de pintura comuns;

b) Sem pigmento, que possui acabamento claro, e pode ser considerada como um verniz, usada para painéis de alta aparência, como madeiras de lei, que são aquelas que possuem alta densidade e baixa suscetibilidade ao ataque de organismos xilófagos (cupins, fungos e bactérias).

A maioria das tintas com pigmentação intumesce ou incha a uma espessa camada isolante quando exposta a temperaturas que aumentam rapidamente. Esses tipos de tintas são fabricados considerando-se suas propriedades retardantes de fogo e não possuem grande variedade de cores e efeitos decorativos, como nos sistemas de acabamento convencionais. Algumas dessas tintas são aplicáveis em ambientes externos, e a maioria é projetada apenas para uso interno. Acabamentos em verniz retardadores de chama podem desenvolver oleosidade quando submetidos a alta umidade ou exposição direta ao clima durante a construção. Para auxiliar na definição do produto a ser aplicado nos diversos elementos de madeira, o **Quadro 1** apresenta uma comparação de duas categorias de produtos (intumescentes e ignífugos), considerando-se os principais parâmetros a serem analisados, tais como o acabamento, a espessura da camada, a aplicação, a duração e as limitações de cada um.

Quadro 1: Comparação entre os produtos ignífugos e intumescentes.

Parâmetros	Intumescentes	Ignífugos
Acabamento	Decorativo	Aspecto natural da madeira
Espessura da camada	Espessa	Fina
Aplicação	Interior ou exterior	Interior
Duração	Depende do produto e das condições de aplicação	Depende do produto e das condições de aplicação (normalmente 5 anos)
Limitações	<ul style="list-style-type: none"> - Espessura mínima de eficácia; - Sensível à água; - Maior cuidado na aplicação; - Descoloração; - Quando têm resinas na sua composição, liberam gases tóxicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensível à umidade; - Redução de durabilidade; - Sujeito a corrosão; - Diminuição das propriedades mecânicas; - Crescimento de organismos xilófagos

Fonte: Adaptado de Anastácio (2010).

3 PRODUTOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DA MADEIRA

Existe uma variedade de produtos para o tratamento da madeira para segurança contra incêndios. Torna-se necessário conhecer as condições em que está inserido o elemento de madeira, conhecer os produtos que podem ser aplicados e, por fim, aplicar estes produtos consultando o fabricante e respeitando as instruções dadas em suas fichas técnicas. A seguir, são apresentados alguns produtos disponíveis no mercado brasileiro.

3.1 Verniz CKC-VR®

O CKC-VR® (ES/VFR/C) é um verniz retardante de chamas à base de água que pode ser aplicado em ambiente interno e externo, em particular em locais que exigem resistência à abrasão. O produto foi desenvolvido na Inglaterra e atende às principais normas internacionais para proteção contra incêndio. Para a sua comercialização no Brasil, o CKC-VR® passou por ensaios no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (CKC DO BRASIL, 2019a). Aprovado como Classe II-A da IT-10, pelas normas NBR-9442 (ABNT, 1986) – Determinação do Índice de Propagação Superficial de Chamas (painel radiante), NBR 8.660 (ABNT, 2013) – Densidade Fluxo Crítico Médio de Energia Radiante para pisos ($CHT > 8 \text{kw/m}^2$) e ASTM E-662 (ASTM, 2019) - Densidade Óptica de Fumaça ($D_m < 450$).

O verniz pode ser aplicado em diversas superfícies, como pisos, rodapés, mezaninos, forros, *decks*, divisórias, móveis, entre outras. O produto possui acabamento fosco e transparente. A manutenção do verniz em locais com baixa abrasão deve ser feita em ciclos de cinco anos para áreas internas e três anos para áreas externas. Para locais com alta abrasão, a periodicidade para áreas internas e externas é de três a dois anos, respectivamente.

3.2 Tinta CKC-268®

A tinta CKC-268® possui função antichama, e deve ser usada exclusivamente em madeiras. Pode ser aplicada em portas, divisórias, escadas, forros, telhados, pilares e vigas, entre outros. O CKC-268 retarda a propagação do fogo por meio da expansão da tinta em até 60 vezes a sua espessura, formando uma camada protetora de carbono que inibe a emissão de gases tóxicos, evitando a propagação do fogo (CKC DO BRASIL, 2019b).

3.3 Antichamas

O CKC-2020® é um retardante antichama específico para madeira crua, como construções em madeira, canteiros de obra, divisórias, forros, telhados, revestimentos acústicos, quiosques, portas, entre outros. A manutenção do produto em locais com baixa abrasão deve ser feita em ciclos de 10 anos para áreas internas e 3 anos para áreas externas. Para locais com alta abrasão, a periodicidade para áreas internas e externas é de 5 e 2 anos, respectivamente (CKC DO BRASIL, 2019c).

O SHX-9020 é um antichamas à base de água de aparência incolor, testado pelo IPT. O produto apresenta em sua composição uma mistura de polímeros e compostos fosfatados.

O SHE-6020 é um verniz ignifugante à base de água que pode ser aplicado em pisos de áreas internas e externas (SANTA HELENA, 2019).

4 NORMATIZAÇÃO APLICADA À SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS EM MADEIRA

A segurança contra incêndio deve considerar prevenção, contenção, detecção e evacuação. A prevenção de incêndio visa a evitar a ignição de materiais combustíveis e ao controle da fonte de calor. Para tanto, torna-se necessária a elaboração de projeto, instalação ou construção adequada e manutenção do edifício e de seu conteúdo. A contenção de um incêndio depende de configurações de projetos que limitem a propagação das chamas e possam contê-las no compartimento de origem. A detecção precoce é essencial para garantir que os usuários tenham tempo adequado para a evacuação (ALVAREZ *et al.*, 2013; WHITE; DIETENBERGER, 2010).

As normas regulamentadoras relacionadas à segurança contra incêndio tratam de requisitos de material e requisitos de construção. Os requisitos de material contemplam propriedades como combustibilidade, propagação de chamas e resistência ao fogo. Os requisitos de construção compreendem limitações de dimensões, como área e altura, dispositivos corta-fogo, portas e outras saídas, aspersores automáticos e detectores de incêndio (WHITE; DIETENBERGER, 2010). Dessa forma, podem-se aplicar as normas nacionais e internacionais vigentes que tratam de segurança contra incêndios para edificações que contenham peças de madeira e seus derivados. No que diz respeito à regulamentação no Brasil, as normas sobre o assunto são elaboradas pelos estados, possuindo especificações distintas. Apesar disso, a NBR 14.432 (ABNT, 2001) trata das exigências de projeto de edificações, as quais os elementos estruturais e de compartimento devem atender a situação de incêndio com o objetivo de evitar o colapso estrutural (ABNT, 2001).

A NBR 14.432 (ABNT, 2001) estabelece critérios de resistência ao fogo para elementos construtivos baseando-se num incêndio-padrão. Estes critérios consideram fatores como: tipo de ocupação, área, profundidade do subsolo, altura da edificação e facilidade de acesso para o combate ao incêndio. A classificação das edificações leva em consideração o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) (ABNT, 2001).

O Eurocode 5 (Parte 1-2: 2004) trata de projetos de estruturas de madeira em situações de incêndio e tem como objetivos gerais limitar os riscos com relação ao indivíduo, à sociedade, aos locais próximos e, também, à edificação diretamente exposta ao incêndio. A norma estabelece os seguintes requisitos básicos para a elaboração de projetos que atendam às especificações de segurança a incêndio (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004):

1. A estrutura deve possuir resistência ao fogo por um período especificado;
2. A geração e propagação de fogo e fumaça dentro das edificações é limitada;

3. A propagação do fogo para edificações próximas é limitada;
4. Os ocupantes podem deixar as edificações ou podem ser resgatados por outros meios;
5. A segurança das equipes de resgate é levada em consideração.

A resistência da madeira ao calor do fogo pode ser calculada utilizando-se um conjunto de especificações por meio de métodos simplificados apresentados na norma, bem como métodos de cálculo avançados, que têm como objetivo a determinação da resistência mecânica de cada elemento construtivo (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). Deve-se observar que esta norma apresenta como diferencial especificações de projeto de segurança contra incêndios específicos para madeira, enquanto a norma brasileira é mais abrangente.

Algumas normas internacionais apresentam diretrizes para ensaios de resistência ao fogo, combustibilidade e poder calorífico. A ASTM E119 (ASTM, 2019) trata de testes de resistência ao fogo para construções e materiais em geral. O objetivo é que as propriedades de resistência ao fogo de materiais e dos elementos estruturais sejam avaliadas em situações de exposição ao incêndio. Para isso, o ensaio a ser realizado possui um padrão de exposição ao fogo predefinido, de forma avaliar o desempenho do material ou estrutura. O desempenho é definido como o período de resistência à exposição-padrão decorrido antes que o primeiro ponto crítico no comportamento seja observado (ASTM, 2019a).

Os ensaios apresentados na ASTM E119 (ASTM, 2019) têm como objetivo avaliar a duração pela qual os elementos construtivos contêm um incêndio, mantêm sua integridade estrutural ou exibem as duas propriedades durante uma exposição ao fogo controlada (ASTM, 2019a). A ASTM E84 (ASTM, 2019) avalia o comportamento de superfícies de materiais de construção quando submetidas ao fogo, sendo possível aplicar os ensaios propostos para a madeira. O objetivo principal do ensaio apresentado na norma é determinar o comportamento relativo à queima do material, observando-se a propagação da chama pela amostra. Dessa forma, o ensaio proposto fornece um índice de propagação de chama do material (ASTM, 2019b).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração de projeto e a execução de edificações exigem que sejam definidos materiais e estruturas que possuam resistência e segurança a incêndio. Para tanto, as edificações expostas ao fogo devem apresentar a capacidade de resistir a um incêndio, denominado padrão, por um período, sem ocorrência do colapso estrutural.

O tempo de resistência ao fogo é determinado por normas, as quais podem ser adotadas para o cálculo de estruturas e a definição de materiais adequados visando à segurança contra incêndio. Além disso, as normas regulamentadoras vigentes apresentam requisitos de projetos que devem ser adotados para limitar a geração e propagação do fogo e dos gases e permitir o combate ao incêndio, evitando o colapso da estrutura e garantindo a proteção dos indivíduos e edificações vizinhas.

Sendo a madeira um material comumente empregado em elementos construtivos de uma edificação e ainda podendo ser utilizada como elemento estrutural, torna-se essencial proceder aos estudos de reação e resistência ao fogo para este material. Dentre os objetivos a serem alcançados nos projetos de segurança e combate a incêndio, consideram-se como essenciais a limitação da propagação das chamas e gases e o retardamento das chamas para permitir a evacuação e o combate ao incêndio. Os tratamentos retardantes de chama para madeira são alternativas eficazes para atingir estes objetivos.

Deve-se observar que estes tratamentos empregados na madeira não impedem a propagação do incêndio e a decomposição do material. Entretanto, permitem que a madeira tenha maior resistência ao fogo e garantem a diminuição de sua inflamabilidade.

Em geral, os tratamentos de proteção a incêndio para madeira podem ser feitos por impregnação ou por recobrimento. Além disso, os produtos retardantes de chama podem ser aplicados durante a fabricação das peças. A escolha do melhor método a ser empregado depende da aplicação do elemento construtivo e deve considerar características como o ambiente (externo ou interno), uso decorativo, pisos, forros, vedação, uso estrutural, entre outras. Deve-se observar, ainda, que alguns tratamentos possuem custos mais elevados. Existe uma variedade de produtos no mercado, como tintas e vernizes, e sua aplicação deve ser feita após consulta à ficha técnica, e, se necessário, ao fornecedor ou fabricante.

Deve-se observar que os tratamentos retardantes de chamas podem ser aplicados também para os derivados de madeira, como aglomerados, compensados, OSB, entre outros. Tal fato permite ampliar a gama de aplicações destes elementos construtivos.

Diante do exposto, a aplicação dos tratamentos de segurança contra incêndios disponíveis para a madeira e seus derivados apresenta-se como uma alternativa eficiente para garantir a resistência ao fogo do material, permitindo seu emprego como elemento construtivo ou estrutural na construção civil de forma a atender às normas vigentes para combate e proteção contra incêndio.

