

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO – UNISAGRADO**

**BIANCA GOMES MANSON DEZEMBRO**

**NANOCELULOSE: ENTENDIMENTO E ESTUDO COM ÊNFASE NA  
FABRICAÇÃO DE PAPEL**

**BAURU**

**2023**

BIANCA GOMES MANSON DEZEMBRO

**NANOCELULOSE: ENTENDIMENTO E ESTUDO COM ÊNFASE NA  
FABRICAÇÃO DE PAPEL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte dos requisitos  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Química - Centro Universitário  
Sagrado Coração. Orientador: Prof. Dr.  
Marcelo Telascrêa

BAURU

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com  
ISBD

D532n	<p>Dezembro, Bianca Gomes Manson</p> <p>Nanocelulose: entendimento e estudo com ênfase na fabricação de papel / Bianca Gomes Manson Dezembro. -- 2023. 34f. : il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Telascrêa</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO - Bauru - SP</p> <p>1. Nanocelulose. 2. Nanotecnologia. 3. Fabricação de Papel. 4. Celulose. 5. Papel. I. Telascrêa, Marcelo. II. Título.</p>
-------	--

BIANCA GOMES MANSON DEZEMBRO

NANOCELULOSE: ENTENDIMENTO E ESTUDO COM ÊNFASE NA FABRICAÇÃO  
DE PAPEL

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte dos requisitos  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Química - Centro Universitário  
Sagrado Coração.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

Banca examinadora:

---

Prof.º Dr. Marcelo Telascrêa  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof.ª Dra. Beatriz Antoniassi Tavares  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof.º Dr. Herbert Duchatsch Johansen  
Centro Universitário Sagrado Coração

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer ao apoio de meus pais, Cristina e Sidney, ao longo da minha jornada acadêmica, incentivando, apoiando e encorajando, além de assumirem responsabilidades extras para que esse objetivo fosse alcançado, sempre com muito amor. Também gostaria de agradecer as minhas irmãs, Taysa e Brenda, pela inspiração no âmbito acadêmico, sempre me guiando nos obstáculos e desafios através de conversas, sugestões e ensinamentos.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Marcelo Telascrêa, pela sua assistência excepcional ao longo desse processo. Sua orientação clara, disponibilidade, estímulo a desenvolver ideias e sua expertise acadêmica, foram fundamentais para a conclusão deste projeto. Além disso, gostaria de agradecer a todos os professores que me acompanharam durante a trajetória do curso e compartilharam os seus conhecimentos e experiências, sou grata pelo apoio.

Por fim, não posso deixar de mencionar a contribuição e assistência de meus amigos que me acompanharam ao longo dessa jornada acadêmica, Gabriel, Lauro, Luana, Maria Carolina e Rafael. O apoio moral, colaboração e incentivo de vocês foram essenciais para a finalização deste trabalho e à conclusão dessa graduação. Aos amigos de longa data, Higino, Kezya e Tamires, gostaria de agradecer por sua constante amizade e apoio.

## RESUMO

Nos últimos anos, a nanocelulose tem sido objeto de crescente interesse e investigação acadêmica e industrial devido a sua relevância para a estruturação de propriedades físicas e químicas de diversos materiais. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo e entendimento na aplicação da nanocelulose no processo de fabricação de papel, desde a obtenção da celulose, utilização da NC em aditivos e materiais intermediários e sua aquisição por meio da reciclagem de papel, suas vantagens e limitações. A metodologia utilizada baseia-se por meio de uma revisão bibliográfica de periódicos encontrados relacionados ao tema com uma abordagem de métodos mistos com enfoque em qualitativas e quantitativas. A análise dos resultados obtidos indicou que a aplicação da nanocelulose se mostra eficazes e satisfatórias, porém há limitações que devem ser estudadas antes de sua aplicação, como o custo-benefício e processo reverso do desejado se administrado em quantidades inadequadas.

Palavras-chave: Nanocelulose. Nanotecnologia. Fabricação de Papel. Celulose. Papel.

## **ABSTRACT**

In recent years, nanocellulose has been the subject of increasing interest and academic and industrial investigation due to its relevance for structuring the physical and chemical properties of various materials. The present work aims to present a study and understanding of the application of nanocellulose in the paper manufacturing process, from obtaining cellulose, using NC in additives and intermediate materials and its acquisition through paper recycling, its advantages and limitations. The methodology used is based on a bibliographical review of periodicals found related to the topic with a mixed methods approach focusing on qualitative and quantitative. The analysis of the results obtained indicated that the application of NC is effective and satisfactory, however there are limitations that must be studied before its application, such as cost-benefit and the reverse process of what is desired if administered in inadequate quantities.

Keywords: Nanocellulose. Nanotechnology. Papermaking. Cellulose. Paper.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Constituição de uma fibra natural.....	17
Figura 2 - Principais rotas de obtenção da celulose.....	18
Figura 3 - Micrografias representativas dos três tipos diferentes de nanocelulose: (a) NFC (reproduzido da ref. 8, <i>Copyright</i> (2018) com permissão da <i>Elsevier</i> ), (b) NCC (reproduzido da ref. 9, com permissão da <i>Elsevier</i> ), e (c) BNC (reproduzido da ref. 10, com permissão de <i>The Royal Society of Chemistry</i> ).....	20
Figura 4 - Fases de preparação da polpa de celulose .....	23
Figura 5 - Imagens SEM de papel de superfície reforçado a sem CNF, b com CNF, c com CNF modificado e seção transversal de d sem CNF, e com CNF e f com CNF 28	
Figura 6 - Micrografia eletrônica de nanocelulose extraída de diferentes tipos de resíduos de papel. (a) SEM de CNC isolado de jornal. Reimpresso (adaptado) de Takagi et al. (2013). Direitos autorais 2013 SAGE. (b) TEM de CNC isolado de OWP. Reimpresso (adaptado) de Diop e Lavoie (2016). <i>Copyright</i> 2016 <i>Springer Nature</i> . 30	
Figura 7 - (A) Papel sem nanofibrilas a 0% (B) Papel com nanofibrilas a 16%. .....	31



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Linha do tempo da utilização do papel como suporte de escrita.....	22
Tabela 2 - Classificação e usos dos tipos de celuloses utilizados na manufatura do papel .....	24
Tabela 3 - Ranking dos maiores produtores de celulose do mundo em 2020.....	25
Tabela 4 - Ranking dos maiores produtores de papel do mundo em 2020. ....	25
Tabela 5 - Propriedades dos papéis.....	26
Tabela 6 - Propriedades físicas dos papeis sem e com adição de nanofibrilas. ....	31
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos papeis sem e com adição de nanofibrilas. ....	32

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	METODOLOGIA.....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
3.1	NANOTECNOLOGIA.....	15
3.1.1	Cenário brasileiro no segmento da nanotecnologia.....	15
3.2	NANOCELULOSE .....	16
3.3	APLICAÇÕES DA NANOCELULOSE .....	21
3.4	MATERIAIS FIBROSOS DE ORIGEM NATURAL.....	21
3.4.1	Cenário brasileiro no segmento de celulose e papel .....	24
3.5	APLICAÇÕES DA NANOTECNOLOGIA EM MATERIAIS FIBROSOS DE ORIGEM NATURAL .....	26
3.5.1	Nanocelulose aplicada como material intermediário na produção de papel 27	
3.5.2	Nanocelulose bacteriana na reutilização para reciclagem de papel .....	28
3.5.3	Nanofibras de celulose de <i>Eucalyptus</i> na produção de papel .....	30
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
5	REFERÊNCIAS .....	34

## 1 INTRODUÇÃO

No período de 2019 mundialmente a sociedade passou por diversas alterações em seu cotidiano devido à pandemia do Covid-19 que afetou diretamente as rotinas individuais e coletivas, influenciando nas produções industriais em todos os setores. As indústrias tiveram então que se readaptar com o novo cenário e buscar alternativas para atender as demandas.

Diante disso, apesar das mudanças a produção de celulose teve um aumento em suas vendas em relação aos anos anteriores. Salamanca (2022) destaca no periódico de um panorama geral realizado em conjunto com o Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Agência Internacional de Energia (IEA) que no Brasil houve um crescimento de 6,6% durante 2020 quando comparado ao ano de 2019, confirmando a preparação das indústrias em captar as necessidades atuais de seus clientes e da rápida estratégia em atendê-los mesmo que em diferentes unidades de manutenção em estoque (*stoke keeping unit*).

