



**AVALIAÇÃO DE FIBRAS ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE  
EMBALAGENS DE PAPEL E PAPELÃO**

Beatriz de Moraes Silva

Bruno Ferreira Silva

**Projeto Final de Curso em Engenharia Química**

Junho de 2024

Beatriz de Moraes Silva

Bruno Ferreira Silva

AVALIAÇÃO DE FIBRAS ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS  
DE PAPEL E PAPELÃO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química, apresentado para a Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, atendendo aos requisitos finais necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Verônica M. A. Calado

Coorientador: Antonio Lima Alves

Rio de Janeiro

2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rosimeri e Valdeir, porque chego até aqui somente porque nunca me deixaram faltar nada. Obrigado por investirem na minha educação desde sempre, por me darem o suporte necessário e por me aguentarem durante as semanas de prova.

Ao meu amigo Antonio, pela paciência, parceria e orientação durante todo o trajeto.

Aos meus amigos que fiz durante todo esse percurso e foram meu suporte: Pedro, Nathalia, Julia, Vinicius, Bárbara, Bruna, Luiza, Ana Vitória, Lorena e muitos outros. Todas as minhas melhores memórias da faculdade foram feitas por eles e, sem eles, eu não teria chegado nem perto da linha de chegada. Agradeço, em especial, ao meu amigo David, cuja mudança de universidade me inspirou a seguir meu sonho de ingressar, também, na UFRJ.

Ao meu melhor amigo Nathan, que muitas vezes acreditou no meu potencial mesmo quando eu duvidei. Obrigado por me ouvir repetir inúmeras vezes como eu tinha certeza de que não iria bem em algo e então voltava para anunciar que, na verdade, eu tinha ido muito melhor do que achava.

Agradeço à minha dupla de TCC, Beatriz, por compartilhar comigo essa grande etapa e confiar em mim para que eu fizesse, também, parte desse grande marco em sua vida.

Agradeço também aos que não fizeram parte da minha vida acadêmica, mas, em paralelo, me deram inspiração para continuar: todo o time de Supply Chain SCJ, em especial Diegão, Viviane, Romulo, Camilla, Beatriz, Fabiano, Luciana, Dieguinho, Luisa e Sophia. Se eu tenho chances de ser um bom profissional, é porque eu aprendi com os melhores professores.

Por último, agradeço à professora Silvia Maria, minha última professora da Escola de Química. Agradeço porque me trouxe um sentimento de satisfação em aprender que eu havia sentido pouquíssimas vezes até então e encerrou esse longo ciclo com chave de ouro.

Bruno Silva

Agradeço primeiramente a minha mãe Ana Lúcia. A minha melhor amiga e heroína, que sempre esteve ao meu lado me dando força e suporte, e me incentivando nas horas mais difíceis de desânimo e cansaço, muito obrigada por ter sido esse pilar para mim, a sua força e a sua garra sempre serviram de exemplo para que eu nunca desistisse.

A minha família, por todo incentivo, apoio e compreensão, que me fizeram chegar à conclusão do meu curso e ao começo da minha carreira. Em especial agradeço ao meu avô Loureiro e a minha avó Maria Lúcia, com certeza eles foram meus grandes impulsionadores e meus grandes fãs. Obrigada por todas as bênçãos, promessas e rezas.

Ao meu namorado Pedro Henrique, por toda a ajuda e dedicação nesses longos anos de faculdade, por compartilhar os momentos de ansiedade e estresse. Obrigada pela paciência e compreensão durante a minha jornada acadêmica, minha gratidão é imensa.

A minha dupla de TCC, Bruno, por toda a ajuda e compreensão nesse momento, muito obrigada por não soltar a minha mão e me deixar compartilhar mais essa etapa do curso.

Aos meus amigos que conheci durante essa jornada acadêmica. Julia, Nathalia, Pedro, Vinicius, Allan e muitos outros. Obrigada por todos os momentos alegres, por todo o apoio, compreensão e escuta. Vocês foram peças-chaves para que eu não desistisse no meio do caminho e para que eu pudesse acreditar mais em mim.

Aos meus amigos de vida: Gustavo, Alex, Mariana, Douglas e Anna Gabriela. Obrigada por sempre entenderem a minha ausência e a minha falta de tempo, e mesmo assim nunca desistirem de mim, por sempre estarem ao meu lado me dando muita força e acreditando no meu potencial, vocês são os grandes amores da minha vida.

Em especial, agradeço ao meu avô Claudionor (*in memoriam*), mesmo que não esteja aqui conosco fisicamente a sua alma e o seu amor estão entre nós. E em vários momentos conturbados e difíceis, eu pude senti-lo. Obrigada por me deixar a maior lição de vida e que eu sempre carrego comigo: “Hoje o dia pode estar nublado, mas amanhã o sol vai voltar a brilhar”.