Referências

ALVAREZ, A.; MEA CHAM, B. J.; DEMBSEY, N. A.; THOMAS, J. R. Twenty years of performance-based fire protection design: challenges faced and a look ahead. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 23, n. 4, p. 249-276, 2013. <http://doi.org/10.1177/1042391513484911>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119-19**: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, PA. 2019. 37 p. doi: <https://doi.org/10.1520/E0119-19>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E84-19**: Standard test method for surface burning characteristics of building materials. West Conshohocken, PA. 2019. 26 p. doi: <https://doi.org/10.1520/E0084-19>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-662-19**: Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials. West Conshohocken, PA. 2019. 26 p. doi: <https://doi.org/10.1520/E0662-19>

ANASTÁCIO, R. S. A. **Especificação de protecção fogo para estruturas de madeira**. 118 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~jmfaria/TesesOrientadas/MIEC/RicardoAnastaciopdf/Especifica_ProtecFogo_Madeira.pdf. Acesso em: 10 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

AYRILMIS, N.; CANDAN, Z.; WHITE, R. Physical, mechanical, and fire properties of oriented strandboard with fire retardant treated veneers. **Holz Roh Werkst**, v. 65, n. 6, p. 449-458, 2007. <http://doi.org/10.1007/s00107-007-0195-3>

AYRILMIS, N.; KORKUT, S.; TANRITANIR, E.; WINANDY, J. E.; HIZIROGLU, S. Effect of various fire retardants on surface roughness of plywood. **Building and Environment**, v. 41, n. 7, p.887-892, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.011>

BARTLETT, A. I.; RORY, M. H.; HIDALGO, J. P.; SANTAMARIA, S.; WIESNER, F.; BISBY, L. A.; DEENY, S.; LANE, B. Auto-extinction of engineered timber: Application to compartment fires with exposed timber surfaces. **Fire Safety Journal**, v. 9, p. 407-413, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.050>

CARLSON, R. Treatments and finishes for wood. *In*: **APA Engineered Wood Handbook**. Williamson, T.G. (org.), Chapter 9, McGraw-Hill, New York, p. 19-38, 2002.

CAVDAR, A. D.; MENGELOGLU, F.; KARAKUS, K. Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites. **Measurement**, v. 60, p. 6-12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078>

CHENG, R. X.; WANG, Q. W. The influence of FRW-1 fire retardant treatment on the bonding of plywood, full terms & conditions of access and use can be found. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 25, n. 14, p. 1715-1724, 2011. <http://doi.org/10.1163/016942410X54910.1163/016942410X549951951>

CKC DO BRASIL. **CKC-VR®** - Verniz retardante para madeira. Disponível em: <https://www.ckc.com.br/produtos-principal/21-ckc-vr-verniz-retardante.html>. Acesso em: 21 out. 2019.

CKC DO BRASIL. **CKC-268®** - Tinta antichamas para madeira. Disponível em: <https://www.ckc.com.br/index.php/produtos-principal/143-ckc-268-tinta-antichamas-madeira.html>. Acesso em: 21 out. 2019.

CKC DO BRASIL. **CKC-2020®** - Retardante antichamas para madeira crua. Disponível em: <https://www.ckc.com.br/index.php/produtos-principal/18-ckc-2020-madeira-crua.html>. Acesso em: 21 out. 2019.

DIAS JUNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F. Pyrolysis and wood by-products of species from the Brazilian semi-arid region. **Scientia Florestalis**, v. 46, n. 117, p. 1-17, 2018. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n117.06>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural fire design**. Nov., 2004.

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS. **EOTA ETAG 028: Guideline for european technical approval of fire retardant products**. Brussels: EOTA, 2012.

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

HASBURG, L. E.; DIENTENBERG, M. A. Wood Products: Thermal degradation and fire. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, p. 1-8, 2016. [10.1016/B978-0-12-803581-8.03338-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03338-5)

IZYDORCZYK, D.; SĘDŁAK, B.; SULIK, P. Fire resistance of timber doors – Part 1: Test procedure and classification, *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, p. 125-128, 2014.

KARTAL, S. N.; AYRILMIS, N.; IMAMURA, Y. Decay and termite resistance of plywood treated with various fire retardants. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1207-1211, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.018>

KOZŁOWSKI, R.; MIELENIĄK, B.; HELWIG, M.; PRZEPIERA, A. Flame resistant ligno-cellulosic-mineral composite particleboards. **Polymer degradation and stability**, v. 64, n. 3, p. 523-528, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(98\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(98)00145-1)

LARANJEIRA, J.; CRUZ, H.; PINTO, A. P. F.; SANTOS, C. P. **Reação ao fogo de madeira antiga protegida com tratamentos retardadores de combustão**. CILASCI – CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, 2., Coimbra. **Anais [...]**. Portugal, 2013.

LEVAN, S. L.; WINANDY, J. E. Effects of fire retardant treatments on wood strength: A review. **Wood and Fiber Science**, v. 22, p. 113-131, 1990.

MORIKAWA, D. C. L. **Métodos construtivos para edificações utilizando componentes derivados da madeira de reflorestamento**. 115 p. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257692/1/Morikawa_DevanirCabralLima_M.pdf. Acesso em: 11 mar. 2020.

OSTMAN, B. A. A. L. Fire safety in timber buildings. **SP Wood Technology**, Stockholm, Sweden, 2013.

PEDIEU, R.; KOUBAA, A.; RIEDL, B.; WANG, X. M.; DENG, J. Fire-retardant properties of wood particleboards treated with boric acid. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p.191-197, 2012. <http://doi.org/10.1007/s00107-011-0538-y>

PIERIN, I.; SILVA, V. P.; ROVERE, H. L. Thermal analysis of two-dimensional structures in fire. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 1, p. 25-36, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000100005>

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. 157 p. 2001. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001. <http://doi.org/10.11606/D.18.2001.tde-19052006-114716>

PINTO, E. M.; CALIL JUNIOR, C. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo. **Minerva**, v. 3, n. 2, p. 131-140, 2006.

PINTO, E. M.; CALIL JUNIOR, C.; MUNAIAR NETO, J.; REGOBELLO, R. Theoretical and experimental study of the thermal degradation of Eucalyptus timber. **Forest Products Journal**, v. 58, n. 4, p. 85-89, 2008.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: Kinetics and degradation mechanisms. **BioResource Technology**, v. 126, 2012, p. 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.133>

PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood**

Science and Technology, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0082-9>

POPESCU, C. M.; PFRIEM, A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood-based products - An overview. **Fire and Materials**, v. 44, p. 100-111, 2020. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>

PURI, R. G.; KHANNA, A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 14, p. 1-20, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9815-3>

SANCHÉZ, F. P. **Protección Preventiva de la Madera**. AITIM, 2001.

SANCHEZ-SILVA, L.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, D.; VILLASEÑOR, J.; SÁNCHEZ, P., VALVERDE, J.L. Thermogravimetric - mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. **BioResource Technology**, v. 109, p. 163-172, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.001>

SANTA HELENA. **Proteção passiva com credibilidade**. Disponível em: . Acesso em: 21 out. 2019.

SANTANA, P. L.; SANTOS, C. A. B. S.; ARAÚJO, D. G.; COSTA NETO, G. F. C.; ARAÚJO, P. J. P. Tratamento anti-chamas para madeiras utilizadas na construção civil. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, n. 17, p. 99-108, out. 2013.

SCHMID, J.; JUST, A.; KIPPEL, M.; FRANGIACOMO, M. The reduced cross-section method for evaluation of the fire resistance of timber members: discussion and determination of the zero-strength layer. **Fire Technology**, v. 51, p. 1285-1309, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0421-6>

TANG, Y.; WANG, D. Y.; JING, X. K.; GE, X. G.; YANG, B.; WANG, Y. Z. A formaldehyde-free flame retardant wood particleboard system based on two-component polyurethane adhesive. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 108, n. 2, p. 1216-1222, 2008. <https://doi.org/10.1002/app.27662>

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. **Wood Handbook - Wood as an engineering material**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapter 18, p. 1-18, 2010.

WILLIAMSON, T. G. **APA-The Engineered Wood Association**. McGraw-Hill: New York, 2002.



Madeira laminada cruzada (CLT): prescrições técnicas de confecção e utilização

*Nayara Franzini Lopes
Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Fabricio Gomes Gonçalves
Rafael Gonçalves Espósito de Oliveira*

INTRODUÇÃO

A madeira foi o material de construção preferido por milênios devido à sua acessibilidade, abundância e relação peso-força. No entanto, apesar de suas muitas vantagens, o uso da madeira como material de construção não está livre de desafios. As propriedades da madeira não são homogêneas e variam amplamente dependendo da espécie, disposição celular, teor de umidade, localização da árvore e dentro da mesma árvore (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Além disso, devido à natureza anisotrópica da madeira, suas propriedades mudam com a direção do corte (HOADLEY, 2000).

Em parte, para abordar a variabilidade inerente à madeira e utilizar o material de forma mais eficiente, desenvolveram-se produtos de madeira engenheirada (EWPs). Exemplos de EWPs bem-sucedidos são os painéis *Oriented Strand Board* (OSB), *Fiberboard* de média densidade (MDF) e madeira laminada colada (*Glulam*). Esses produtos são fabricados para obter propriedades de engenharia direcionadas, como alta resistência, durabilidade aprimorada e consistência. EWPs também ajudam a fazer um uso mais eficiente de

árvores de baixo valor e de pequeno diâmetro (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; WOODALL, 2011; MCKEEVER, 1997; APA, 2013). O desenvolvimento e a melhoria das tecnologias de adesão, conexões mecânicas e tecnologia de classificação resultaram em EWPs que ampliam as possibilidades para construção em madeira (CANADIAN WOOD COUNCIL, 2010).

Uma das inovações mais recentes em EWPs é o desenvolvimento de painéis de madeira laminada cruzada (*Cross Laminated Timber* – CLT). A CLT é uma nova tecnologia de construção que se originou na Europa e tem sido muito bem-sucedida nesse mercado desde a sua introdução há duas décadas (LEHMANN, 2012).

A CLT se tornou um material de construção amplamente utilizado (ESPINOZA *et al.*, 2016) e de interesse global, devido ao seu potencial técnico e econômico (BRANDNER *et al.*, 2016). Essa tecnologia estabeleceu-se como uma nova técnica europeia de construção de madeira sólida e constitui uma alternativa ao sistema até então mais utilizado, o *woodframe*, e aos sistemas tradicionais baseados em tijolos e concreto (BOGENSPERGER; AUGUSTIN; SCHICKHOFER, 2011).

Desde 2010 o foco tem sido, principalmente, a disseminação, a transferência, a padronização e a posterior criação do produto, aspectos que continuarão a ser importantes nos próximos anos. É dada especial ênfase ao desenvolvimento e ao estabelecimento da técnica de construção de madeira sólida em madeira laminada cruzada, um sistema de construção de edifícios que permita demonstrar o uso potencial, bem como as vantagens econômicas e competitivas da CLT.

1 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL

Estes painéis (também denominados *X-Lam*, *Massive Timber* ou *Cross-Lam*) consistem na sobreposição de camadas de lâminas de madeira maciça coladas em sentidos opostos e alternados (tipicamente a 90°), entremeadas de adesivo estrutural e à prova d'água e submetidas a grande pressão (CREPELL; GAGNON, 2010). Sua composição pode variar de 3, 5, 7 ou 9 camadas, sempre em números ímpares, com espessura variando entre 57 mm e 500 mm, geralmente são usadas larguras de 3 metros com comprimentos que podem atingir até 24 metros (Figura 1).

Figura 1: Configuração das camadas dos painéis de CLT



Fonte: Modificado de FPIInnovations (2013).

Como nesse tipo de painel as camadas se encontram coladas e dispostas ortogonalmente, há uma maior estabilidade dimensional, que permite a pré-fabricação de lajes de piso e paredes. Proporciona ainda resistência e rigidez, dando ao painel uma grande capacidade de suportar esforços nas duas direções ortogonais, conferindo, assim, comportamento similar ao de uma laje de concreto armado (CRESPELL; GAGNON, 2010).

A estabilidade dimensional da CLT está enraizada no seu fabrico e é o resultado de dois fatores básicos: a própria madeira serrada possui um teor médio de umidade de cerca de 12%, que é relativamente seco. A madeira serrada proveniente do secador significa menos encolhimento geral quando a madeira aclimatada à condição de serviço. Além disso, uma vez que a madeira de menor dimensão pode ser usada, o teor de umidade tende a ser homogêneo em todo o produto. A natureza da laminação cruzada é um dos principais fatores que possibilitam a estabilidade dimensional do conjunto. Tendo em vista que a madeira se expande e se contrai cinco a dez vezes mais tangencial a grã do que paralelo a grã, a orientação alternada das camadas no CLT tem o efeito de restringir a expansão geral e a contração do painel em ambas as direções (FPINNOVATIONS, 2013).

Por essas características, os painéis de CLT são utilizados como elementos estruturais em edificações de vários pavimentos em construções pré-fabricadas, ou em tabuleiro de estruturas de pontes, e podem ser dispostos tanto no sentido vertical como horizontal (AMORIM; MANTILLA; CARASCO, 2017). Eles possuem alto grau de pré-fabricação, baixa relação resistência/peso, além de serem bons isolantes térmicos e acústicos (ECKER; MIOTTO; TURMINA, 2017). Por ser um material proveniente de um recurso natural renovável, a CLT pode ser considerada um sistema construtivo sustentável e uma alternativa viável para os edifícios superiores a três pavimentos (AMORIM, 2017).