O setor de papel no Brasil apresentou uma queda de 2,8% em 2020, principalmente em alguns dos seus maiores segmentos durante o período da pandemia, por conta da movimentação das escolas e escritórios do presencial para o virtual. Apesar disso, embalagens e produtos voltados à higiene pessoal apresentaram um aumento na produção, representando 2,2% no mesmo ano (SALAMANCA, 2022).

Com todas as movimentações dos últimos anos, as indústrias no geral continuam pesquisando inovações tanto nos processos de produção quanto no produto que se deseja obter, visando oferecer maior qualidade e melhor experiência para o cliente, menor valor econômico e maior sustentabilidade na cadeia produtiva. Segundo Cerro (2016, p. 23), “estimativas recentes apontam para uma tendência do aumento da demanda mundial de produtos florestais para energia, celulose e papel, e produtos da madeira sólida e seus derivados”.

Em decorrência disso os estudos sobre a nanotecnologia no setor da celulose veem se destacando principalmente pelos diversos benefícios que são oferecidos aos múltiplos setores em que pode haver a sua aplicação, bem como aos impactos positivos ao meio ambiente.

A nanocelulose (NC) apresenta interesses crescentes por parte das áreas acadêmicas e industriais diante das características apresentadas, como

propriedades mecânicas superiores, renovabilidade, biocompatibilidade e abundância (WEISS, 2019) em encontrar a celulose, que pode ser produzida fisiologicamente pelas plantas e outros seres vivos como fungos, bactérias e algas (ABDUL KHALIL et al., 2014 apud LENGOWSKI; JÚNIOR, 2019).

O termo “nanocelulose” refere-se a materiais celulósicos tendo pelo menos uma das suas dimensões em escala nanométrica (LENGOWSKI; JÚNIOR apud LENGOWSKI et al., 2019). Há três tipos de NC, a celulose nanocristalina (CNC), celulose microfibrilada (CMF) e celulose nanofibrilada (CNF) sendo que suas diferenças estão na dimensão da fibra (LENGOWSKI; JÚNIOR, 2019).

No setor da fabricação de papel a NC se torna um aditivo vantajoso, pois ela consegue ser inserida em pequenos espaços vazios por conta das suas dimensões em escalas nanométricas e tornar mais eficiente os entrelaçamentos entre as fibras durante a fabricação do papel (SILVA et al. 2020 apud POTULSKI, 2014).

A aplicação da NC pode favorecer as fibras de celulose e fazer com que o papel e seus produtos derivados fiquem dotados de propriedades superiores. A adição de NC em bio-aditivo no fluxo produtivo do papel pode gerar características positivas referentes ao desempenho de drenagem, reduzir a perda de fibras finas, resistência à tração, entre outros. Com isso, está havendo uma redução na utilização de aditivos a base de petróleo tanto para fabricação de papel convencional quanto nos especiais, assim como há a introdução das NC nas indústrias e processos de reciclagem de papel, apresentando boa eficiência em fibras recicladas. (LI et al., 2021).

Estudar os avanços da nanotecnologia com ênfase na nanocelulose mostra-se relevante diante do aumento do consumo por tipo de papel e da exportação de celulose não só no Brasil, como em outros países. Observar os efeitos que a NC quando aplicada na fabricação de papel, tanto na estrutura quanto em aditivos utilizados no fluxo produtivo, possibilita compreender o apreço das áreas acadêmicas e industriais em introduzir essa tecnologia em seus processos visando maior qualidade e gerando produtos e processos ambientalmente amigáveis.

Com vistas ao futuro das indústrias produtoras de papel e celulose, questões como o tipo de aplicação, o modo e quando é aplicada a nanotecnologia no processo, precisam ser estudadas e aprofundadas afins de que se sintam confortáveis em realizar novos investimentos e alterações. Nos processos de fabricação de papéis ou aditivos onde a NC é aplicada apresenta resultados

positivos? Se sim, quais alterações ocorrem em suas propriedades físicas e químicas?

O objetivo desse trabalho acadêmico é compreender os avanços da nanotecnologia com a aplicação de NC nas etapas de fabricação de materiais constituído por elementos fibrosos de origem vegetal tanto diretamente quanto indiretamente analisando se oferecem vantagens, qualidades e benefícios, assim como limitações, restrições e desafios.

## **2 METODOLOGIA**

A presente pesquisa foi elaborada mediante revisão bibliográfica e sistemática a respeito da nanocelulose, seu entendimento e aplicação na fabricação de papel, utilizando-se de uma abordagem de métodos mistos com enfoque em qualitativas e quantitativas.

Para a busca de artigos, pesquisas e publicações como fontes de pesquisa, foram empregadas os termos de classificação: celulose, nanotecnologia, nanocelulose, fabricação de papel e fibra natural. Dessa forma, após o estudo e análise de 37 artigos, foram selecionados apenas aqueles relacionados ao tema, chegando a um total de 26 escolhidos para obtenção de informações.

Os critérios utilizados para a inclusão dos artigos e publicações levou em consideração a relevância temática, a ligação direta com o tema nanocelulose na fabricação de papel, abrangendo tópicos referentes a características, propriedades e efeitos. Foi crucial realizar pesquisas de relevâncias globais para a contribuição e solução de problemas através de inovações e descobertas.

Com base nas revisões bibliográficas disponíveis, o tema foi abordado em partes individuais, com intuito de compreender seus aspectos detalhados. Posteriormente, juntamos as partes e analisamos os dados e informações de forma conjunta destacando exemplos de suas aplicações, proporcionando que a pesquisa ofereça uma perspectiva abrangente sobre o assunto, atendendo o objetivo de contribuir com percepções relevantes nessa área de pesquisa.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia é o estudo e entendimento de um sistema em nanoescala (1 nanômetro corresponde a 1 bilionésimo do metro, sendo um metro dividido por um bilhão, logo  $10^{-9}$  metros) onde há a criação de estruturas com alterações em suas organizações que oferecem propriedades e comportamentos diferenciados a materiais habituais. Para essa reestruturação é fundamental que as partículas estejam em escala nanométrica (1 a 100 nm de acordo com a ISO 2019), assim as nanopartículas (NPs) devem ser distintas com as três dimensões externas na escala nanométrica (ANTUNES FILHO; BACKX, 2019).

Considerado o ponto de partida da nanotecnologia, Richard Feynman em 1959 citou o potencial existente nos estudos da escala atômica na conferência para a Sociedade Americana de Física, ou seja, realizar modificações nos espaços vazios nos átomos e moléculas existentes, criando ou modificando estruturas, favorecendo suas características (CARVALHO, 2021). Os primeiros estudos experimentais nesse ramo iniciaram com os pesquisadores Alfred Y. Cho e John Arthur, no ano de 1968, com o desenvolvimento de uma técnica onde eram depositadas camadas atômicas em uma superfície, chamadas então de MBE (*molecular-beam epitaxy*) ou epitaxia por feixe molecular (ANTUNES FILHO; BACKX, 2019). A partir daí outros estudos foram surgindo criando uma consciência global do potencial dessa tecnologia, gerando um ambiente competitivo com a movimentação de recursos humanos e financeiros no campo da ciência e tecnologia assim como na indústria mundial, gerando uma estratégia de interesse mútuo.