Beatriz Silva



## RESUMO

SILVA, Beatriz. SILVA, Bruno. **Avaliação de Fibras Alternativas para a Produção de Embalagens de Papel e Papelão**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Com o crescente consumo de embalagens de plástico, observam-se também os problemas ambientais relacionados a seus resíduos. A indústria opta por embalagens de papel, de maior ciclo de vida. O desmatamento ocasionado pelo consumo excessivo de fontes de madeira e a implementação de áreas reflorestadas com espécies estrangeiras tornam-se também problemas ambientais. Fontes alternativas de fibras vêm sendo avaliadas para substituir, em volume, as fontes clássicas de madeira, mantendo – ou aprimorando – as propriedades da embalagem. O trabalho teve o objetivo de apresentar possíveis fibras alternativas, com produção expressiva no Brasil, focando, em: triticales, bagaço de cana-de-açúcar, casca da fruta da palma e casca de coco. As publicações indicam que as quatro fibras possuem grande potencial para aplicação na indústria de embalagens. Diferentes proporções em misturas das fibras alternativas entre si ou com fibras lenhosas podem garantir um papel com propriedades superiores. Realizou-se uma prospecção tecnológica com base em pesquisas na plataforma de dados *Scopus*. Foram utilizadas duas combinações de palavras-chave, sendo realizadas análises temporais e geográficas. Foram selecionados 50 artigos mais recentes, até 2023, que mais se aproximassem do uso das fibras mencionadas em embalagens e, dentre eles, foram realizadas classificações de acordo com a proposta de trabalho, revelando o objetivo de encontrar misturas de fibras que garantam propriedades similares ou superiores ao produto já existente no mercado. Foram analisadas publicações encontradas a partir de palavras-chave que continham as quatro fibras selecionadas. O baixo volume de publicações indica tratar-se de um tema em maturação. Ao fim, foi possível concluir que as fibras alternativas estão sendo lentamente inseridas na indústria de embalagens, não com o objetivo de substituir as fibras convencionais em sua totalidade, mas de mitigar os efeitos negativos causados na natureza.

Palavras-chave: fibras alternativas, embalagem, triticales, bagaço de cana-de-açúcar, palma de óleo, coco.

## ABSTRACT

SILVA, Beatriz. SILVA, Bruno. Evaluation of Alternative Fibers for the Production of Paper and Cardboard Packaging. Rio de Janeiro, 2024. Undergraduate Thesis (bachelor's degree in chemical engineering) - School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

With the increasing consumption of plastic packaging, environmental problems related to its waste are also observed. The industry opts for paper packaging, which has a longer lifecycle. Deforestation caused by the excessive consumption of wood sources and the implementation of reforested areas with foreign species also become environmental issues. Alternative fiber sources are being evaluated to replace, in volume, the classic wood sources while maintaining – or enhancing – the properties of the packaging. This study aimed to present possible alternative fibers with significant production in Brazil, focusing on triticale, sugarcane bagasse, palm fruit husk, and coconut husk. The publications indicate that these four fibers have great potential for application in the packaging industry. Different proportions in mixtures of the alternative fibers among themselves or with wood fibers can ensure paper with superior properties. A technological prospecting was conducted based on research on the Scopus data platform. Two combinations of keywords were used, and temporal and geographical analyses were performed. The 50 most recent articles up to 2023 that closely matched the use of the mentioned fibers in packaging were selected. Among them, classifications were made according to the work proposal, revealing the objective of finding fiber mixtures that ensure properties similar to or superior to the existing market products. Publications found using keywords containing the four selected fibers were analyzed. The low volume of publications indicates that this is a maturing topic. In the end, it was concluded that alternative fibers are being slowly introduced into the packaging industry, not with the aim of completely replacing conventional fibers, but to mitigate the adverse effects caused on nature.