Uma das características mais atraentes da CLT como sistema de construção refere-se à velocidade na qual edifícios CLT podem ser erguidos, em grande parte devido à sua natureza pré-fabricada. Isso permite uma alta precisão (as aberturas nos painéis são cortadas usando uma máquina CNC), uma conclusão mais rápida, maior segurança, menos interrupção dos ambientes e menor geração de resíduos no local (EVANS, 2013; FPINNOVATIONS, 2013). Vários estudos de caso destacam a construção rápida no local que pode ser tão curta quanto três a quatro dias (WOODWORKS, 2013), em comparação com 28 dias para a construção típica de concreto (WILSON; KOSMATKA, 2011). A construção pode demorar apenas três a quatro meses para edifícios com até nove andares, menos da metade do tempo em comparação com os métodos de construção tradicionais, como o concreto (LEHMANN; HAMILTON, 2011). Patterson (2013) comparou dois edifícios residenciais de dez andares, um em CLT e outro em concreto, e concluiu que, em alguns casos, uma redução de onze para doze meses em tempo de construção poderia ser conseguida escolhendo o primeiro.

A CLT permite um alto grau de pré-fabricação. As montagens de paredes são caracterizadas por uma clara separação em camadas para construção, isolamento, instalação e revestimento. Isso permite (1) diferentes graus de pré-fabricação na fábrica, (2) um passo a passo no local, e (3) uma execução mais fácil de trabalhos de reparação e alteração na fachada, isolamento e instalação. No que diz respeito à física do edifício e em comparação com as construções de madeira leve, a CLT exibe menos permeabilidade ao ar e uma capacidade de armazenamento específica distinta para a umidade e energia térmica (BRANDNER et al., 2015).

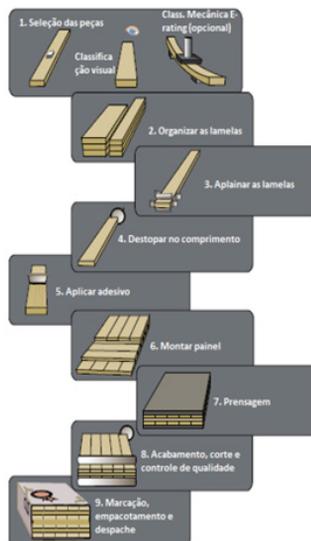
A madeira laminada cruzada (CLT) é um produto de madeira de engenharia sólida e pré-fabricada em larga escala. Leve, porém muito forte, com desempenho acústico, contra fogo, sísmico e térmico superior, a CLT também é de rápida e fácil instalação, gerando quase nenhum desperdício no local. Oferece flexibilidade de design e baixos impactos ambientais. Essas características fazem da CLT uma forte alternativa aos materiais convencionais, como concreto, alvenaria ou aço, especialmente em construção multifamiliar, industrial e comercial (APA, 2016).

2 PRODUÇÃO DA CLT

Os componentes selecionados para CLT e os processos de fabricação (aplicação adesiva, pressão de painel etc.) precisam ser cuidadosamente considerados para garantir um produto confiável e consistente. Os produtos CLT avaliados pelo cumprimento do código por uma agência de certificação de produto reconhecida ou serviço de avaliação como reunião ANSI/APA PRG 320 fornecem aos designers uma garantia de qualidade e desempenho do produto.

Segundo o CLT Handbook FPIInnovations (2013), a CLT apresenta as seguintes etapas de fabricação (Figura 2):

Figura 2: Etapas de fabricação da CLT.



Fonte: adaptado de Pereira (2014).

1- Seleção das peças – Na etapa de seleção, é feita uma classificação visual das peças para que sejam descartadas peças com defeitos acima do permitido e classificadas quanto à densidade. É feito também o controle de umidade das peças de madeira.

2- Organização das lamelas – As lamelas para produção da CLT devem ser organizadas de acordo com o tamanho e espessura do painel. Áreas do painel de maior solicitação devem receber lamelas de melhor qualidade e maior resistência.

3- Aplainamento das lamelas – Antes da colagem é necessário realizar o aplainamento das lamelas para retirar a camada superficial de madeira oxidada e permitir que ocorra a abertura dos poros da madeira, melhorando a penetração do adesivo nas células e assim melhorar a colagem.

4- Destopamento no comprimento – Nessa etapa é feito o corte das peças de madeira no comprimento do prato da prensa, tanto para camadas longitudinais quanto para camadas transversais.

5- Aplicação do adesivo – A colagem deve ser iniciada após o aplainamento, pois este processo abre os poros da madeira ajudando a ancoragem química do adesivo. Para facilitar a colagem, as superfícies das lamelas de madeira devem estar limpas e livres de substâncias como óleo e graxas, além de pó de serra da própria madeira.

6- Montagem do painel – A montagem do painel é feita colocando-se camadas de forma perpendicular, formando um ângulo de 90°.

7- Prensagem – O tempo de prensagem pode variar conforme o adesivo e é especificado pelo fabricante. A temperatura e umidade relativa do ar também afetam esta etapa do processo da mesma forma como no processo de aplicação do adesivo.

8- Acabamento, corte e controle de qualidade – O acabamento é feito por meio de lixadeira. O corte final pode ser feito por meio de comando de computador.

9- Marcação, empacotamento e despacho.

Para os produtores americanos e canadenses que são regidos pela norma ANSI/APA PRG 320:2017, é necessária a marcação no produto de algumas informações, tais como (PEREIRA, 2015):

- Nota de qualificação segundo a norma;
- Dimensões da CLT;
- Nome do fabricante ou número de identificação;
- Nome da agência que aprovou o produto;
- Símbolo com nome da norma ANSI/APA PRG 320:2017;
- Identificação de uso (teto ou parede).

Vários tipos de adesivos estruturais foram utilizados com sucesso na produção de CLT, entre eles:

- Tipos fenólicos como fenol-resorcinol formaldeído (PRF);

- Emulsão polimérica de isocianato (EPI);
- Poliuretano (PUR).

No entanto, como possuem um alto valor de mercado, a utilização de adesivos como melanina-ureia-formaldeído, que são economicamente mais acessíveis, tornam-se mais viáveis para fabricação de CLT utilizando madeira de baixo valor agregado (ALENCAR, 2015).

Para evitar variações dimensionais e fendas superficiais e garantir um melhor desempenho do adesivo, o teor de umidade adequado para a madeira é $12\% \pm 3\%$. Além disso, a norma americana ANSI/APA PRG 320:2017 recomenda a seleção de espécies de madeira com densidade superior a $0,35 \text{ g/cm}^3$.

Em trabalho realizado por Pereira (2014) em que um painel de CLT com madeira de pinus foi fabricado, utilizou-se uma resina melamina-ureia-formaldeído com catalisador tipo líquido-líquido, com gramatura de 400 g a 450 g de adesivo por m^2 e pressão: mínimo de $0,5 \text{ N/mm}^2$ (5 kg/cm^2) para madeiras com densidade baixa, como o pinus. Mínimo de $1,0 \text{ N/mm}^2$ (10 kg/cm^2) para madeiras com densidade elevada, como as madeiras de lei. Para a produção de vigas laminadas coladas, recomenda-se no mínimo $0,7 \text{ N/mm}^2$ (7 kg/cm^2) para pranchas de até 33 mm e $0,9 \text{ N/mm}^2$ (9 kg/cm^2) para pranchas de até 45 mm.

A pressão é um passo crítico na produção da CLT, dois tipos principais de prensa são utilizados na sua fabricação: prensa a vácuo (membranas flexíveis) e prensa hidráulica (placa rígida). As prensas a vácuo geram uma pressão máxima de 0,1 Mpa, que geralmente não atende aos requisitos de pressão recomendados pelos fabricantes dos adesivos. Além disso, a baixa pressão não é suficiente para suprimir a deformação potencial de camadas e suprimir as irregularidades da superfície, e não consegue criar um contato mais efetivo entre as peças de madeira (FPINNOVATION, 2013).

As prensas hidráulicas são mais recomendadas por conseguirem cargas muito elevadas, tanto que é necessária uma pequena prensagem lateral da ordem de 0,276 MPa a 0,550 MPa (40 psi a 80 psi) para evitar que as lamelas se desloquem lateralmente criando lacunas durante a aplicação da carga vertical. A pressão vertical deve ser a recomendada pelo fabricante do adesivo, mas geralmente são acima de 0,6 MPa (870 psi). Para adesivos poliuretanos, ou base de ureia-formaldeído e resorcinol-formaldeído, as pressões recomendadas são, no mínimo, de 0,9 MPa.

Tipos comuns de conexões em montagens CLT podem incluir:

- Parede para fundação;
- Parede a parede (reta);

- Parede a parede (junção);
- Piso ao chão;
- Parede para o chão;
- Parede para o telhado.

Essas conexões podem ser feitas por meio de conectores metálicos, parafusos, cavilhas, pregos. Sistemas inovadores de conexão, como barras coladas e outros tipos de sistemas de conexão, mostraram um bom potencial para uso em montagens CLT (FPINNOVATIONS, 2013).

3 PROPRIEDADES DA CLT

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas é de grande importância. O emprego da madeira, para fins estruturais ou não, deve ser realizado com economia e segurança.

Para utilização da CLT, são necessários testes de desempenho estrutural que irão averiguar suas propriedades físicas e mecânicas. Estes testes incluem resistência à flexão, rigidez à flexão e ao cisalhamento interlaminar, tanto na direção da maior força quanto na direção da menor força, conforme previsto na ANSI/APA PRG 320:2019. O tamanho da amostra para a rigidez à flexão deve ser suficiente para estimar a média da população com precisão de 5% com 75% de confiança, ou 10 amostras, o que for maior. O tamanho da amostra para a resistência à flexão e ao corte interlaminar deve ser suficiente para a estimativa do valor característico, com 75% de confiança, em conformidade com a norma ASTM D2915 (PEREIRA, 2015).

A norma ANSI/APA PRG 320 (2017) determina os valores para módulo de elasticidade e módulo de ruptura para painéis constituídos com espécies canadenses e americanas. Estas espécies são avaliadas através de classificação tanto visual como de forma mecânica (destrutivo e não destrutivo), obtendo-se também valores de compressão e cisalhamento nas duas direções das fibras, paralelo e perpendicular ao eixo do painel (ALENCAR, 2015).

Na Tabela 1 são apresentados os valores mínimos de referência das propriedades mecânicas, segundo a norma ANSI/APA PRG 320 (2017) para painéis CLT. As designações E1, E2 e E3 indicam painéis de CLT classificados visual e mecanicamente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Spruce-pine-fir*; *Douglas fir-Larch*; *Eastern Softwoods* e *Northern Species* ou *Western Woods*. As designações V1 e V2 indicam painéis classificados apenas visualmente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Douglas fir-Larch* e *Spruce-pine-fir*.

Tabela 1: Valores característicos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320: 2017 para CLT

Classe CLT	Direção do maior comprimento						Direção do menor comprimento					
	$f_{b,0}$ (MPa)	E_0 (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{v,0}$ (MPa)	$f_{s,0}$ (MPa)	$f_{b,90}$ (MPa)	E_{90} (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{v,90}$ (MPa)	$f_{s,90}$ (MPa)
E1	28,2	11.700	15,4	19,3	1,5	0,50	7,0	9.000	3,2	9,0	1,5	0,50
E2	23,9	10.300	11,4	18,1	1,9	0,63	4,6	10.000	2,1	7,3	1,9	0,63
E3	17,4	8.300	6,7	15,1	1,3	0,43	4,5	6.500	2,0	5,2	1,3	0,43
V1	10,0	11.000	5,8	14,0	1,9	0,63	4,6	10.000	2,1	7,3	1,9	0,63
V2	11,8	9.500	5,5	11,5	1,5	0,50	7,0	9.000	3,2	9,0	1,5	0,50

$f_{b,0}$ – resistência à flexão na direção paralela à força aplicada e $f_{b,90}$ na direção perpendicular; E_0 módulo de elasticidade na direção paralela à força aplicada e E_{90} na direção perpendicular; $f_{t,0}$ – resistência à tração direção paralela à força aplicada; $f_{c,0}$ – resistência à compressão direção paralela à força aplicada; $f_{v,0}$ – resistência a cisalhamento direção paralela à força aplicada e $f_{v,90}$ na direção perpendicular; $f_{s,0}$ – resistência ao cisalhamento interlaminar (rolling shear) direção paralela à força aplicada e $f_{s,90}$ na direção perpendicular.

4 PRINCIPAIS OBRAS COM CLT

O sistema construtivo que utiliza como material estrutural o *Cross Laminated Timber* (CLT) vem obtendo sucesso e ganhando mercado desde seu desenvolvimento, no final da década de 1980, e atualmente este tipo de construção é o sistema construtivo em maior ascensão em países da Europa.

Na Figura 3, é possível observar um edifício da Universidade da Colúmbia Britânica, localizado em Vancouver, no Canadá. Possui 5 andares e foi concluído em 2012.

Figura 3: Edifício de Ciências da Terra da Universidade da Colúmbia Britânica



Fonte: Forestry Innovation Investment (2020).

Na Figura 4, é mostrado o primeiro edifício CLT da Austrália e o primeiro edifício CLT de 10 andares do mundo, concluído em 2012.