##### 3.1.1 Cenário brasileiro no segmento da nanotecnologia

No cenário brasileiro o ponto de partida de inclusão a desenvolvimento e pesquisa em nanotecnologia ocorreu no ano de 2000, com o incentivo do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) com o curso de capacitação oferecido denominado de *First Brazilian Winter School on Nanobiotechnology*, posteriormente houve a edificação do Programa de Nanotecnologia. Nesse sentido, sua finalidade procura contribuir para a criação e desenvolvimento de novos produtos e processo

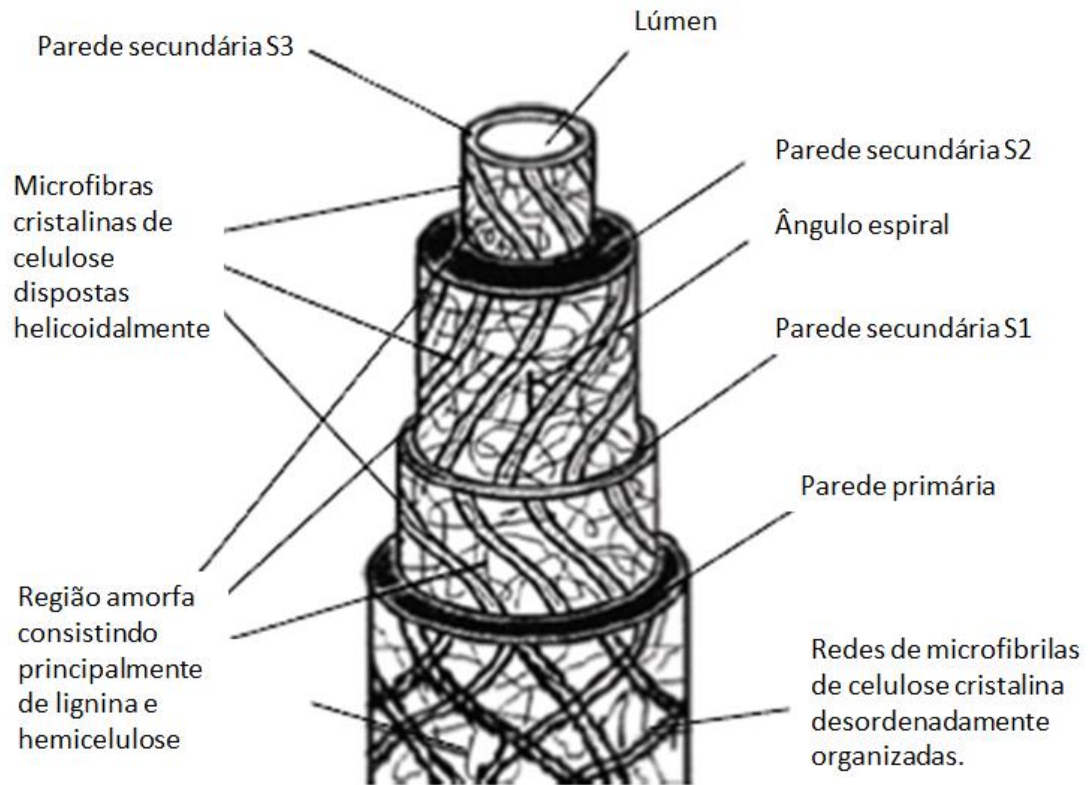
nanotecnológicos em diversas áreas como agronegócio, pigmentos e tintas, setores químicos e petroquímicos, áreas da siderurgia, saneamento básico e recursos hídricos, setores de energia, têxtil, saúde e cosméticos, de vidros e cerâmicas (PASA, 2008).

No contexto atual há diversas ações de atuação do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), como a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia (INB) criada em 2013 com a finalidade de fortalecer ações governamentais da área da nanotecnologia, o Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologia (SisNANO) direcionado ao desenvolvimento de laboratórios para essa área e o Centro de Inovações SibratecNANO com o intuito de ligação com as empresas brasileiras para a incorporação de nanotecnologia em seus produtos e processos. Ademais há outras ações importantes como a cooperação internacional (MINISTÉRIO, s.d.).

### 3.2 NANOCELULOSE

A celulose é considerada o biopolímero mais abundante na terra, sendo destaque entre diversos materiais por conta da sua biocompatibilidade, biodegradabilidade e renovabilidade. Ela é composta por um alto peso molecular e estrutura hierárquica, onde na sua estrutura linear há a repartição de monômeros  $\beta$ -D-glucopiranosose ligados por  $\beta$  1,4 ligações glicosídicas com 10.000 a 15.000 graus de polimerização, como pode ser observado na Figura 1 (KHAWAS; DEKA, 2016 apud KUMAR et al. , 2019).

**Figura 1 - Constituição de uma fibra natural**

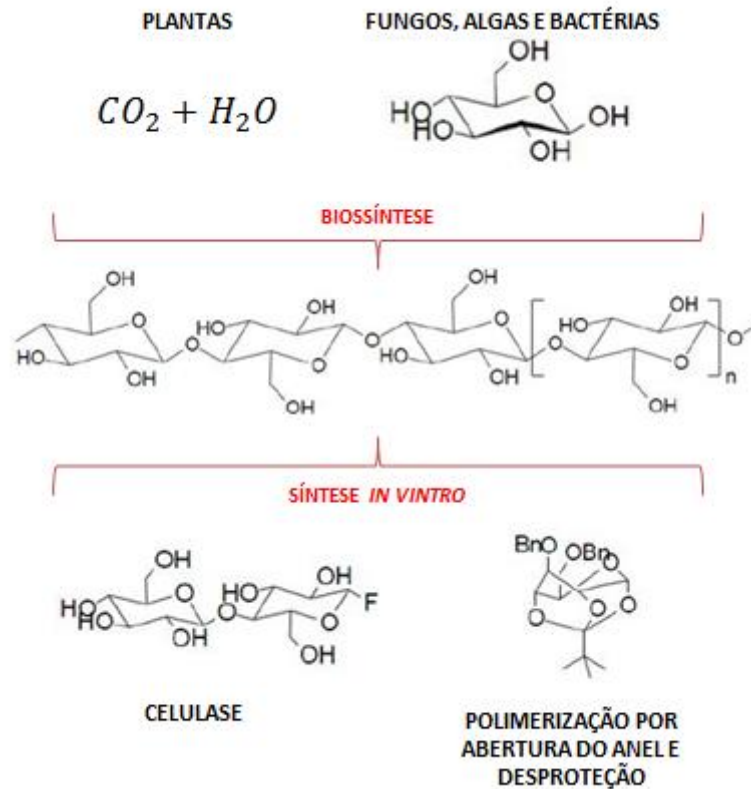


Fonte: Kalia et al., 2011.

Sua produção pode ser realizada fisiologicamente por plantas, entretanto alguns fungos, bactérias e algas também podem produzir esse composto (LENGOWSKL et al., 2019 apud ABDUL KHALIL et al., 2014) assim como é possível obter por meio de processos *in vitro*, como pode ser observado na Figura 2 (LENGOWSKL et al., 2019 apud NAKATSUBO et al., 1996).



**Figura 2 - Principais rotas de obtenção da celulose.**



Fonte: Lengowski et al., 2019<sup>a</sup>.

Há dois tipos de fibras celulósicas convencionais e um terceiro tipo utilizado para fins específicos destinados à fabricação de papel, sendo que cada tipo de fibra determina características distintas ao produto (SALAMANCA, 2022). A celulose de fibra longa é obtida através de plantas gimnospermas e oferece maior resistência mecânica (VIDAL, et al., 2014), possuindo de 2 a 5 mm de comprimento e no mercado nacional é comum utilizar as plantas *pínus* em 100% da sua fabricação (DIAS, 2021). A celulose de fibra curta tem como características a resistência, tração ao estouro, maciez, opacidade e printabilidade, justificando sua utilização em diferentes tipos de papel, possuindo de 0,2 a 2 mm de comprimento (DIAS, 2014) e sua obtenção ocorre por plantas angiospermas (VIDAL, et al., 2014). A celulose de fibra *Fluff* é obtida através de fibras longas e seu foco são produtos que necessitam de alto poder de absorção, como produtos de higiene (VIDAL, et al., 2014).

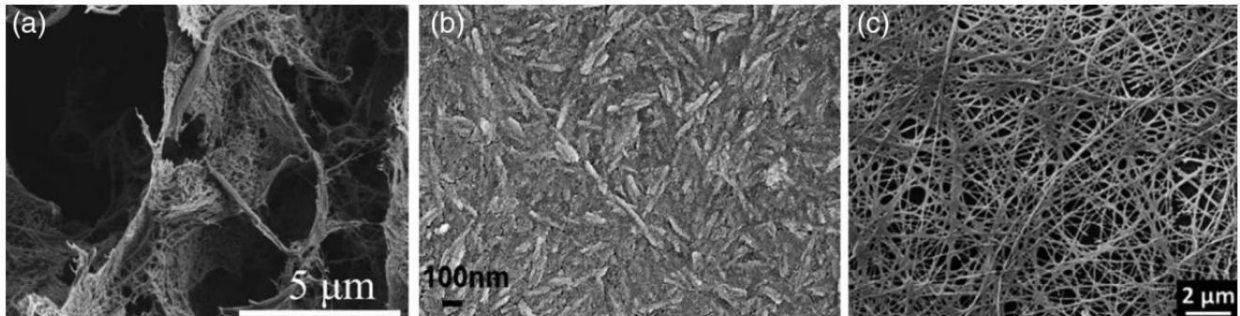
No cenário de pesquisas, o material vem conquistando espaço graças às características citadas anteriormente, com o acréscimo da alta relação de resistência e peso, baixa densidade, disponibilidade e o baixo custo, além dos benefícios que ela pode atuar quando utilizada com reforço, melhorando propriedades físicas e

mecânicas. Porém, em especial, em alguns tipos de materiais como os de microescala, a celulose apresenta algumas limitações, como alta absorção de umidade e baixa compatibilidade com a matriz polimérica hidrofóbica, que influenciam na atividade de agentes de reforço. Para a resolução dessas limitações, estudos referentes à nanocelulose começaram a ser desenvolvidos (GIE; TING; ABDULLAH; OMAR, 2019).