**Keywords:** alternative fibers, packaging, triticale, sugarcane bagasse, oil palm, coconut.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ilustração do processo de refino e desfibramento da polpa.....	18
<b>Figura 2.</b>	Esquema da impressão offset.....	21
<b>Figura 3.</b>	Palha de triticales.....	27
<b>Figura 4.</b>	Área de cultivo do triticales no Brasil de 2012 a 2023, com estimativa de 2024, em mil hectares.....	32
<b>Figura 5.</b>	Polpa de cana de açúcar.....	33
<b>Figura 6.</b>	Palma.....	39
<b>Figura 7.</b>	Visualização dos diferentes valores de opacidade e maciez obtidos para os papéis produzidos a partir das fibras de CVF e <i>kenaf</i> .....	41
<b>Figura 8.</b>	Coco verde.....	43
<b>Figura 9.</b>	Evolução temporal de publicações sob os critérios da pesquisa 1.....	48
<b>Figura 10.</b>	Tendência geográfica com relação ao país de origem sob os critérios da pesquisa 1.....	48
<b>Figura 11.</b>	Evolução temporal de publicações sob os critérios da pesquisa 2.....	49
<b>Figura 12.</b>	Tendência geográfica com relação ao país de origem sob os critérios da pesquisa 2.....	49
<b>Figura 13.</b>	Tendência de abordagem dentro dos 50 artigos selecionados.....	52
<b>Figura 14.</b>	Avaliação de artigos encontrados a partir das palavras-chave contendo as fibras alternativas escolhidas.....	53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Classificação dos processos de extração da lignina conforme presença de enxofre.....	13
<b>Tabela 2.</b>	Relação dos aditivos mais utilizados na produção de papel e papelão e suas principais funções.....	14
<b>Tabela 3.</b>	Principais processos químicos de produção de polpa.....	16
<b>Tabela 4.</b>	Faixas de valores de $\Delta E_{ab}^*$ e suas interpretações.....	20
<b>Tabela 5.</b>	Palavras-chave utilizadas em pesquisas na plataforma Scopus e quantidade de resultados obtidos.....	25
<b>Tabela 6.</b>	Palavras-chave utilizadas para a prospecção das fibras selecionadas.....	26
<b>Tabela 7.</b>	Tipos de papel produzidos e a proporção de fibras de triticale em cada um...28	
<b>Tabela 8.</b>	Substâncias químicas utilizadas no teste de resistência química.....	30
<b>Tabela 9.</b>	Vantagens e desvantagens do uso das fibras de bagaço de cana de açúcar.....	35
<b>Tabela 10.</b>	Valores de opacidade e maciez para as diferentes proporções de fibras de CVF e <i>kenaf</i> .....	41



## SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	01
2.0	OBJETIVOS.....	07
2.1	OBJETIVO GERAL.....	07
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	07
3.0	REVISÃO.....	08
3.1	PANORAMA DO PLÁSTICO NO BRASIL.....	08
3.2	HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DO PAPEL.....	09
3.3	USO E PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE PAPEL E PAPELÃO.....	11
3.3.1	DEFINIÇÕES.....	11
3.3.2	PRINCIPAIS PROPRIEDADES.....	11
3.4	MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS E LIGNINA.....	12
3.5	MATÉRIAS-PRIMAS.....	13
3.6	MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE FIBRAS VIRGENS.....	15
3.6.1	MÉTODO MECÂNICO.....	15
3.6.2	MÉTODO QUÍMICO.....	15
3.6.3	MÉTODOS TERMOMECÂNICO E QUÍMICO TERMOMECÂNICO.....	16
3.7	PRODUÇÃO DE FIBRAS RECICLADAS.....	17
3.8	TRATAMENTO DE FIBRAS.....	17
3.8.1	REFINO E DESFIBRAMENTO.....	17
3.8.2	BRANQUEAMENTO.....	18
3.9	NORMAS PADRÕES E MODELOS DE TESTES.....	19

3.9.1	MÉTODO CIE - L*,a*,b*.....	19
3.9.2	TÉCNICA <i>OFFSET</i> DE IMPRESSÃO.....	20
3.9.3	IMPRIMIBILIDADE.....	21
3.9.4	SUPERCALANDRAGEM.....	21
3.9.5	<i>STANDARD TEST METHOD</i> .....	22
3.9.5.1	ASTM D6789-02.....	22
3.9.5.2	ASTM D5229.....	22
3.9.5.3	ASTM E1131.....	22
3.9.5.4	ASTM D4168.....	23
3.9.6	ISO 2836:2004.....	23
3.9.7	PADRÕES TAPPI.....	23
4.0	METODOLOGIA.....	25
5.0	AS FIBRAS ALTERNATIVAS.....	27
5.1	POLPA DE PALHA DE TRITICALE.....	27
5.2	POLPA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR.....	33
5.3	FIBRAS DE CASCAS VAZIAS DE PALMA.....	38
5.4	FIBRAS DE COCO.....	42
6.0	REVISÃO DOS ARTIGOS.....	48
7.0	CONCLUSÃO.....	54
8.0	REFERÊNCIAS.....	57



## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de armazenamento de alimentos levou civilizações primitivas a desenvolverem embalagens rudimentares que pudessem cumprir esse objetivo a partir de peles de animais, cascas de frutas ocas e folhas de árvores (CAMERON, 2018). Com o passar dos séculos, o conceito de embalagem evoluiu – surgiu a necessidade do armazenamento de bebidas, joias, perfumes *etc.* –, trazendo às embalagens propriedades e visuais que refletiam o seu objetivo de uso (MEYERS & GERSTMAN, 2005).