Figura 4: Edifício Forté



Fonte: Amata Brasil (2019).

Edifício de 9 andares construído em Londres (Figura 5), possuindo as paredes, lajes, escadas e fosso de elevador em CLT; sua construção representou o sequestro de 760 toneladas de CO₂; um similar em concreto armado emitiria 500 toneladas de CO₂; a diferença de 1.260 toneladas de CO₂ representa a emissão por seu uso em 25 anos.

Figura 5: Edifício multifamiliar de 9 andares em Londres.



Fonte: FPInnovations (2013).

Conjunto Dalston Lane (Figura 6), em Londres, considerado o maior edifício em volume de CLT do mundo; possui 121 unidades habitacionais e 15.960 m² de área construída, com 3.000 m³ de madeira em torres de 10 andares em CLT e 14 andares em CLT e MLC.

Figura 6: Conjunto Dalston Lane, em Londres.



Fonte: Waugh Thistleton Architects (2020).

Além de grandes obras, outros produtos podem ser produzidos com a CLT, como, por exemplo, mobílias (figuras 7A, B e C), pisos para canteiros de obras (Figura 8) e bases de apoio para patolas de guindastes (figuras 9A e B).

Figura 7 a, b, c: Móveis utilizando CLT.

(A)



(B)

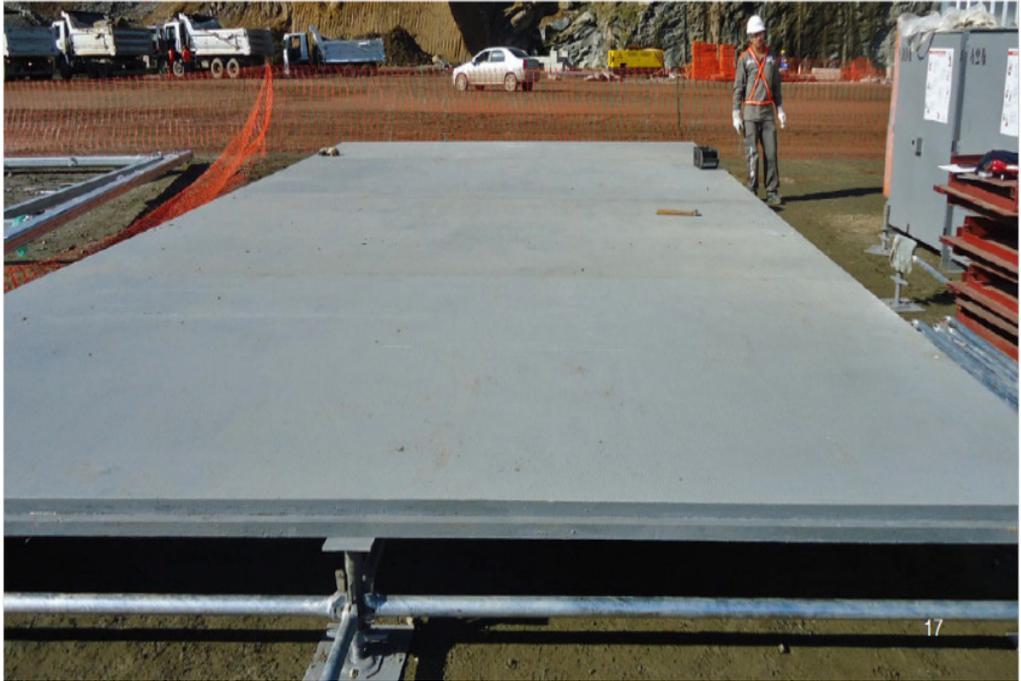


(C)



Fonte: CROSSLAM (2020).

Figura 8: Pisos para canteiros de obras.



Fonte: CROSSLAM (2020).

Figura 9: Bases de apoio para patolas de guindastes



Fonte: CROSSLAM (2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A CLT é um material construtivo relativamente novo, mas que já possui grande aceitação no mercado Europeu e da América do Norte. Por suas vantagens ambientais e competitivas

com os materiais convencionais já estabelecidos no mercado da construção, dispõe de enorme potencial para aplicações estruturais na construção civil. Porém, por se tratar de um material recente, principalmente no Brasil, maiores estudos quanto ao seu desempenho estrutural, produção e padronização são necessários.

Por suas características de industrialização e sustentabilidade, a tecnologia construtiva da CLT vem despertando interesse do mercado brasileiro, sendo ilimitadas as suas aplicações para construção civil e projetos em outras áreas.

O uso da CLT é uma alternativa viável aos materiais de construção mais tradicionais, como concreto e aço, porém muitos estudos ainda devem ser realizados para estabelecimento de parâmetros que permitam a construção de estrutura em CLT no Brasil.

Referências

ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT):** análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado. 105 p. 2015. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2015.

Amata Brasil. **Primeiro edifício residencial de CLT.** <https://medium.com/@amatabrasil/primeiro-edif%C3%ADcio-residencial-de-clt-5e417d44ee64>>. Acesso em: 14 Dez. 2020.

AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Matéria**, v. 22, 2017.

AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Análise dos métodos analíticos de dimensionamento de lajes de madeira laminada cruzada. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2., 2017, Buenos Aires. **Anais [...]**. Buenos Aires: UNNOBA, 2017.

ANSI/APA. **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber PGR 320-2017.** ANSI/APA. Tacoma, WA, p. 32. 2017.

APA. **Engineered Wood Products for Superior Performance.** The Engineered Wood Association. 2013.

APA. **North American CLT vs. Imported Product:** stringent standard assures consistent value and performance. The Engineered Wood Association. 2016

BOGENSPERGER, T.; AUGUSTIN, M.; SCHICKHOFER, G. **Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane**. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures. Alghero, Italia: [s.n.], p. 15, 2011.

BRANDNER, R.; DIETSCH, P.; DROBOSCHER, J.; SCHULTE-WREDE, M.; KREUZINGER, H.; SIEDER, M.; SCHICKHOFER, G.; WINTER, S. **Shear properties of cross laminated timber (CLT) under in-plane load: Test configuration and experimental study**. *In: INTER-MEETING, 2*, Sibenik. 2015.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331-351, 2016.

CANADIAN WOOD COUNCIL. **The Design Possibilities of Engineered Wood Products**. *In: INTERNATIONAL BUILDING SERIES NUMBER*, v. 7, 2010.

CREPELL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber: a Primer**. FP Innovations. 2010.

CROSSLAM – **CROSS LAMINATED TIMBER**. Suzano, 2020. Disponível em: <http://www.crosslam.com.br/home>. Acesso em: 28 fev. 2020.

ECKER, T. W. P.; MIOTTO, J. L.; TURMINA, G. Painéis de madeira laminada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. **Ciência & Engenharia**, v. 26, n. 1, p. 17-25, 2017.

ESPINOZA, O.; TRUJILLO, V. R.; MALLO, M. F. L.; BUEHLMANN, U. Cross-laminated timber: Status and research needs in Europe. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 281-295, 2016.

FORESTRY INNOVATION INVESTMENT. **Naturally: wood**. Disponível em: <https://www.naturallywood.com/project/university-of-british-columbia-earth-sciences-building/>. Acesso em: 12 dez. 2020.

FOREST PRODUCT LABORATORY (FPL). **Wood Handbook: Wood As Engineering Material**. Department of agricultura, Forest Service: Madison, 2010.

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook**: Cross Laminated Timber. KARACABEYLI, E.; DOUGLAS, B. (eds). FPInnovations, Quebec, Canada. 2013. Disponível em: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_gagnon001.pdf. Acesso em: 28 ago. 2019.

HOADLEY, B. **Understanding wood**: a craftsman's guide to wood technology. Taunton Press, Newtown, CT. 2000.

LEHMANN, S. Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems. **Sustainability**, v. 4, n. 10, p. 2707-2742, 2012. <http://doi.org/10.3390/su4102707>

LEHMANN, S.; HAMILTON, C. **Sustainable Infill Development Using Low Carbon CLT Prefabrication**: Adaptation for the South Australian Context. Zero Waste AS Research Centre for Sustainable Design and Behaviour: University of South Australia, Adelaide, Australia, 2011.

MCKEEVER, D. **Engineered Wood Products**: a Response to the Changing Timber Resource. Pacific Rim Wood Market Report, Gig Harbor, WA, 1997.

PATTERSON, D. **Forté creating the World's tallest CLT apartment building**. *In*: US CLT SYMPOSIUM. Seattle. February 28, 2013.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada**. 107 p. 2015. Dissertação (Mestrado Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

WAUGH THISTLETON ARCHITECTS (WTA). **Dalston Works: The world's largest CLT building**. 2020. Disponível em: <http://waughthistleton.com/dalston-works/>. Acesso em: 28 ago. 2020.

WILSON, M.; KOSMATKA, S. H. **Design and Control of Concrete Mixtures**: the Guide to Applications, Methods, and Materials, fifth ed. Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011.

WOODALL, C. An overview of the Forest products sector downturn in the United States. **Forest Products Journal**, v. 61, n. 8, p. 595-603, 2011. <http://doi.org/10.13073/0015-7473-61.8.595>

WOODWORKS. **Introducing Cross-laminated Timber.** New Opportunities for Timber Construction. Wood Works Presentation, 2013.



Relação entre anéis de crescimento e características físico-mecânica e visuais da madeira de Pinus spp.

Raynord Mayard

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Lorenzo Lube dos Santos

Fabricio Gomes Gonçalves

Leonor da Cunha Mastela

Rejane Costa Alves

INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção de matéria-prima destinada a suprir as necessidades da indústria madeireira se concentra no emprego de madeira de rápido crescimento, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Dentre as espécies de pinus, podem-se citar algumas mais relevantes na construção civil, como o *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Na América do Norte, o *Pinus elliottii* possui o nome comercial de *Slash Pine* e o *Pinus taeda* de nome comercial de *Loblolly Pine*. Estes dois são incluídos no grupo Southern Pine e são qualificados conforme as regras do *Southern Pine Inspection Bureau* – SPIB (CARREIRA; DIAS, 2003).

O cultivo do gênero *Pinus* teve início no Brasil acerca de cem anos, porém, a silvicultura desta espécie teve aumento a partir de 1966, com a lei de incentivos fiscais decretada pelo governo federal, que tinha como foco principal abastecer a carência de matéria-prima e regulamentar a exploração e o emprego das florestas, que até então estavam sendo conduzidos de maneira irregular (TRIANOSKI, 2012).

Neste sentido, segundo o mesmo autor, as principais espécies aproveitadas nos plantios de pinus se resumiam fundamentalmente a *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Este último se adaptou bem ao clima brasileiro, obtendo rápido crescimento e intensa reprodução, proporcionando facilidade de aproveitamento de práticas silviculturais e de manejo, suprimindo a carência de matéria-prima das indústrias madeireiras que empregam madeira de pinus.

A madeira pertencente às espécies do gênero *Pinus* possui características físico-mecânicas e estéticas bastante diferenciadas. A utilização da madeira deste gênero compreende madeira serrada, laminada, produção de celulose, construção civil, estruturas, estaqueamento marítimo, postes e painéis de partículas orientadas – OSB (KLOCK, 1989; MENDES, 2001; MORAES *et al.*, 2007).

No Brasil, a área total de árvores plantadas chegou 7,84 milhões de hectares em 2016 (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2017). Nesta avaliação, as plantações de pinus ocupavam 1,6 milhão de hectares e acumulam-se, particularmente no Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%), uma vez que a região Sul do Brasil possui melhores condições de solo e clima para o desenvolvimento do gênero *Pinus*.

O emprego estrutural da madeira desse gênero vem crescendo devido à carência de madeiras nativas, convencionalmente utilizadas como matéria-prima da indústria madeireira. Este fato acarreta a opção pela madeira de pinus para o mercado, preferencialmente quanto ao emprego de estruturas pré-fabricadas (SANTOS, 2016). Para o uso correto da madeira, torna-se necessária a aplicação de ensaios mecânicos de corpos de prova isentos de defeitos para fins estruturais (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 13910, 2013; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1997).

Dentre as propriedades da madeira, a densidade aparente é a mais usada em pesquisas relacionadas à qualidade da madeira, sendo que esta é a mais importante e a que melhor se relaciona com as demais propriedades (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991; RALL, 2010; MARQUES *et al.*, 2012). No mesmo sentido, vários estudos mostram que os anéis de crescimento da madeira têm uma forte relação com a resistência mecânica. Para as madeiras, quanto maior a proporção de lenho tardio, mais densa, há uma tendência de ser mais resistente à compressão normal às fibras (RALL, 2006; MORESCHI, 2012).

A quantidade de anéis de crescimento da madeira tem grande influência sobre a densidade aparente e o módulo de elasticidade. Vários estudos mostram que o módulo de elasticidade, calculado a partir da densidade aparente, apresenta correlação com as mesmas características e também com a espessura da parede dos traqueoides. Estas pesquisas ressaltaram que as proporções de lenho inicial e tardio também resultaram em uma boa correlação com a densidade aparente e o módulo de elasticidade (SILVA, 2002; SHIMOYAMA, 2005).