A produção da NC ocorre frequentemente através de dois métodos a partir da biomassa celulósica, sendo por via de tratamentos químicos e mecânicos realizados na simplificação de materiais celulósicos complexos e outros métodos é referente à utilização da síntese da celulose mediante agentes biológicos, sendo bactérias, fungos e protozoários (KUMAR et al. , 2019).

Há três tipos de nanocelulose, sendo a celulose nanofibrilada (NFC), nanocristais de celulose (CNC) e nanocelulose bacteriana (BNC). A NFC é composta por fibras de celulose longas, flexíveis e entrelaçadas em forma de teia, com diâmetro em escala nanométrica e sua obtenção requer um alto nível de energia, entretanto a utilização de produtos químicos vem auxiliando para minimizar essa limitação. O CNC, obtidos por hidrólise ácida, são frações em forma de agulha altamente cristalinas, podendo ter um comprimento que pode variar de 100 a 1000 nm e diâmetro médio de 3 a 35 nm, com isso, suas qualidades e propriedades o tornam um material de grande interesse para as indústrias. A NC obtida por bactérias aeróbicas via secreção, BNC, possuem um alcance nano e são fibras tipo fita torcidas com diâmetro médias de 20 a 100 nm e 2 a 4 nm de diâmetro, onde suas fibras há alto nível de cristalinidade e polimerização, como pode ser observado na Figura 3 (KUMAR et al., 2019).

**Figura 3 - Micrografias representativas dos três tipos diferentes de nanocelulose: (a) NFC (reproduzido da ref. 8, *Copyright (2018)* com permissão da *Elsevier*), (b) NCC (reproduzido da ref. 9, com permissão da *Elsevier*), e (c) BNC (reproduzido da ref. 10, com permissão de *The Royal Society of Chemistry*).**



Fonte: Pei et al., 2019

Para sua extração, polpas de madeira macia e dura branqueadas são consideradas aspirantes, entretanto há uma diversidade de materiais não madeireiros disponíveis que podem ser manuseados para o isolamento da NC. No setor de resíduos agroindustriais podemos destacar o bagaço de cana, a palha de trigo, casca de arroz e resíduos de sabugo de milho. Os resíduos de frutas e vegetais como casca de banana, casca de alho, semente de manga e folhas de abacaxi também são alguns exemplos. As plantas perenes como tamareiras e cactos tal como grama netuno e algas vermelhas presentes na biomassa marinha também são alguns desses materiais. Vale ressaltar a utilização de resíduos industriais como folheado de bétula e pó de serra assim como resíduos de papel, dentre eles jornais velhos, papel de escritório e embalagens de papelão ondulado (KUMAR et al., 2019, p. 8) contribuindo para redução dos impactos ambientais.

### 3.3 APLICAÇÕES DA NANOCELULOSE

Há diversas áreas nas quais as NC podem ser aplicadas atualmente, dentre elas Kalia (et al., 2011) menciona os setores automobilísticos, civil, farmacêuticos e cosméticos, na indústria moveleira, itens eletrônicos, dispositivos eletroacústicos, na produção de combustíveis, entretanto ainda assim há um potencial de preferência do uso da NC na produção de papéis e embalagens. Existe o destaque também da utilização da nanocelulose nos campos de processos de adsorção, separação, descontaminação e filtragem tais como purificação do ar, descontaminação de micróbio e vírus, remoção de corantes e tratamento de água (TRACHE, et al., 2020).

As nanofibras que constituem a celulose são utilizadas como reforço no desenvolvimento de produtos constituintes das áreas citadas anteriormente formando nanocompósitos (KALIA et al., 2011) e conseqüentemente biocompósitos. Os materiais compósitos são sistemas formados pela combinação de dois ou mais componentes com características divergentes que apresentam desempenho físico e químico superiores dos mesmos em forma pura (PAULA, 2011).

Segundo Gie (et al., 2019) “os compósitos reforçados com nanocelulose são um material promissor para substituir os compósitos de polímeros sintéticos convencionais”. A aplicação de CNC em nanocompósitos se tornou interessante devido sua estrutura e composição química, aumentando a resistência à tração e reduzindo a elasticidade quando aplicada em matrizes poliméricas, além de gerar menores impactos ao meio ambiente e a saúde quando comparada com nanocargas convencionais (TRACHE, et al., 2020).

### 3.4 MATERIAIS FIBROSOS DE ORIGEM NATURAL

Desde os tempos mais arcaicos, o homem sente a necessidade de registrar suas ações, pensamentos e ideias através de símbolos e desenhos assim com o tempo aprimorando sua comunicação. Ao decorrer do processo de evolução da linguagem houve o ampliação dos tipos de suportes utilizados para tais registros, desde pedras e rochas, casca de árvores, ossos, argilas ou madeira (TEIXEIRA, et al., 2017).

Dos tipos de suportes de materiais fibrosos de origem naturais destinados à escrita, o papiro destaca-se, sendo utilizado na Antiguidade por diversos povos

como os egípcios, fenícios e gregos, sendo que os mais antigos documentados datem 3.500 anos atrás (SANTOS, et al. 2001).

O papiro (do latim: *papyrus*) era produzido por meio do caule da planta *Cyperus papyrus* nos quais eram triangulares, altos e flexíveis, encontrados nas margens do rio Nilo e de adaptação a lugares quentes. Os povos astecas e maias no século V, desenvolveram o *huun* e *amate*, oriundos do vidoeira (*Betula alba* L. e *Betulanigra* L.) e da casca da figueira (*Ficus sp.*). A etapa de fabricação era realizada a partir da separação da casca, hidratação da fibra e maceração dando origem às folhas. Diferentemente do papel que conhecemos hoje, o papiro e o *amate* mantém as fibras inteiras sem a separação da celulose (TEIXEIRA, et.al., 2017). Desde então as fábricas de produção do processo de obtenção de celulose até a fabricação do papel teve um progresso, demonstrado na Tabela 1, até chegarmos ao fluxo produtivo atual.

**Tabela 1 - Linha do tempo da utilização do papel como suporte de escrita**

Local	Ano	Descrição	Referências
China	105 d.C.	Utilização como suporte para escrita	
Ocidente	751	Introdução a indústria do papel por meio de prisioneiros chineses na Ásia Central.	
Espanha	1144	Primeira fábrica de papel da Europa localizada na Espanha.	Santos, et al., 2001.
França	1798	Surgimento da primeira máquina destinada a fabricação de papel.	
Brasil	1890	Introdução da produção de papel pelos portugueses.	