No início do século XIX, a tecnologia para a produção de latas e jarros a partir de vidro e metal laminado já era amplamente conhecida (JONES & TADAJEWSKI, 2016). Em 1798, com a invenção das máquinas de produção de papel e a pintura litográfica, tornou-se possível a produção de papelão – processo manual, demorado e de grande esforço físico. Em 1894, surge a caixa de papelão ondulado, em substituição às embalagens de madeira para longas viagens. As matérias-primas até então citadas eram capazes de produzir embalagens tradicionalmente reutilizáveis.

Em 1908, o sueco Jacques Brandenberger inventou o primeiro filme transparente a ser utilizado em embalagens. Tal filme era composto por celulose provinda da madeira de árvores e foi denominado “celofane”. A invenção do celofane foi o primeiro ato de grande impacto para a indústria de embalagens, principalmente para a indústria alimentícia, pois as técnicas de embalagem existentes até então eram incapazes de proteger os alimentos da água ou da degradação natural (HISANO, 2017).

A evolução das embalagens no Brasil começou em 1808 com a chegada da família real portuguesa, estabelecendo as primeiras indústrias no país. O setor cresceu rapidamente e, em 1907, já havia mais de 3.000 indústrias no Brasil. No início do século XX, a produção era pouco sofisticada, com quatro tipos principais de embalagens: sacos de estopa ou papel, potes ou garrafas de vidro, latas e barris de madeira. Com a chegada dos supermercados, as embalagens ganharam novas funções, além de proteger e transportar, adaptando-se para manter os produtos em perfeitas condições de consumo (NEGRÃO; CAMARGO, 2008).

Os conflitos da Segunda Guerra Mundial desencadearam desabastecimentos gerais que afetaram diversos setores da indústria. Frente a esse desafio, o plástico tornou-se uma alternativa viável para a substituição de vários materiais, dentre eles os que eram tradicionalmente utilizados na produção de embalagens (GEYER, 2020). Inicia-se, então, um

problema ambiental crescente relacionado ao gerenciamento de descarte das embalagens plásticas, majoritariamente de uso único, com vida útil de até 3 anos.

Em 1950, ano referência no início da produção em massa de plástico para consumo, a produção anual foi, aproximadamente, de 5 milhões de toneladas (NAPPER & THOMPSON, 2020). Segundo relatório de 2022 da *Plastics Europe*, a produção global de plásticos de origem fóssil em 2021 foi de 352,3 Mt, número muito superior às produções de plásticos biodegradáveis (5,9 Mt) e reciclados (32,5 Mt). Além dos problemas ambientais atrelados à emissão de gases de efeito estufa (GEEs) devido ao ciclo de produção dos plásticos de origem fóssil (DE WIT *et al.*, 2019), a disposição incorreta dos resíduos plásticos representa um desafio a ser transposto pela sociedade moderna. Foram geradas 6,3 bilhões de toneladas de resíduos plásticos, dos quais 79 % (4,98 bilhões de toneladas) foram depositados no meio ambiente (JIA, EVANS & LINDEN, 2019).

É crescente a quantidade de estudos que reportam a presença de materiais gerados a partir de fragmentos de materiais plásticos e microplásticos, na água do mar e no organismo de animais marinhos. A ingestão desses materiais provou-se danosa ao metabolismo dos animais, afetando suas funções cerebrais e intestinais, além da sua reprodução. A explicação reside na natureza hidrofóbica dos plásticos, que permite a adsorção de substâncias orgânicas tóxicas, como os bifenilos policlorados (PCBs), envenenando os animais que ingerem esses fragmentos (NELMS *et al.*, 2019).

Além dos microplásticos, também há outras questões ambientais associadas à disposição inadequada de plásticos no mar. Atualmente existe o chamado *Great Pacific Garbage Patch*, ou a Grande Porção de Lixo do Pacífico, que é uma coleção de resíduos localizada no Oceano Pacífico Norte. Essa porção abrange cerca de 620.000 milhas quadradas de área, ou aproximadamente 1.600.000 quilômetros quadrados – duas vezes o tamanho do estado do Texas, nos Estados Unidos (KOTTASOVÁ, 2023), ou ainda maior que o estado do Amazonas, que possui pouco mais de 1.500.000 quilômetros quadrados. Trata-se do maior acúmulo de plásticos do mundo, possuindo grande mobilidade após adentrar nas correntes marítimas. É composto por diversos materiais plásticos, dentre eles redes de pesca, embalagens, isopor etc. Tal coleção de resíduos não se limita à superfície do mar, podendo até mesmo ocupar de centímetros a metros de profundidade em alguns pontos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022).