Dentre as propriedades mecânicas na caracterização da madeira, a solicitação à compressão normal às fibras ocorre com maior constância na região do apoio das peças estruturais. Este fenômeno é realizado com forças aplicadas em uma determinada direção em relação

à disposição dos elementos anatômicos da madeira. Por meio deste plano, a madeira apresenta menor resistência, comparando com a compressão paralela, com base na sua estrutura anatômica (DIAS, 1994).

De fato, o entendimento das propriedades da madeira destas espécies, particularmente, a sua resistência à compressão normal às fibras possibilita o dimensionamento compatível com esta força nas ligações estruturais. Além disso, é uma importante ferramenta para o controle de qualidade e especialmente para a indicação de usos finais adequados de forma sustentável, isto é, sem desperdício na realização dos projetos.

1 ASPECTOS GERAIS NORMATIVOS

A NBR 7.190 (ABNT, 1997) orienta que as caracterizações das madeiras, como a densidade, a resistência, a rigidez e a umidade, sejam condicionadas a seus elementos anatômicos. De fato, devem-se diferenciar os valores apropriados à compressão, bem como os valores apropriados à direção paralela às fibras, dos correspondentes à direção normal às fibras.

A norma citada descreve os procedimentos para a determinação das propriedades da madeira a serem consideradas em um projeto estrutural, ou seja, resistência, rigidez, densidade e teor de umidade. A NBR (ABNT, 1997) caracteriza completamente as propriedades de resistência à compressão normal às fibras da madeira para projeto de estruturas, realizada de acordo com os métodos de ensaio, com base na condição-padrão de umidade ($U = 12\%$).

A resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade à compressão às fibras e a densidade são parâmetros para a determinação da classe de resistência, sendo três classes de resistências para as coníferas, conforme observação na Tabela 1. Cabe ressaltar que existe uma relação matemática entre a resistência à compressão normal às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras, em que a primeira é aproximadamente igual a 25% da segunda.

Tabela 1: Classes de resistência das coníferas com valores na condição-padrão de referência ($U = 12\%$).

Classes	$f_{c0,k}$ # (MPa)	$F_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{bas} ($kg\ m^{-3}$)	ρ_{ap} ($kg\ m^{-3}$)
C20	20	4	3.500	400	500
C25	25	5	8.500	450	550
C30	30	6	14.500	500	600

Fonte: (ABNT, 1997), adaptado pelos autores.

$f_{c0,k}$: Resistência característica à compressão paralela às fibras; $f_{v0,k}$: Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras;

$E_{c0,m}$: Módulo de elasticidade a compressão paralela; ρ_{bas} : Densidade básica; ρ_{ap} : Densidade aparente.

2 ANÉIS DE CRESCIMENTO DA MADEIRA

O número de anéis de crescimento anuais por centímetro é um indicador da taxa de crescimento de uma árvore e, geralmente, está associado a lenho inicial ou tardio, por exemplo, taxas de crescimento rápidas produzem proporções de lenho inicial, que por sua vez está relacionado à sua propriedade mecânica (CARDOSO; MOYA; BORGES, 2019).

A maioria das madeiras de pinus possuem anéis de crescimento visíveis a olho nu. Esta característica facilita a sua identificação, e também a estimativa da sua densidade. Outras características importantes são a melhor trabalhabilidade e a menor dureza quando comparadas com outras espécies de algumas folhosas (KLOCK, 2000).

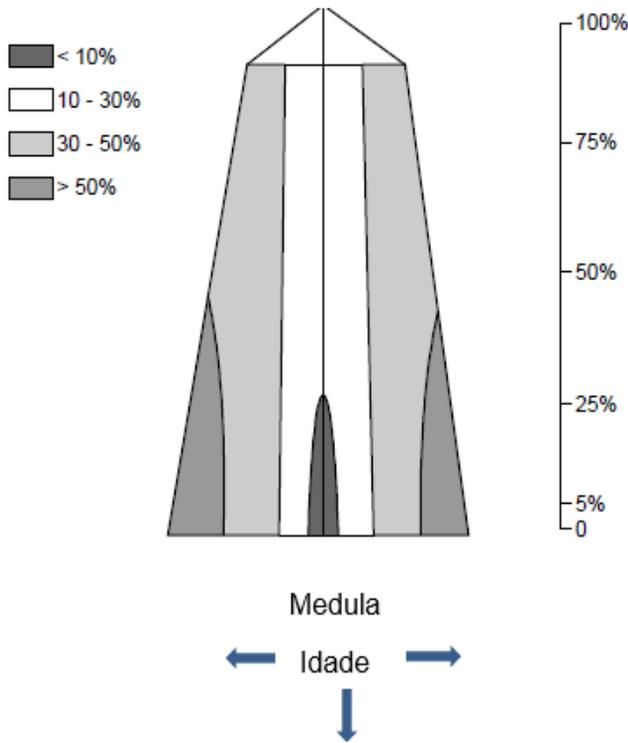
Em um anel de crescimento típico, podem-se observar geralmente dois lenhos: o lenho inicial, ou lenho primaveril, e o lenho tardio, ou lenho outonal. O lenho inicial caracteriza-se por ser produzido quando a atividade fisiológica da planta está forte, e, conseqüentemente, a atividade cambial, ocasionando madeira de coloração mais clara. O lenho tardio, marcado por ser apresentado em estações de baixa atividade fisiológica ou dormência, tem coloração de tonalidade mais escura. Estas propriedades são geralmente encontradas nas coníferas de forma mais acentuada que nas angiospermas (RALL, 2010; SOARES FILHO, 2014).

Uma pesquisa realizada sobre a caracterização dos anéis de crescimento de árvores de pinus relatou que a densidade aparente média do lenho das árvores de *Pinus* da classe de diâmetro alta e das classes média-baixa mostrou diferença expressiva, pela espessura e proporção dos lenhos inicial/tardio dos anéis de crescimento (FERREIRA FILHO, 2009).

Muniz (1993), analisando a porcentagem de lenho tardio de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, afirmou que os primeiros anéis formados em árvores de rápido crescimento, na direção medula-casca e a partir da medula, são largos e a faixa de lenho tardio é estreita. À medida que se aproxima da casca, a porcentagem de lenho inicial diminui de forma significativa, sendo mais relevante na região da base da árvore.

Na transição de idade, há uma tendência de diminuição na taxa de lenho inicial e acréscimo no lenho tardio no sentido medula-casca. Esta transformação agrega maior largura e maior diâmetro do lume e menor espessura da parede das fibras em alturas mais elevadas do tronco, conforme pode ser visto na Figura 1 (MUNIZ, 1993).

Figura 1: Variação do percentual de lenho tardio dentro de uma árvore de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.



Fonte: Muniz (1993).

Rall (2006) estudou a influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L. e afirmou que a classificação da madeira por densidade, a partir das características dos anéis de crescimento, deve ser realizada em função da observação de dois parâmetros diferentes e independentes: o número de anéis por polegada e a proporção de lenho tardio. Paralelamente, Cardoso, Moya e Borges (2019) afirmaram que o número de anéis anuais por centímetro é um indicador de taxa de crescimento de uma árvore, e geralmente é associado ao lenho inicial ou adulto (por exemplo, taxas de crescimento, proporções de lenho inicial), que por sua vez está relacionado às suas propriedades mecânicas.

Em um estudo realizado sobre a caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia*, Melo *et al.* (2010) concluíram que a utilização de caracteres macroscópicos de fácil aquisição, como proporção de lenho tardio ou número de anéis de crescimento por centímetro linear, pode ser empregada para a predição da resistência da madeira.

Neste sentido, Rall (2006) e Moreschi (2012) relacionaram os anéis de crescimento com a resistência mecânica para as madeiras de coníferas. Estes autores sustentaram que quanto mais largos os anéis de crescimento, menores são suas resistências mecânicas esperadas e suas massas específicas. Paralelamente, Klock (2000) destacou que madeiras de coníferas com anéis de crescimento mais estreitos são mais pesadas e resistentes. Pode-se afirmar que a proporção dos anéis de crescimento é um dos fatores relevantes que contribui para resistência mecânica da madeira.

Santos (2015) analisou a influência da largura dos anéis de crescimento em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus caribaea*. O módulo de ruptura foi maior nas madeiras com anéis de crescimento mais estreitos, o que permite afirmar que essas madeiras podem resistir a tensões maiores.

Ernesto e Barrichelo (1979) em seus estudos mencionaram em uma ordem de grandeza que as seguintes propriedades se mostraram superiores para o lenho tardio: comprimento da fibra, espessura da parede celular, índices de Enfeltramento e de Runkel, fração parede e densidade básica da madeira. Porém, a largura da fibra e o diâmetro do lúmen foram inferiores.

A norma Americana estabelece classes de densidade para a madeira de conífera em função da taxa de crescimento da madeira serrada (ASTM, 2011). De fato, para ser considerada como densa, a peça de madeira de conífera deve ter seis ou mais anéis de crescimento por polegada e, além disso, mais de um terço (1/3) da seção transversal deve ser madeira de inverno, conforme pode ser observado na Tabela 2.

De acordo com a Tabela 2, a classificação da madeira pode ser densa, não densa ou leve. Pode-se ressaltar que dois critérios distintos são considerados para a classificação da madeira quanto à densidade: o número de anéis por polegada e a proporção de lenho tardio.

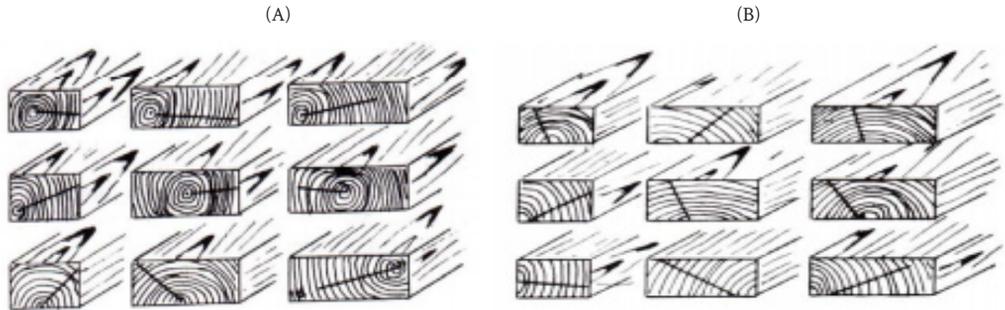
Tabela 2: Classes de densidade com base nos anéis de crescimento para coníferas.

Classe	Anéis /2,5 cm (1)	Proporção de lenho tardio
Densa	≥6 ≥4	>1/3 >1/2
Média	≥4	<1/2
Leve	<4	<1/2

Fonte: ASTM (2011), adaptado pelos autores.

O índice de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm (1”), medida em uma linha radial representativa considerando a direção medula-casca. A Figura 2 apresenta vários modelos sobre como deve ser realizada a medição dos anéis de crescimento levando em consideração a presença, ou não, da medula nos corpos de prova (ASTM, 2011).

Figura 2: Linha radial representativa em peça contendo medula (A) e em peça sem medula (B).



Fonte: CARREIRA; DIAS; CALIL JR (2004).

Peças com quatro ou mais anéis de crescimento e tendo mais da metade da seção transversal como lenho tardio podem ser consideradas como de alta densidade. Para ser considerada de média densidade, a peça deve ter quatro ou mais anéis de crescimento. Peças com menos de quatro anéis de crescimento são consideradas de baixa densidade (ASTM, 2011); neste caso, não podem ter finalidades estruturais.

Em uma análise realizada sobre a qualidade da madeira jovem de coníferas, Delucis *et al.* (2013) avaliaram o número de anéis por polegada, com medula e sem medula, de *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia*, com idades respectivas de 13, 13 e 19 anos, considerando-as como madeira juvenil. Os autores concluíram que o número de anéis de crescimento apresentou comportamento satisfatório, como variável independente, na estimativa da massa específica aparente a 12%, do MOE e do MOR.

Nutto *et al.* (2012) compararam três metodologias para a determinação dos anéis de crescimento. Eles estudaram a metodologia manual e digital, sendo a última com os programas *ArcView* e *WinDENDRO*. Analisando estas metodologias, os autores verificaram que o método manual e *WinDENDRO* proporcionaram o mesmo tempo gasto na avaliação dos anéis de crescimento, sendo que o método mais prático para avaliação dos anéis de crescimento foi o *WinDENDRO*, uma vez que as metodologias digitais possibilitam a redução de possíveis erros de medição e maior agilidade no processo. Quanto ao emprego do *ArcView* para o processo de digitalização dos anéis, foi fácil, contudo, trabalhoso e demorado, exigindo profissional qualificado.

2.1 Densidade aparente da madeira

A densidade é uma das características físicas que melhor define a qualidade da madeira, pela sua facilidade de determinação e por proporcionar correlação com outras propriedades do produto (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991; RALL, 2010).