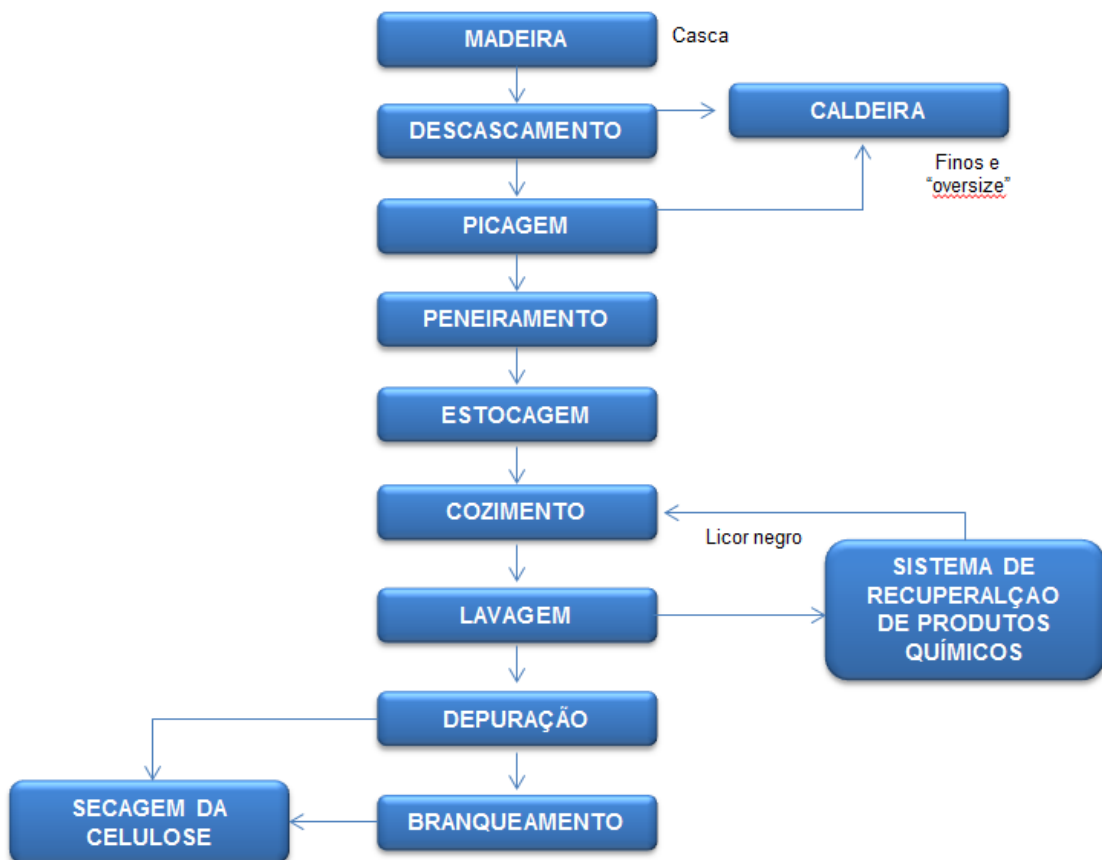
Fonte: Santos, et al., 2001.

A celulose utilizada para a fabricação do papel é obtida através do processo de polpação que tem como objetivo a solubilização da lignina, macro célula com atributo fenólico (TEIXEIRA, et.al., 2017), por meio da separação das fibras melhorando suas propriedades, sendo o principal processo utilizado no Brasil conhecido como *kraft* (SANTOS, et al. 2001) que utiliza no tratamento o NaOH

(hidróxido de sódio) com mais o  $\text{Na}_2\text{S}$  (sulfeto de sódio), ambos com pH entre 11 a 14 de grau de acidez ou alcalinidade (CASTRO, 2009).

Na Figura 4 é possível verificar as fases de preparação desde a retirada da matéria prima até a etapa final obtendo a celulose que ocorrem por processos químicos, podendo ser ácidos ou alcalinos e operações unitárias, com processos utilizando energia mecânica, físicos por via de irradiação de raios gamas, tratamento a vapor ou *steam-explosion* (aquecimento e rápida descompressão do material), assim como através de etapas biotecnológicas, com a ação de micro-organismos selecionados para atuar na separação da lignina (CASTRO, 2009).

**Figura 4 - Fases de preparação da polpa de celulose**



Fonte: Castro, 2009.

As propriedades tanto da celulose quanto do papel são determinadas de acordo com o processo industrial, podendo ser observada em um levantamento realizado por Castro (2009) na Tabela 2, onde há a classificação por tipo de celulose, características e seu uso na sociedade.

**Tabela 2 - Classificação e usos dos tipos de celuloses utilizados na manufatura do papel**

Tipos	Características	Usos	Referências
Pasta mecânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência física reduzida</li> <li>• Baixo custo</li> <li>• Boa capacidade de impressão</li> <li>• Alta opacidade</li> </ul>	Papel de jornal, catálogos, revistas, papéis de parede, papéis absorventes e papelão.	Castro, 2009.
Calulose semi-química	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características bem variáveis dependendo do processo</li> </ul>	Papelão corrugado, papel de jornal, papel de impressão, escrita e desenho.	Castro, 2009.
Celulose sulfato/Kraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escura</li> <li>• Opaca</li> <li>• Bastante resistente</li> </ul>	<p>Não braqueada: papéis, papelões e cartões para embalagens e revestimentos.</p> <p>Branqueada: papéis de primeira para embalagens e impressão.</p>	Castro, 2009.

Fonte: Castro, 2009.

### 3.4.1 Cenário brasileiro no segmento de celulose e papel

No Brasil, as fábricas de papel, de celulose ou as integradas, representam uma posição relevante na economia nacional como mundial. Essas plantas industriais têm capacidade produtiva de 1 a 2 milhões de toneladas por ano e seu consumo de energia médio aumentou entre os anos de 1970 a 2020, com o avanço de 5,4% (SALAMANCA, 2022).

O segmento de celulose no país durante 2020, conforme a pesquisa realizada pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) e Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), obteve a segunda colocação no ranking de maiores produtores do mundo, representado pela Tabela 3, sendo que duas empresas brasileiras no ano de 2015, como indicado nos dados disponibilizados pelo Regulamento Interno de Segurança da Informação (RISI) estavam entre as líderes globais no setor (HORA, 2017).

Observando o cenário, a partir dos anos 2000 houve uma expansão do setor comparado com o de papel, dando destaque para a etapa florestal onde as condições climáticas, de pesquisa e desenvolvimento assim como nosso solo,

possibilitam que o país tenha a capacidade de exportação de 70% da sua produção (SALAMANCA, 2022).

**Tabela 3 - Ranking dos maiores produtores de celulose do mundo em 2020.**

<b>País</b>	<b>Produção (106 ton)</b>	<b>% da produção 27,4%</b>
Cervo	50,90	
Brasil	21,00	11,3%
Canadá	15,40	8,3%
China	14,90	8,0%
Suécia	12,00	6,5%
Finlândia	10,50	5,7%
Rússia	8,80	4,7%
Indonésia	8,40	4,5%
Japão	7,20	3,9%
Chile	5,20	2,8%

Fontes: IBÁ (2021) e FAO (2021).

No âmbito da produção de papel, em pesquisa realizada pelo IBÁ e FAO em 2020, o Brasil está no ranking dos maiores produtores do mundo com a exportação aproximadamente 2,1 milhões de toneladas, representado pela Tabela 4. Diferentemente do ramo referente à celulose, 80% da produção é focada para o mercado interno (SALAMANCA, 2020).

**Tabela 4 - Ranking dos maiores produtores de papel do mundo em 2020.**

<b>País</b>	<b>Produção (106 ton)</b>	<b>% da produção 27,4%</b>
China	117,20	29,2%
Cervo	66,20	16,5%
Japão	22,70	5,7%
Alemanha	21,30	5,3%
Índia	17,30	4,3%
Coréia	12,00	3,0%
Indonésia	12,00	3,0%
Brasil	10,20	2,5%
Rússia	9,50	2,4%
Suécia	9,30	2,3%

Fontes: IBÁ (2021) e FAO (2021).



### 3.5 APLICAÇÕES DA NANOTECNOLOGIA EM MATERIAIS FIBROSOS DE ORIGEM NATURAL

A nanotecnologia está inovando nos setores industriais, entre eles sua utilização em materiais fibrosos de origem natural. Sua aplicação pode ocorrer na produção da celulose, já no processo de fabricação do papel pode ocorrer com a adição de aditivos e biorevestimento (KUMAR, et. al., 2019).

De acordo com Campos (1996), especialista em celulose e papel, “o papel é constantemente tratado como material de engenharia e deve permitir diversos tipos de ensaios” para análise do comportamento físico e químico na tratativa de anormalidades e teste de qualidade. Na Tabela 5 é possível analisar resumidamente uma classificação das propriedades dos papéis envolvendo sua estrutura, questão mecânica, aparência e influência do ambiente e relacionado à penetração de fluidos.