A massa específica aparente constitui uma das características mais relevantes da madeira, pois ela está relacionada à maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas, utilizada, na prática, como uma referência para a classificação da madeira (MORESCHI, 2012). Assim, o mesmo autor concluiu que, de maneira geral, madeiras densas possuem maiores resistências mecânicas e são mais rígidas.

Em um estudo sobre a caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* com diferentes densidades, verificou-se que a madeira de menor densidade, em todas as análises, resultou em menor resistência mecânica, quando comparada com a madeira de alta densidade (LOBÃO *et al.*, 2004). Isso demonstra a forte relação entre a densidade da madeira e as suas propriedades mecânicas.

A densidade aparente ρ_{ap} é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade que a madeira se encontra (ABNT, 1997).

A ABNT (1997) considera a densidade aparente média à condição padrão de 12% de umidade para a madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com valores respectivos de 560 kg.m^{-3} e 645 kg.m^{-3} . A densidade da madeira do gênero *Pinus*, dependendo da espécie, pode se encontrar na faixa média de densidade. Ballarin e Lara Palma (2003) em seus estudos sobre as propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. encontraram densidade aparente (U12%) de 420 kg.m^{-3} a 787 kg.m^{-3} variando entre baixa e média densidade. Esses resultados se enquadram nos requerimentos da norma.

Ainda nos anos 1980, a Sociedade de Investigações Florestais – SIF (1984) já estudava os fatores que influenciavam a densidade da madeira, como a idade da árvore, o índice de sítio, o clima, a localização geográfica, entre outros. Isso mostra a grande possibilidade de haver variação de densidade, mesmo dentro de uma mesma espécie de árvore e mesmo sítio.

A tenacidade é a resistência que o material possui ao choque ou à percussão (pancada) sem se romper, ou seja, um material tenaz é aquele que possui um alto grau de deformação sem se romper (HOUAISS *et al.*, 2009; STOLF, 2014). Em outras palavras, a tenacidade é a quantidade de energia mecânica que o material pode absorver sem se fraturar. Em uma análise sobre a tenacidade da madeira como função da densidade aparente, Almeida *et al.* (2014) avaliaram a densidade aparente para o gênero *Pinus* encontrando uma densidade aparente entre 390 kg.m^{-3} e 640 kg.m^{-3} , sendo classificada como baixa e média densidade, conforme a norma ABNT (1997).

Já em um estudo realizado sobre caracterização, classificação e comparação da madeira de *Pinus patula*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* por meio de suas propriedades físicas e mecânicas, foram apresentadas a densidade aparente média, respectivamente, 450 kg.m^{-3} ; 450 kg.m^{-3} e 460 kg.m^{-3} (ELEOTÉRIO; MELCHIORETTO, 2003). Esta proximidade de valor da densidade pode ser devida à semelhança de idade das árvores avaliadas ou da localização geográfica.

Em uma análise sobre a determinação das propriedades físicas da madeira de *Pinus* sp. na avaliação da densidade aparente da espécie, Ladeira *et al.* (2018) encontraram resultados que oscilaram entre 470 kg.m⁻³ e 690 kg.m⁻³, e concluíram que a espécie tem propriedades que possibilitam um amplo aproveitamento para várias finalidades. Os valores médios da densidade básica e aparente encontrados foram, sucessivamente, 410 kg.m⁻³ e 520 kg.m⁻³, por isso foram classificados na classe C20, de acordo com a ABNT (1997), para fins de aplicações estruturais.

2.2 Módulo de elasticidade

Os materiais quando submetidos a uma tensão podem apresentar dois tipos de deformação, sendo estas elástica ou plástica (KRETSCHMANN, 2010). Dessa forma, a deformação elástica que é encontrada em madeira até o limite de elasticidade é aquela em que após a supressão da tensão o material retorna a sua posição inicial. Ultrapassando a deformação elástica, o material já passa para a fase de deformação plástica, em que o material não volta a sua forma original quando a tensão for suprimida.

O autor anterior alegou que ao conhecer a força atuante e a deformação provocada sobre o material é determinada uma das principais propriedades mecânicas dos materiais, chamada de Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young. Neste caso, a razão entre a tensão a que o material está submetido e a deformação resultante é chamada de Lei de Hooke, conforme indicado na Equação 1.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo *E*: Módulo de elasticidade (MPa); σ : Tensão aplicada (MPa); ϵ : Deformação (%).

Delucis *et al.* (2013), estudando *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia*, encontraram módulos de elasticidade médios, sendo respectivamente: 5.841 MPa, 7.185 MPa e 9.575 MPa. Neste caso, considera-se que a *Araucaria angustifolia* proporcionou maior módulo de elasticidade, possivelmente devido às propriedades químicas e anatômicas. Sabendo-se que o número de anéis de crescimento da espécie não foi significativamente maior do que o de *Pinus taeda*, embora tenha sido maior do que o da madeira de *Pinus elliottii*.

Em uma pesquisa realizada com o objetivo de quantificar as propriedades mecânicas de *Pinus* spp., estudaram as propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus patula*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e obtiveram resultados conforme os descritos na Tabela 3. A dimensão dos corpos de prova foi de 2,5 x 2,5 x 41,0 cm e os ensaios foram realizados conforme a norma (ASTM, 2014).

Tabela 3: Médias de módulos de elasticidade encontrados para três espécies de pinus.

Módulo de elasticidade	Número de repetições	Médias de módulo de elasticidade (MPa)	Tensão limite proporcional (MPa)
<i>Pinus elliottii</i>	24	5.288	22,5
<i>Pinus patula</i>	23	7.430	22,2
<i>Pinus taeda</i>	25	6.329	21,4

Fonte: Eleotério; Melchiorretto (2003), adaptado pelos autores.

Moritani (2018) sugeriu classes de resistência para peças estruturais de madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*. Na avaliação de *Pinus taeda*, a autora encontrou o módulo de elasticidade médio de 7.413 MPa, na de *Eucalyptus urograndis*, 11.950 MPa e na de *Schizolobium amazonicum*, 9.010 MPa.

Em um estudo sobre a avaliação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinus taeda* por ultrassom, Ballarim e Nogueira (2005) mostraram o valor médio da madeira adulta realizado do ensaio da compressão paralela às fibras de 13.376 MPa. Comparando este resultado com o valor médio (13.304) apresentado para a mesma espécie na ABNT (1997), isso demonstra uma boa proximidade dos resultados.

Zangiaco, Christoforo e Rocco Lahr (2013) analisaram o módulo de elasticidade de “peças estruturais”, ou seja, aquelas que apresentavam comprimentos e/ou diâmetros compatíveis com as dimensões empregadas em estruturas de construção civil e de “corpos de prova”. Foram obtidos valores para a flexão estática de 9.594 MPa e 7.724 MPa, e nos ensaios de compressão paralela às fibras de 8.077 MPa e 11.596 MPa, respectivamente. De fato, pode-se destacar que o valor do módulo de elasticidade depende do tipo de ensaio mecânico realizado.

Já Moya e Baño (2017) avaliaram o módulo elástico do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* de rápido crescimento, a partir de testes de compressão e de flexão. Nos testes de compressão, foram encontrados resultados para o módulo de elasticidade longitudinal de cerca de metade do valor médio (13.000 MPa) apresentado no *Wood Handbook* (KRETSCHMANN, 2010) para as mesmas espécies. Os autores salientaram que estes resultados poderiam ser atribuídos à presença de madeira juvenil observada na maioria das amostras.

2.3 Resistência da madeira à compressão normal às fibras

A resistência à compressão normal às fibras ($f_{wc,90}$ ou f_{c90}) é o valor tradicional calculado pela deformação específica residual de 2%, obtida em um ensaio de compressão constante em corpos de prova prismáticos (ABNT, 1997).

As espécies de madeira de classe das coníferas são compostas, sobretudo, por traqueídeos, raios medulares. Estes últimos têm o papel de condução de seiva. Os traqueídeos são células alongadas que compõem a maior proporção da madeira das coníferas, ente 90% e 95%, com extensão entre 1 mm e 4 mm e diâmetro médio entre 35 μm e 45 μm (KLOCK; ANDRADE, 2013), sendo os responsáveis principais pela resistência mecânica da madeira.

Dias (1994) desenvolveu um estudo da caracterização da madeira à compressão normal às fibras para fixar a geometria do corpo de prova, no qual foram realizados ensaios para avaliar a influência de alguns fatores geométricos (altura e comprimento) e a medição de deformações que podem ter influência nos resultados adquiridos nos ensaios. Primeiramente, foi mantida a largura dos corpos de prova constante igual a 50 mm, nominalmente. E para o comprimento, foram variados valores nominais iguais a 50 mm, 100 mm e 150 mm. Com base nesse estudo, o autor concluiu que:

- O fator altura do corpo de prova e as formas de medição das deformações empregadas têm maior influência do que o comprimento do corpo de prova, embora este fator também altere, de forma significativa, os valores de deformações;
- Referente ao comprimento do corpo de prova, deve ser considerado igual à largura, de modo a diminuir a interferência deste fator nos ensaios;
- A medida de deformações em toda a extensão dos corpos de prova provoca maiores distorções nos resultados, em função de eventuais irregularidades na superfície de aplicação das cargas destes, em relação à leitura de deformações em uma parte central apenas.

A compressão normal às fibras pode ser estimada com base na compressão paralela às fibras da madeira, pois a compressão paralela às fibras da madeira é reconhecida como a propriedade mecânica de referência pela NBR 7.190 (ABNT, 1997), porque, a partir dela, podem-se determinar outras propriedades mecânicas. Baseando-se nessa afirmação, foi considerada a compressão normal às fibras a uma estimativa equivalente a 25% da compressão paralela às fibras.

Zylkowski (2002) estudou as propriedades mecânicas de 24 espécies de coníferas, em que foi apresentada a compressão normal às fibras das coníferas, que oscilou entre 1,32 MPa e 5,54 MPa, enquanto os valores referentes à resistência à compressão normal às fibras para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* foram, respectivamente, 4,55 MPa e 4,66 MPa.

Kretschmann (2010), em seu trabalho sobre as propriedades mecânicas da madeira, apresentou a resistência à compressão normal às fibras nas espécies de gênero *Pinus*, que oscilou entre 1,3 MPa e 7,0 MPa, com deformações de 430 mm a 860 mm.

Kretschmann *et al.* (1997) estudaram o efeito da madeira juvenil na resistência ao cisalhamento e à compressão normal às fibras para *Pinus taeda*. Os autores dimensionaram os corpos de prova seguindo as cinco orientações: 0° (paralelo às fibras), 22,5°, 45,0°, 67,5° e 90,0° (normal às fibras). Encontraram deformações médias de 1 mm para a orientação de 90,0°. Já os valores de compressão normal às fibras variaram entre 11,09 MPa e 8,32 MPa.

Kevarinmaki (1992) realizou uma avaliação sobre a resistência de *Picea abies* na compressão normal às fibras e com a área de suporte reforçada de pregos. Na área de suporte sem reforço, a resistência à compressão normal atingiu 4,9 MPa para uma deformação de 10 mm com uma densidade de 395 kg m⁻³.

Brandner (2018) avaliou a resistência à compressão normal na madeira de *Picea abies* com teor de umidade de 12% seguindo a norma Europeia EN 408. A pesquisa obteve valores entre 3,26 MPa e 3,87 MPa variando a área de aplicação de carga. Esta resistência pode ser considerada satisfatória, tendo como parâmetros os requerimentos da norma empregada para a realização deste estudo.

A ISO (2014) apresentou classes de resistência dos elementos estruturais das espécies de *softwood* (entre S10 e S40), em que a avaliação da resistência à compressão normal às fibras oscilou entre 2 MPa e 5 MPa. Na alocação de uma classe de resistência de espécie de madeira, foi utilizado como critério que os valores característicos das propriedades primárias devem ser maiores ou iguais aos valores da classe a ser enquadrada.

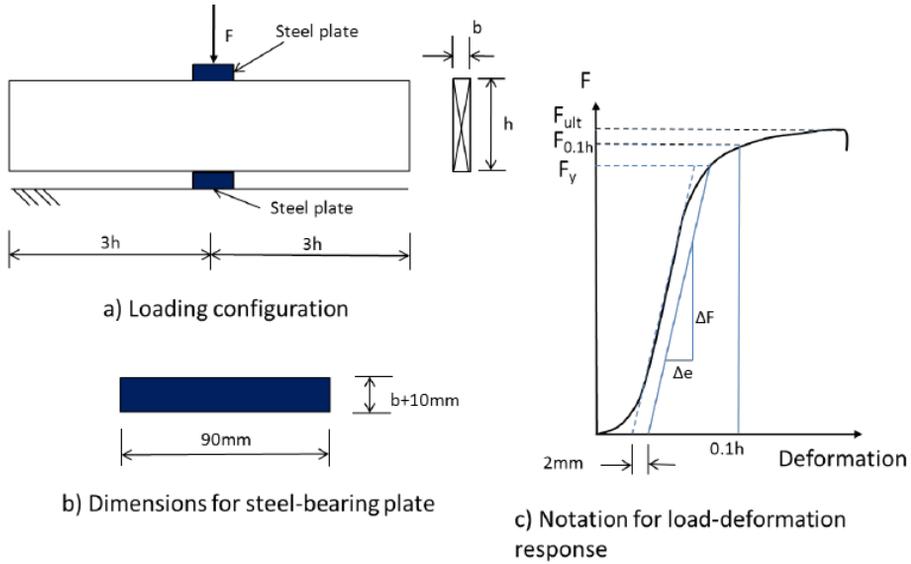
No mesmo sentido, a Norma Europeia – EN (2012) classificou a resistência das peças estruturais para espécies de *softwood* de C14 a C50, em que a estimativa da resistência à compressão normal às fibras ficou entre 2 MPa e 3,2 MPa. Isso mostra uma proximidade dos resultados das avaliações, o que permite o dimensionamento correto dos elementos estruturais, respeitando o limite requerido por norma.