**Tabela 5 - Propriedades dos papéis**

<b>Tipos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Referência</b>
Estruturais	Gramatura, espessura, formação, direcionalidade, dupla face, permeância ao ar e aspereza;	SCOTT. W.E., TROSSET. S., Properties of paper: na introduction. Atlata, Tappi, 1989. 170 p. CASALS. R., Características del papel. Bracelona, Howson - Algraphy, [s.d.]. 174 p.
Mecânicas	Tração, alongação, estouro, rasgo, dobras duplas e rigidez.	SCOTT. W.E., TROSSET. S., Properties of paper: na introduction. Atlata, Tappi, 1989. 170 p. CASALS. R., Características del papel. Bracelona, Howson - Algraphy, [s.d.]. 174 p.
Aparência	Reflectância, transmitância, brancura, alvura, brilho, transparência e opacidade.	SCOTT. W.E., TROSSET. S., Properties of paper: na introduction. Atlata, Tappi, 1989. 170 p. CASALS. R., Características del papel. Bracelona, Howson - Algraphy, [s.d.]. 174 p.
Relacionadas com à influência do ambiente	Umidade, estabilidade dimensional e permanência.	SCOTT. W.E., TROSSET. S., Properties of paper: na introduction. Atlata, Tappi, 1989. 170 p. CASALS. R., Características del papel. Bracelona, Howson - Algraphy, [s.d.]. 174 p.
Relacionadas à penetração de fluidos no papel	Resistência à penetração de gases, água, vapor de água, óleo, graxas e outros produto químicos.	SCOTT. W.E., TROSSET. S., Properties of paper: na introduction. Atlata, Tappi, 1989. 170 p. CASALS. R., Características del papel. Bracelona, Howson - Algraphy, [s.d.]. 174 p.

Fonte: Campos, 1996.

As propriedades descritas na Tabela 5 determinam o comportamento do papel durante a cadeia produtiva e estão inseridas em uma classificação que abrange às três etapas, sendo elas as propriedades intrínsecas do papel (ligadas ao processo de produção de celulose e do papel em si), as propriedades que influem diretamente na impressão (quando o papel é destinado a processos gráficos) e propriedades que influem na utilização do seu produto final (impresso), podendo ser destinado a embalagens, escrita, alimentício, higiene e decoração (CAMPOS, 1996 apud CASALS, [s.d.]).

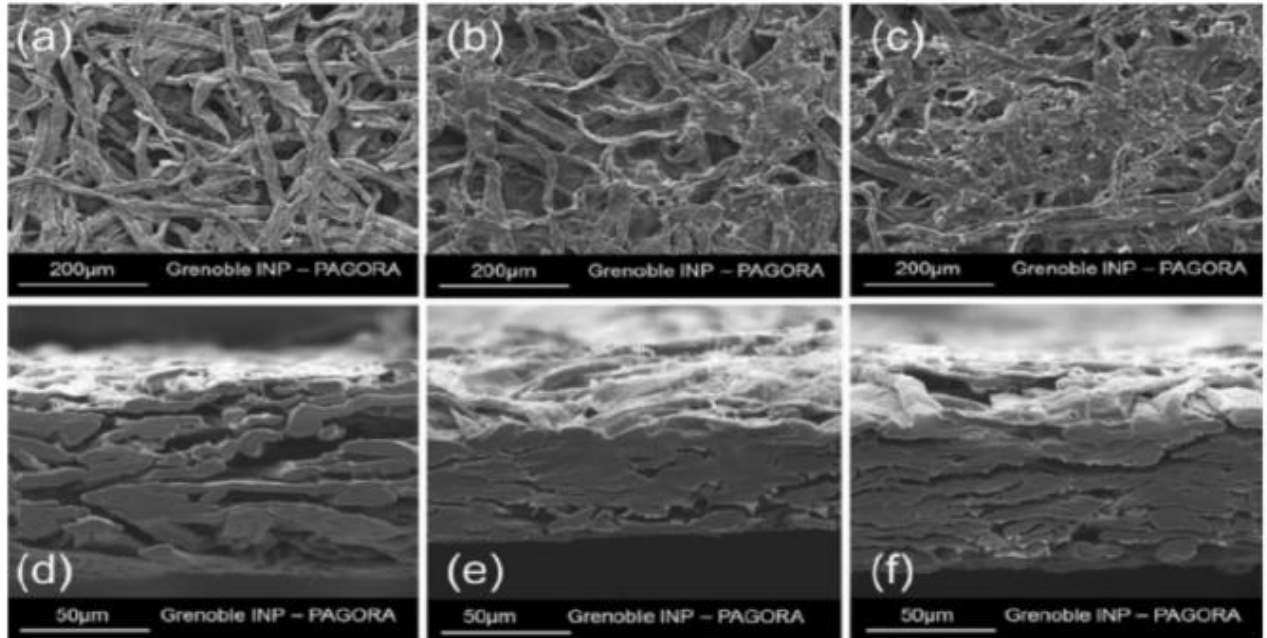
### **3.5.1 Nanocelulose aplicada como material intermediário na produção de papel**

Na utilização como aditivos, a NC pode ser utilizada como *bionanofiller* (adição de um material em outro, ambos de origem biológica em nano escala) podendo ou não estar com um auxiliar de retenção durante a produção do papel. A NFC em específico atua como aditivo de resistência a seco em suportes mal aderidos e quando utilizadas com outros aditivos em conjunto com a fibra conseguem modificar as propriedades do papel, melhorando a molhabilidade, compatibilidade, repulsão de água e alteração na propriedade da celulose por meio de interação de nanofibras na matriz de papel (DAS, et. al., 2020).

Segundo as pesquisas de Das (et. al., 2020) no quesito revestimento, a NFC é aplicada após o processo de fabricação do papel e pode ajudar nas anormalidades referentes à desidratação. Há diversos tipos de técnicas para tais procedimentos, sendo elas por spray, rolo e prensa de colagem e barra, onde a quantidade de material de revestimento é determinada conforme a técnica utilizada.

Na Figura 5 é possível verificar a atuação da celulose nanofibrilada como reforço em uma superfície de papel de cisalhamento na polpa de madeira macia. Analisando a propriedade de permeabilidade do ar, quando adicionada 8% de NFC do ar houve a alteração de 360 para 6,5 nm/Pas, reduzindo a porosidade do material e quando em conjunto com outros materiais apresenta bons resultados na resistência à penetração de fluídos e estrutura (DAS, et.al., 2020 apud SYVERUD; STENIUS, 2019), citados anteriormente na Tabela 5.

**Figura 5 - Imagens SEM de papel de superfície reforçado a sem CNF, b com CNF, c com CNF modificado e seção transversal de d sem CNF, e com CNF e f com CNF**



Fonte: Das, et al., 2020.

Apesar das vantagens apresentadas a produção de nanocelulose gera uma limitação no custo de produção no decorrer da fabricação por conta do maior uso de energia e uma abordagem para superar essas limitações é a utilização de tecnologias modernas, como pré-tratamento químico e enzimático (DAS, et. al., 2020).

### **3.5.2 Nanocelulose bacteriana na reutilização para reciclagem de papel**

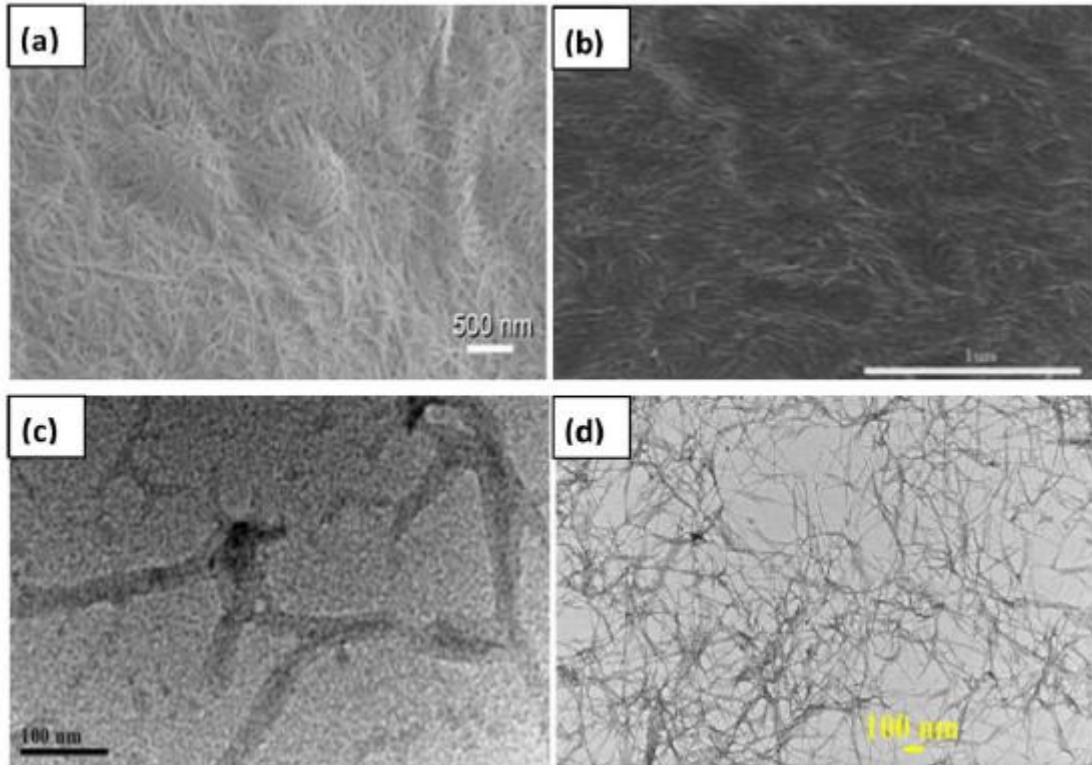
A importância da conservação e proteção do meio ambiente veio ganhando destaque nas últimas décadas, principalmente no campo de reciclagem e reutilização de materiais. Nessa perspectiva a nanocelulose bacteriana (BNC) se apresenta como uma biotecnologia para o reaproveitamento de papéis compostos por fibras de celulose não lenhosas, que representam uma parcela considerável da matéria prima do papel (SKOCYAJ, 2019).