3 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO NORMAL

3.1 ISO 13910:2013

A Norma ISO (2013) apresentou a configuração de teste para resistência à compressão e rigidez normal às fibras, que deve ter a dimensão para placa de rolamento de aço 90 mm X b+10 mm (Figura 3).

Figura 3: Configuração da carga e diagrama de deformação para obtenção da resistência à compressão e rigidez perpendicular às fibras.



Fonte: ISO (2013).

A força de compressão $f_{c,90}$ será calculada considerando a menor das duas forças, conforme pode ser observado nas equações 2 e 3; e o limite de plastificação deve ser calculado conforme a Equação 4.

$$f_{c,90} = F_{ult}/90b \quad \text{Eq. 2}$$

$$f_{c,90} = F_{0.1h}/90b \quad \text{Eq. 3}$$

$$f_{c,90y} = F_y/90b \quad \text{Eq. 4}$$

$$K_{c,90} = (\Delta F/\Delta e)/90b \quad \text{Eq. 5}$$

Onde F_{ult} é o valor da carga aplicada no estado limite último (carga final); $F_{0.1h}$ é a carga em uma deformação de 0.1h mm; F_y é a carga na interseção de uma linha paralela à inclinação elástica do gráfico de deformação de carga e deslocamento por 2 mm, conforme mostrado na Figura 3; $K_{c,90}$ é a rigidez à compressão perpendicular às fibras, calculada a partir da Equação 5; e $\Delta F/\Delta e$ é a inclinação elástica do gráfico carga-deformação.

3.2 COPANT (1972)

A Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT, 1972) destacou que os procedimentos devem ser seguidos para os ensaios a compressão perpendiculares às fibras. A amostra deve ser centralizada na base do aparelho, de modo que a força seja aplicada sobre a face radial. A pressão da chapa deve ser colocada sobre o corpo de prova, perfeitamente centralizada com a amostra e nas extremidades dos braços e repousa sobre o cilindro basculante, um dos quais opera o deflectômetro. Durante todo o teste, a velocidade deve ser mantida constante em 0,3 mm/min. Precisa de uma pressão de penetração e a probabilidade de uma profundidade de 2,5 mm, instante em que cessa o ensaio.

Na expressão dos resultados do ensaio, a COPANT (1972) estipula que, com os valores adquiridos do ensaio, é construído um gráfico no qual o ponto em que a parte reta termina e a parte curva da mesma começa. Este ponto corresponde à carga até o limite proporcional. Além disso, é determinado o ponto correspondente à carga máxima, ou seja, a carga utilizada para obter a penetração de 2,5 mm.

A resistência ao limite proporcional e a resistência máxima da unidade devem ser calculadas com os dados da planilha, aplicando as equações 6 e 7:

$$RLP = P_1/S \quad \text{Eq. 6}$$

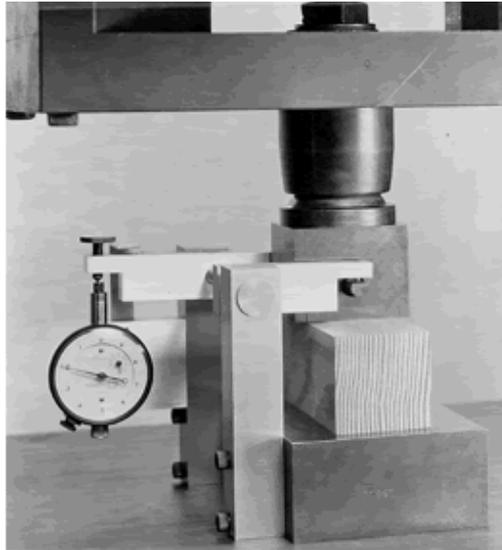
$$RUM = P/S \quad \text{Eq. 7}$$

Onde RUM é a resistência unitária máxima (kgf/cm²); P é a carga utilizada para obter a penetração de 2,5 mm (kgf); RLP é a resistência ao limite proporcional (kgf/cm²); P₁ é a carga ao limite proporcional (kgf); S é a superfície impressa sobre o corpo de prova pela peça de pressão (cm²).

3.3 ASTM D143

A American Society for Testing and Materials (ASTM, 2014) orienta que os testes de compressão perpendicular às fibras sejam realizados com amostras de 50 × 50 × 150 mm (largura x altura x comprimento). A acomodação do corpo de prova na máquina de ensaio deve ser realizada conforme a Figura 4.

Figura 4: Conjunto de teste de compressão perpendicular às fibras, mostrando o método de aplicação de carga e medição de deformação por meios de compressômetro.



Fonte: ASTM (2014).

As curvas de carga-compressão devem ser realizadas para todas as amostras com compressão de até 0,1 pol. (2,5 mm), após o que o teste deve ser interrompido. A compressão deve ser medida entre as superfícies de carga. As deformações devem ser registradas usando dispositivos de medição de deslocamento capazes de pelo menos gerar uma classificação.

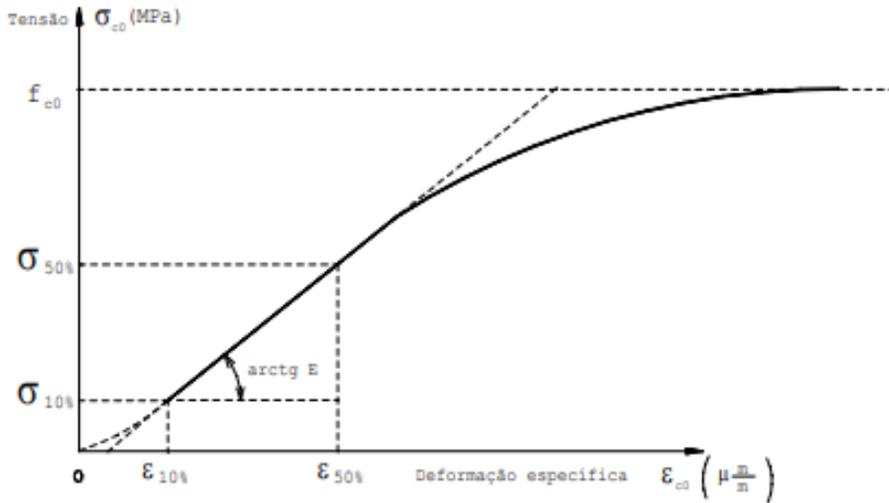
As amostras devem ser colocadas de modo que a carga seja aplicada através da placa de suporte a uma superfície radial. Em referência à velocidade de teste, a carga deve ser aplicada continuamente ao longo do ensaio a uma velocidade de movimento da cruzeta móvel de 0,012 pol. (0,305 mm/min).

3.4 NBR 7.190:1997

A NBR (1997) define resistência à compressão normal às fibras como o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 0,2%, observado na Figura 5, obtida em ensaio de compressão uniforme de corpos de prova prismáticos.

A rigidez da madeira na direção normal às fibras deve ser determinada por ser seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, conforme indicado na Figura 5.

Figura 5: Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez da madeira na direção normal às fibras.



Fonte: ABNT (1997).

Neste caso a ABNT (1997) recomenda que a velocidade de carregamento seja aplicada a 10 MPa/min e o carregamento deve ser realizado em dois ciclos de carga.

3.5 Comparação entre os resultados dos ensaios ISO 13910 e a Norma NBR 7.190

Existem algumas normas que avaliam a resistência mecânica de madeira. Dentre elas, pode-se destacar a ISO (2013) e ABNT (1997). Estas duas têm em comum a mesma condição-padrão de teor de umidade ($U = 12\%$) e mesma formulação para determinar a resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$), conforme pode ser visto na Equação 7. Além disso, elas possuem a mesma equação para determinar o módulo de elasticidade na direção normal às fibras ($E_{c,90}$), que, avaliado no ensaio de compressão normal às fibras, pode ser descrito conforme a Equação 8.

$$f_{c,90} = F_{c,90,max} / A \quad \text{Eq. 7}$$

$$E_{c,90} = (F_{40} - F_{10})h_0 / (W_{40} - W_{10})bL \quad \text{Eq. 8}$$

Onde $F_{c,90,max}$ é a carga maximal; A é a área da seção; $F_{40} - F_{10}$ é o incremento de carga na porção reta da curva carga-deformação; F_{10} será 10% de $F_{c,90,max}$; F_{40} será 40% de $F_{c,90,max}$; $W_{40} - W_{10}$ é o incremento de deformação correspondente a $F_{40} - F_{10}$.

Dentre as diferenças destas duas normas, pode-se citar o módulo de elasticidade E_{w0} na direção paralela às fibras, que é avaliado no ensaio de compressão paralela às fibras, e o módulo de elasticidade (E_{w90}) na direção perpendicular às fibras, que é calculado no experimento de compressão normal às fibras (ABNT, 1997), conforme a Equação 7. Além disso, o valor da resistência à compressão normal às fibras equivale aproximadamente a 25% do valor da compressão paralela às fibras, de acordo com a Equação 8. No entanto, a Norma ISO (2013) não apresenta essas duas relações que possibilitam a avaliação de E_{w90} e F_{c90} na falta de ensaios mecânicos.

$$E_{w90} = 1/20 E_{w0} \quad \text{Eq. 7}$$

$$F_{c,90} K / F_{c0,K} = 0,25 \quad \text{Eq. 8}$$

Onde $F_{c90,k}$ é a resistência característica a compressão normal às fibras; $F_{c0,k}$ é a resistência característica a compressão paralela às fibras.

Além disso, existe diferença referente à dimensão dos corpos de prova. A norma ABNT (1997) propõe no ensaio de compressão normal às fibras que o corpo de prova deve ter forma prismática, com seção transversal quadrada na direção longitudinal de 5,0 cm de comprimento; na direção radial de 5,0 cm de largura, e na direção tangencial, de 10 cm de altura. Enquanto na ISO (2013) o corpo de prova deve ter as dimensões de 70 mm × 45 mm × 90 mm (comprimento x base x altura), onde a dimensão da altura está na direção da carga aplicada.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O gênero *Pinus* possui anéis de crescimento visíveis a olho nu, característica que pode ser utilizada como um indicador de densidade da madeira. A densidade desta espécie pode variar entre baixa e média. Ressalta-se que existe uma grande relação da densidade com as demais propriedades mecânicas, entre elas o módulo de elasticidade e a compressão normal às fibras. Isso implica que densidade baixa proporciona, geralmente, resistência mecânica baixa. Em relação ao módulo de elasticidade, quanto mais juvenil for o lenho de crescimento, menor será a rigidez da madeira, e este fenômeno ocorre opostamente para o lenho adulto. A compressão normal às fibras pode ser calculada baseando-se na compressão paralela às fibras da madeira, quando for conhecida. Os resultados obtidos da compressão normal às fibras dependem da norma seguida para a realização do ensaio.

Referências

ALMEIDA, D. H.; SACALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, D. L.; ROCCO LAHR, A.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 203-207, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100020>

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL – ASTM. **D245-06**. Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. *West Conshohocken*, PA. 2011.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL – ASTM. **D143-14**. Standard test methods for small clear specimens of timber. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7.190**: Projeto de estruturas de madeiras. Rio Janeiro, 1997.107p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ULTRA-SOM. **Agricultural Engineering**, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100003>

BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014>

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing provisions for structural

timber products, design and recommendations. **Engineering Estruture**, v. 171, p. 944-960, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.076>

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus* sp. **Pan American Conference for Nondestructive Testing Panndt**, Rio Janeiro, 2003.

CARREIRA, R. C.; DIAS, A. A.; CALIL JR, C. Proposta de método para classificação visual estrutural de coníferas. **MADEIRA: Arquitetura e Engenharia**, v. 5, n. 13, p. 1-24. 2004.

CARDOSO, A.; MOYA, L.; BORGES, A. Prediction of the bending stiffness of uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistical techniques. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 755-768, 2019.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT**. Maderas: Método de determinación de la compresión perpendicular al grano. 466 p. 1972

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; SATANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; TREVISAN, R. Qualificação da madeira de três espécies de coníferas oriundas de reflorestamentos jovens. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 477-484, 2013.