Ademais, Skoc̙aj (2019) evidencia que a BNC por se um nanomaterial natural, com fibras em nanoescala de 20 a 200nm, seus grupos de hidroxilas livres realizam altas ligações de hidrogênio possibilitando maior resistência, durabilidade e até resistência ao fogo. Além disso, a nanocelulose bacteriana apresenta maior nível de cristalinidade com alta área de superfície específica, termicamente é mais estável, alta capacidade de absorção de água, é durável e elástica tornando ela uma fonte celulósica de alto nível de pureza.

Para realizar a sua obtenção é necessário realizar métodos de biossíntese, podendo ser produzida em método de cultivo por estática ou agitação, por vários agentes bacterianos. Em um estudo realizado com BNC obtido mediante vinagre clássico e fibras de celulose de eucalipto, na utilização do papel para impressão notou-se uma melhora na densidade óptica referente à nitidez e manchas (SKOC̙AJ, 2019). Em outro estudo realizado em folhas com diferentes fontes de fibra de celulose (alta, média e baixa qualidade) a aplicação de pouca quantidade da nanocelulose bacteriana forneceu reforço eficaz sendo que nas fibras de baixa qualidade houve um aumento linear na tração (XIANG et al., 2017 apud SKOC̙AJ, 2019). Quando aplicada sobre a superfície do papel a BNC apresentou mínimas alterações nas propriedades mecânicas e ópticas do papel e a diminuição da permeabilidade ao ar, além do alto brilho (SANTOS et al., 2017 apud SKOC̙AJ, 2019).

A utilização da nanocelulose recuperada por meio de resíduos de papel pode ser verificada em materiais indústrias onde as propriedades referentes a brilho e a presença de contaminantes menores é considerada menos relevante (KUMAR, et. al. 2019). Na Figura 6 é possível verificar via micrografia eletrônica substratos reimpressos e a CNC extraída. Segundo as pesquisas de Kumar (et. al. 2019) diversas aplicações de nanocelulose em processos de reutilização de papel apresentaram resultados positivos, como resistência a tração, absorção de energia da quebra do papel, elasticidade, redução de custo nos processos, entre outros.

**Figura 6 - Micrografia eletrônica de nanocelulose extraída de diferentes tipos de resíduos de papel. (a) SEM de CNC isolado de jornal. Reimpresso (adaptado) de Takagi et al. (2013). Direitos autorais 2013 SAGE. (b) TEM de CNC isolado de OWP. Reimpresso (adaptado) de Diop e Lavoie (2016). Copyright 2016 Springer Nature.**



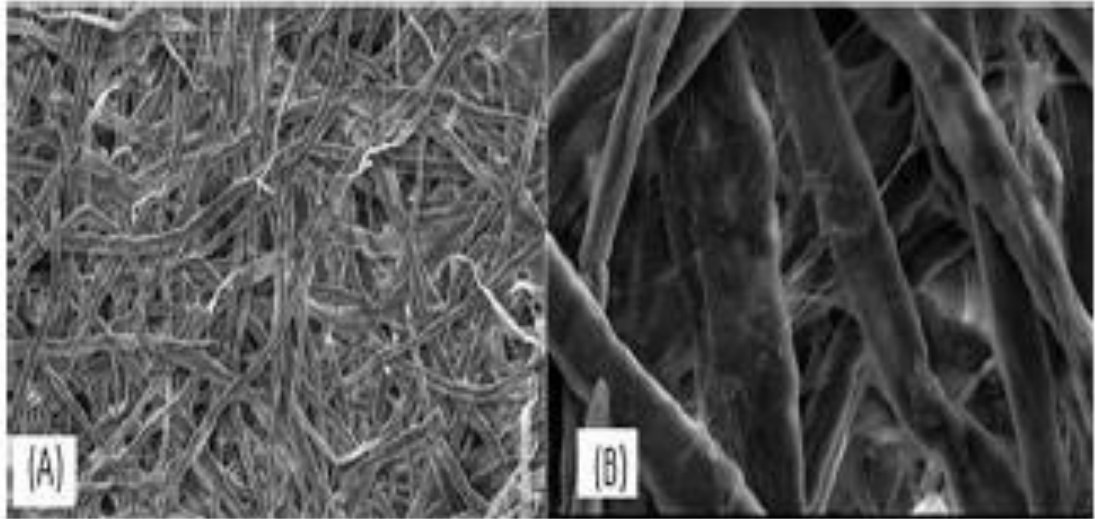
Fonte: Kumar, et. al. (2019).

### 3.5.3 Nanofibras de celulose de *Eucalyptus* na produção de papel

A principal fibra da celulose brasileira é a de eucalipto (fibra curta) e sua média produtiva no país é de 36,8m<sup>3</sup>/ha conforme dados do IBÁ do ano de 2019 (SALAMANCA, 2020). Em um estudo realizado por Silva (et al., 2020) foi verificado as mudanças que ocorreram na produção de papéis de 60 g/m<sup>2</sup> a partir da polpa celulósica branqueada de *Eucalyptos ssp*, com a incorporação de nanofibrilas nas seguintes porcentagens: 0, 2, 4, 8, 16, 32 e 64.

Após realizar a aplicação das nanofibrilas, é possível verificar que os espaços vazios foram preenchidos por conta da capacidade de entrelaçamento, confirmadas nas propriedades físicas referentes à resistência do material (SILVA, et al., 2020). A Figura 7 mostra o comparativo do papel com e sem a presença de NC e os resultados físicos e mecânicos obtidos estão demonstrados nas Tabelas 6 e 7.

**Figura 7 - (A) Papel sem nanofibrilas a 0% (B) Papel com nanofibrilas a 16%.**



Fonte: Silva, et al., 2020.

De acordo com os dados, Silva (et al., 2020) destaca a promoção da formação de folhas mais homogêneas e referente à drenagem a celulose nanofibrilada promoveu uma maior ligação de hidrogênios com moléculas de água, auxiliando na hidratação e gerando uma organização das fibras na formação do papel, refletindo nas propriedades físicas e químicas apresentadas.

**Tabela 6 - Propriedades físicas dos papeis sem e com adição de nanofibrilas.**

<b>Tratamento (%)</b>	<b>Gramatura (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espessura (μm)</b>	<b>Gurley (s/cm<sup>3</sup>)</b>
0	60,37 a	81,79 c	3,3 a
2	60,14 a	82,27 c	3,7 a
4	60,64 a	81,38 c	4,8 a
8	61,10 a	79,37 bc	7,8 b
16	60,46 a	75,77 b	23,00 c
32	59,00 a	68,47 a	137,8 d
64	57,73 a	62,84 a	1094,3 e

Fonte: Silva, et al., 2020.

Referente às propriedades mecânicas, Silva (et al., 2020) destaca a tendência do aumento da resistência do papel (ruptura) ao decorrer da aplicação da NFCs, afetada pelo fato da capacidade da ligação entre as fibras. Segundo os dados referentes à elongamento (%), quando adicionada nanofibrilas como aditivo principal obteve um material com maior resistência a forças aplicadas até sua ruptura, observado pela diferença entre o tratamento com zero de aplicação e 64% de aplicação, aumentando de 1,432 para 6,845%.

**Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos papeis sem e com adição de nanofibrilas.**

<b>Tratamento (%)</b>	<b>Tração (KNm/Kg)</b>	<b>Estouro (Kpa.m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Elongamento (%)</b>
0	14,597 a	0,972 a	1,432 a
2	16,584 a	1,012 a	1,758 a
4	17,491 a	1,014 a	2,050 a
8	23,433 b	1,266 b	2,906 b
16	30,123 c	1,873 c	3,829 c
32	42,399 d	3,232 d	4,800 d
64	59,996 e	5,653 e	6,845 e

Fonte: Silva, et al., 2020.

Dessa forma, os dados obtidos através dos parâmetros tecnológicos via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e da interpretação dos dados das propriedades físicas e mecânicas, concluiu-se que a aplicação da nanocelulose na produção de papel a partir de celulose de *Eucalyptus* afetou a microestrutura da folha de papel e gerou potencial positivo com ganhos nas propriedades de forças mecânicas e físicas.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil tem uma ocupação importante nos setores de fabricação de papel e celulose, permanecendo em ambos no ranking de maiores produtores mundiais. Tendo em vista esse fato, os interesses nas áreas acadêmicas e industriais em pesquisas e inovações tendem a expandir, buscando principalmente maior qualidade ao produto final oferecido.

Nesse contexto, a nanocelulose se tornou um atrativo na fabricação de materiais fibrosos de origem natural por conta de suas propriedades mecânicas e físicas, ampla oferta de matéria prima para sua obtenção, renovabilidade, biocompatibilidade e aplicação em materiais nanocompósitos, ademais ser um aliado para a preservação ambiental.

De maneira concisa buscamos analisar e compreender a nanocelulose, sua aplicação no processo de fabricação de papel e celulose assim como suas vantagens e limitações nos métodos apresentados. Em resumo, a inclusão de NC apresentou resultados positivos quando aplicado na quantidade correta nos processos da cadeia produtiva interferindo no comportamento do papel nas suas propriedades intrínsecas, nas que influem no processo gráfico e na utilização do produto final.

No entanto, é importante considerar as limitações apresentadas relacionadas ao custo para produção de NC, como exemplo a BNC e a análise do meio de cultura comparada à relação custo-benefício. Para a compensação desses gastos é viável analisar as etapas de produção e buscar alternativas com auxílio de novas tecnologias e estudos.

Na conclusão, fica evidente que o Governo desempenha um papel importante no âmbito acadêmico e industrial. Os programas oferecidos e ações devem ter o acompanhamento e gestão nos investimentos, desde pesquisas a laboratórios com tecnologias avançadas, ademais o apoio do setor industrial para avanços significativos entre colaborações de formas práticas e relevantes.



## 5 REFERÊNCIAS

- AHMED, JP *et al.* A comprehensive review on recent developments of natural fiber composites synthesis, processing, properties, and characterization. **Engineering Research Express**, v. 5, p. 2-15, ago. 2023. ISSN 2631-8695.
- CAMPOS, Edison D. S. Propriedades dos Papéis para a Impressão Gráfica - Parte 1. **ANAVE**, São Paulo, n. 76, p. 50-55, set./out. 1996.
- CARVALHO, Maurício de. There's Plenty of Room at the Bottom. **Iátrico**, n. 40, p. 32-33, dez. 2021.
- CASTRO, Heizir F. D. Papel e celulose. São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena - EEL, 2019.
- DAS, Atanu K. *et al.* Nanocellulose: its applications, consequences and challenges in papermaking. **Journal of Packaging Technology and Research**, v. 3, n. 1, p. 253-260, 2020.
- DIAS, Warlen A. Avanços para o desenvolvimento sustentável da indústria de papel e celulose através do gerenciamento de seus resíduos. Uberlândia: [s.n.], 2021. p. 6-62.
- FIALKOSKI, Diego; MALFATTI, Carlos R. M. Nanotecnologia: uma prospecção tecnológica no âmbito nacional e internacional. **Cadernos De Prospecção**, Salvador, v. 12, n. 3, p. 590-601, set. 2019.
- FILHO, Sérgio A.; BACKX, Bianca P. Nanotecnologia e seus impactos na sociedade. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 19, n. 57, p. 1-15, abr./jun. 2023.
- FRITOLI, Clara L.; KRÜGER, Eduardo; CARVALHO, Silmara K. D. P. **Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 475-502, jul./dez. 2016.
- GIE, Gan P. *et al.* Thermal properties of nanocellulose-reinforced composites: A review. **Applied Polymer Science**, v. 137, n. 11, p. 1-14, 2019.
- GONÇALVES, Fernando A. D. C. *et al.* Fibras Vegetais: Aspectos Gerais, Aproveitamento, Inovação Tecnológica e uso em Compósitos. **Revista Espacios**, Venezuela, v. 39, n. Grupo Editorial Espacios GEES 2021 C.A., p. 12, 2018.
- HORA, André B. D. Papel e Celulose. In: \_\_\_\_\_ **Panoramas Setoriais 2030**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. p. 80-91.
- HORA, André B. D.; VIDAL, André C. F. A indústria de papel e celulose. In: SOUSA, Filipe L. D. **BNDES 60 Anos - Perspectivas Setoriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, v. 1, 2012. p. 335-381.
- HORA, André B. D.; VIDAL, André C. F. BNDES 60 Anos - Perspectivas Setoriais. In: SOUSA, Filipe L. D. **Celulose de fibra longa: uma oportunidade para a indústria**

brasileira. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, v. 1, 2012. p. 281-342.

KIM, Jaehwan. Nanocellulose-based paper actuators. In: KIM, Jaehwan **Nanocellulose Based Composites for Electronics**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2020. Cap. 7, p. 163-183.

KUMAR, Varun; PATHAK, Puneet; BHARDWAJ, Nishi K. Resíduos de papel: uma fonte subutilizada, mas promissora, para a mineração de nanocelulose. **International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology**, v. 102, n. Elsevier Ltd., p. 282-298, 2019.

LENGOWSKI, Elaine ; JÚNIOR, Eraldo A. B. Nanocelulose: aplicações na indústria de base florestal. In: \_\_\_\_\_ **Sustentabilidade de Recursos Florestais 2**. Ponta Grossa: Atena Editora, v. 2, 2019. Cap. 18, p. 155-164.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Nanocelulose**. Disponível em:

[https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias\\_convergentes/paginas/nanotecnologia/NANOTECCNOLOGIA.html#](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias_convergentes/paginas/nanotecnologia/NANOTECCNOLOGIA.html#). Acesso em: 10 de Outubro de 2023.

PASA, Tânia C.; RAMOS, Betina G. Z. O desenvolvimento da nanotecnologia: cenário mundial e nacional de investimentos Nanotechnology development: world-wide and national investments. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 89, n. 2, p. 99-105, nov. 2008.

PAULA, Paula G. D. Formulação e Caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica. CAMPOS DOS GOYTACAZES: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 2021. p. 1-70.

PIRES, Joyce S. C. Fibras Naturais: Características químicas e potenciais aplicações. Botucatu: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009. p. 1-48.

SALAMANCA, Hugo. A Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no Mundo – panorama geral, Rio de Janeiro, p. 6-23, jan. 2012.

SANTIAGO, Natália M.; REIS, Elton A. P. D. ETIC - ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. **Nanocelulose: do entendimento as aplicações**, Presidente Prudente, v. 17, n. 17, 2021.

SANTOS, Celênia P. *et al.* Papel: Como se Fabrica? **Química Nova na Escola**, v. 14, p. 3-7, Novembro 2001.

SILVA, Filipe S. D. *et al.* DESEMPENHO TECNOLÓGICO DE PAPÉIS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE DE Eucalyptus. **BIOFIX Scientific Journal**, Pelotas, 2020. 174-179.

SKOCYAJ, Matej. Bacterial nanocellulose in papermaking. **Cellulose**, v. 26, n. 15, p. 6477-6488, 2019.

TEIXEIRA, Maria B. D. *et al.* O Papel: Uma Breve Revisão Histórica, Descrição da Tecnologia Industrial de Produção e Experimentos para Obtenção de Folhas Artesanais. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 1342-1363, mai./jun. 2017.

TRACHE, Djalal *et al.* Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. **Frontiers in Chemistry**, v. 8, p. 1-33, maio 2020.