DIAS, A. A. **Estudo da solicitação de compressão normal às fibras da madeira**. 161 p. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1994.

ELEOTÉRIO, J. R.; MELCHIORETTO, D. Caracterização, classificação e comparação entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus patula*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 18., **Anais** [...]. Universidade Regional de Blumenau, 2003.

ERNESTO, L.; BARRICHELO, G. Variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* var. hondurensis. **EPEF**. 1979.

EUROPEAN STANDAR. **EN 338**. Structural timber- strength graded structural timber with retangular cross section. Madrid. 2013.

FERREIRA, A. T. B.; FILHO, M. T. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. hondurensis Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 287-298, 2009.

FREITAS, R. R. **Classificação de peças estruturais de *Pinus* spp. pela MSR (Machine Stress Rate)**. 146 p. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

HOUAISS, A. VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. M. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2017**. Brasil, 2017. 80 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **FDIS 13910 2013: N810** Timber structures - Strength graded timber - Test methods for structural properties. Revision: Oct 2013.docx Basic template BASICEN3 2002- 06-01.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 16598. Timber structures. Structural classification for sawn timber. Switzerland. 2014.

KEVARINMAKI, A. Strength of finnish softwoods in compression perpendicular to grain and reinforcement of support areas with nail plates. **Rakenteiden Mekaniikka**, v. 25, n. 1, p. 36-52, 1992.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba: UFPR, 2013. 85 p. (Manual didático).

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 291 p. 2000. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2000.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede e *Pinus caribaea* var. hondurensis Barr e Golf**. 143 p. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1989.

KRETSCHMANN, D. E.; GIFFORD, O.; DRIVE, P. Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for loblolly pine. *In*: Proceedings of the CTIAUFRO International Wood Quality Workshop Timber Management Toward Wood

Quality and Product Value, n. 1, p. 23-30, 1997. Disponível em: <http://128.104.77.228/documnts/pdf1997/krets97b.pdf>. Acesso em: 16 Set. 2019.

KRETSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. Lumber stress grades and design properties. *In: Forest Products Laboratory, Wood handbook: wood as engineering material*. FPL-GTR-113. WI: U. S. Department of Agriculture: Madison, 1999. p. 6-1/6-14.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. *In: United States Department of Agriculture, FOREST SERVICE, Forest Products Laboratory, USDA, Wood handbook - Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, 508 p. 2010.

LADEIRA, L. A.; PEREIRA, C. C. A.; COUTO, L. C.; REIS, A. B. Determinação das propriedades físicas da madeira de *Pinus* sp. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 7, Edição Especial, p. 2244-2251, 2018.

LOBÃO, M. S.; LUCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014>

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIELDER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) nativa e de reflorestamento. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 373-380, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200019>

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; GATTO, D. A.; CATEGARI, L. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010. <http://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a515>

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Densidade da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede no sentido longitudinal dos caules. **Cerne**, v. 5, n. 1, 2001.

MORAES, M. L. T.; MISSIO, R. F.; SILVA, A. M.; CAMBUIM, J.; SANTOS, L. A.; RESENDE, M. D. V. Efeito do desbaste seletivo nas estimativas de parâmetros genéticos em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. hondurensis. **Scientia Forestalis**, n. 74, p. 55-65, 2007.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: UFPR, 2012. 169 p. (Manual didático).

MORITANI, F. Y. **Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*** (Paricá). 178 p. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2018.

MOYA, L.; BAÑO, V. Elastic behavior of fast-growth Uruguayan pine determined from compression and bending tests. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 5896-5912, 2017.

MUNIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. *Pinus taeda* L.** 252 p. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, PR, 1993.

NUTTO, L.; MACHADO, S. A.; CAVALHEIRO, R.; SILVA, L. C. R. Comparação de metodologias para medição de anéis de crescimento de *Mimosa scabrella* e *Pinus taeda*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 135-144, 2012.

PINHEIRO, R. V. **Emprego da madeira de gênero pinus na construção de estruturas de cobertura**. 185p. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 1996.

RALL, R. **Influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L.** 86 p. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônomicas) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP, 2006.

RALL, R. **Processamento de imagens digitais para detecção e quantificação de defeitos na madeira serrada de coníferas de reflorestamento de uso não estrutural**. 128 p. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Agrônomicas) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP, 2010.

SANTOS, N. **Influência da largura dos anéis de crescimento em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus caribaea***. 29 p. 2015. Monografia (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

SANTOS, C. V. F. **Métodos de ensaios para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de *Pinus* spp.** 82 p. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2016.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado.** 163 p. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná. Curitiba, PR, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. *In*: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24. 1991, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABTCP, 1991. p. 178-183.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades visando sua utilização na indústria moveleira.** 160 p. 2002. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

SOARES FILHO, M. P. **Anatro UFPR – Software para análise de tronco, em meio digital, utilizando sistema polar.** 122 p. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná. Curitiba, PR, 2014.

SOCIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS – SIF. **Métodos de Determinação da densidade de madeira.** Boletim técnico, v. 1. Universidade Federal Viçosa, Viçosa, MG. 1984

STOLF, D. O. **Tenacidade da madeira.** 131 p. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2000.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de *pinus* tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos.** 554 p. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012.

ZANGIACOMO, A. L.; CHRITOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Avaliação do módulo de elasticidade de peças estruturais roliças e de corpos-de-prova de *Pinus elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 283-291, 2013.

Índice

A

Anéis de crescimento 148, 150, 152, 155, 163
Ângulo microfibrilar 86

B

Biodegradabilidade 60
Biomaterial 61
Biopolímeros 43, 47, 61

C

Carbono 106
Caseína 90
Celulose 19, 27, 45, 60
Combustível 90
Compósito 21, 27, 42, 60
Compósitos 85, 88
Corta-fogo 115

D

Decks 25, 27, 114
Deformação elástica 155
Deformação potencial 131
Deformações 103, 157, 161
Densidade 17, 21, 22, 88, 154
Desplacamento 103

Deterioração 27

Diamônio 112

Drenabilidade 52

E

Enfeltramento 152
Extrusão 22

F

Filme nanocelulósico 53
Fogo 91

H

Hidrolítica 48

I

Incêndio 25, 91, 102, 105, 109
Isolamento 48, 107, 128

L

Lignina 53, 59, 106

M

Madeira juvenil 153, 156
Madeira laminada colada 125

Madeira laminada cruzada 128
Madeira plástica 21, 24, 32
Materiais lignocelulósicos 84
Microfibrilamento 53
Monoamônio 112

N

Nanocelulose 49, 56, 59
Nanocompósitos 43, 55
Nanocristais 57
Nanocristais de celulose 44
Nanocristalina 49
Nanoscala 56
Nanofibras 50, 52
Nanofibrilada 49
Nanomateriais 51
Nanopapéis 51
Nanopartículas 49, 56
Não intumescentes 109, 110

O

Opacidade 52, 55

P

Painéis 86

Pinus 19, 58, 131, 156
Plastic Lumber 25
Plásticos 18, 19
Pó de serragem, 18
Polímeros 28, 44, 55, 114
Pré-fabricadas 148

R

Reciclagem 20
Resíduos 19, 21, 87
Resíduos termoplásticos 18
Resistência 17, 87
Retardantes de fogo 112

S

Sustentabilidade 22, 50, 141, 149

T

Tenacidade 88, 154

V

Viscosidade 90

W

Wood Plastic Composites 24

Sobre os organizadores

FABRICIO GOMES GONÇALVES

É Engenheiro Florestal pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (1998). Possui especialidade em Mudanças Globais e Desenvolvimento Sustentável pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1999), mestrado em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo (2006) e doutorado em Ciências pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (2012). É Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo desde 2010.

WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE

É Engenheiro Agrônomo (2000) pela Universidade Federal de Viçosa (2000). Possui mestrado (2002) e doutorado (2005) em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. É Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo desde 2009.

PEDRO GUTEMBERG DE ALCÂNTARA SEGUNDINHO

É Engenheiro Civil pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2002). Possui mestrado em Engenharia Civil (Área: Estruturas) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2005) e doutorado em Ciências (Área: Estruturas) pela Universidade de São Paulo (2010). É Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo desde 2011.

JUAREZ BENIGNO PAES

É Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (1984). Possui especialização em Metodologia do Ensino Superior pela Universidade Federal de Viçosa (1992) e em Desenvolvimento Sustentável para o Semi-Árido Nordeste pela Universidade Federal da Paraíba (1999), mestrado em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná (1991) e doutorado em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (1997). É Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo desde 2009.

Sobre os autores

ANNA CLARA THEODORO NANTET é discente de Engenharia Florestal na Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: annaclaranantet15@hotmail.com

ANANIAS FRANCISCO DIAS JÚNIOR é Engenheiro Florestal (2013) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e Doutor (2017) em Ciências Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP/ESALQ. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: ananiasjuniorr@gmail.com

BÁRBARA MARIA MATEUS GONÇALVES é Engenheira Química (2017) pela Universidade Federal do Espírito Santo e mestra do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na mesma universidade. E-mail: barbarammateus@hotmail.com

ELAINE CRISTINA LENGOWSKI é Engenharia Industrial Madeireira (2010) com mestrado (2012) e doutorado (2016) em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná. Atualmente é Professora na Universidade Federal de Mato Grosso. E-mail: elaine-lengowski@gmail.com

ÊMILLY SOARES GOMES DA SILVA é Engenheira Florestal (2018) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, Campus Salinas. Atualmente é doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: emillysoaresgomes@gmail.com

FABRICIO GOMES GONÇALVES é Engenheiro Florestal (1998) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com especialização em Mudanças Globais e Desenvolvimento Sustentável pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1999). Possui mestrado (2006)

em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo e doutorado (2012) em Ciências pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: fabricio.goncalves@ufes.br

JAQUELINE ROCHA DE MEDEIROS é Engenheira Florestal (2018) pela Universidade Federal de Campina Grande, mestra em Ciências Florestais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo, e doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: jaquelinerocha256@gmail.com

JUAREZ BENIGNO PAES é Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (1984), com especialização em Metodologia do Ensino Superior pela Universidade Federal de Viçosa (1992) e especialização em Desenvolvimento Sustentável para o Semi-Árido Nordeste pela Universidade Federal da Paraíba (1999). Possui mestrado em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná (1991) e doutorado (1997) em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (1997). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: juarez.benigno@pq.cnpq.br

LEONOR DA CUNHA MASTELA é Engenharia Civil (2003) pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Possui mestrado em Engenharia Civil (2004) pela Universidade Federal Fluminense. Atualmente é doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: leomastela@yahoo.com.br

LORENZO LUBE DOS SANTOS é Engenheiro Industrial Madeireiro (2011) e mestre em Engenharia Civil (2014) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Possui doutorado em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor no Centro Universitário FAESA. E-mail: lorenzolube@yahoo.com.br

NAYARA FRANZINI LOPES é Engenheira Florestal (2016) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com mestrado (2019) em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. Atualmente é doutoranda em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: nayaraflopes@hotmail.com

PEDRO ALCÂNTARA GUTEMBERG SEGUNDINHO é Engenheiro Civil (2002) com mestrado em Engenharia Civil (2005) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Possui doutorado (2010) em Ciências pela Universidade de São Paulo. Atualmente é

Professor Associado da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: p_gutenberg2001@yahoo.com.br

RAFAEL GONÇALVES ESPÓSITO DE OLIVEIRA é Engenheiro Industrial Madeireiro (2016) com mestrado (2018) em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. Atualmente cursa doutorado em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: rafaeldeoliveira077@gmail.com

RAYNORD MAYARD é Engenheiro Civil (2015) pela Universidade Federal de São Carlos com mestrado em Ciências Florestais (2020) pela Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: raynord2006@yahoo.fr

REJANE COSTA ALVES é Engenheira Industrial Madeireira (2010) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Possui mestrado (2012) e doutorado (2017) em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é Professora Adjunta da Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: rejane.alves@ufes.br

RENATO AUGUSTO PEREIRA DAMÁSIO é Engenheiro Florestal (2013) com mestrado em Ciência Florestal (2015) pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é pesquisador na Klabin S/A. E-mail: damasiorenato@gmail.com

WALTER TOREZANI NETO BOSCHETTI é Engenheiro Industrial Madeireiro (2011) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Possui mestrado em Ciências Florestais (2014) pela Universidade Federal do Espírito Santo e doutorado em Ciência Florestal (2017) pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: walterboschetti@gmail.com

WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE é Engenheiro Agrônomo (2000) pela Universidade Federal de Viçosa (2000). Possui mestrado (2002) e doutorado (2005) em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. É Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo desde 2009. E-mail: wendelandrade@hotmail.com

YONNY MARTINEZ LOPEZ é Engenheiro Florestal (2003) e doutor pela Universidade de Pinar del Río, Cuba (2014). Foi professor da Universidade de Guantánamo, Cuba (2016) e pesquisador na Universidade Federal do Espírito Santo com pós-doutorado em Ciências Florestais na mesma universidade (2018). Atualmente é professor na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. E-mail: yohnkar@gmail.com