A indústria e o mercado de embalagens no Brasil estão entre os mais importantes globalmente e têm mostrado um crescimento contínuo nos últimos anos. Esse crescimento acelerou após a pandemia de covid-19, devido ao aumento da demanda por embalagens para *delivery* e comércio eletrônico, por exemplo (HORTA *et al.*, 2020). Em um estudo macroeconômico, a Fundação Getúlio Vargas (FGV) revelou resultados sobre a indústria brasileira de embalagens, no qual o valor bruto da produção física de embalagens alcançou 144,4 bilhões de reais em 2023, representando um crescimento de 17,21 % em comparação a 2022. Na participação dos setores no valor bruto da produção, os setores de papelão ondulado, cartolina e papel-cartão, papel e madeira vêm apresentando desempenho positivo ao longo da série iniciada em 2019 (ABRE, 2024).

O plástico está presente em diversos segmentos da indústria de embalagens. Porém, diversos esforços para implementação de práticas sustentáveis focam na redução do uso de plástico nessa indústria, visando o aumento da produção de embalagens ecológicas e biodegradáveis, que se degradam naturalmente por meio de processos orgânicos promovidos pelo ambiente onde estão. Assim, a consciência ambiental e social é um dos maiores desafios do setor de embalagens. Devido às exigências dos clientes, o mercado deve atentar ao impacto ambiental que gera, devendo buscar maneiras de torná-lo mais sustentável.

Em estudo recente, Terzioglu *et al.* (2024) discutem soluções alternativas para o uso de plástico na indústria de embalagens. Após extensa pesquisa em diversas literaturas, os pesquisadores foram capazes de dividir 200 soluções em 11 *clusters* de acordo com as similaridades das soluções. Um desses *clusters* é a substituição de plástico por materiais não plásticos, como papel e alumínio. No entanto, o estudo reforça que a substituição adequada deve levar em consideração o ciclo de vida do plástico, uma vez que a troca, do ponto de vista ambiental, pode não ser vantajosa o suficiente. Além disso, a substituição deve levar em consideração o objetivo final da embalagem a ser produzida. Para a indústria de alimentos, por exemplo, levam-se em consideração a selabilidade térmica, a imprimibilidade, as tensões e deformação de ruptura, as propriedades de barreira a água, a óleo e a gases, a relação custo-benefício, dentre outros (DESHWAL, PANJAGARI & ALAM, 2019).

Matérias-primas alternativas para a produção de embalagens são o papel e o papelão, provenientes de fontes renováveis. No entanto, a sustentabilidade desses materiais é comprometida quando as fibras são extraídas da madeira de árvores, devido aos impactos ambientais do desmatamento (WANG *et al.*, 2008).

Em um estudo realizado por Wang *et al.* (2008), que comparou os impactos das embalagens de papel com as de plástico, utilizando como parâmetro a produção de sacolas comuns de ambos os materiais, constatou-se que as embalagens de plástico apresentavam um menor impacto geral. As embalagens de papel mostraram-se superiores apenas no menor uso de combustíveis fósseis e minerais, e no menor ataque à camada de ozônio.

O estudo empregou o método *Life Cycle Assessment*, ou Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma ferramenta analítica que avalia os impactos desde a aquisição da matéria-prima até sua disposição final, considerando a energia utilizada em todo o processo, bem como o transporte e a distribuição. Os resultados favorecem os plásticos, como detalhado a seguir, em algumas das categorias distribuídas pelos pesquisadores:

- Carcinogênicos: a capacidade de ampliar a incidência de câncer em seres humanos, um risco maior em embalagens de papel, segundo o estudo;
- Mudanças climáticas: características associadas ao uso de energia não renovável consumida, a qual é maior na produção tradicional de papel;
- Radiação e destruição da camada de ozônio: a produção de embalagens plásticas pode liberar substâncias de elevada radiação UV, que atacam e depreciam a camada de ozônio;
- Ecotoxicidade: a liberação de substâncias tóxicas para o ar, solo ou água é maior para o papel;
- Acidificação/Eutrofização: a produção de papel libera substâncias ácidas em solo e água;
- Uso de terra: o estudo considera como única fonte de papel a polpa de árvores; logo, associa a produção de papel ao desmatamento, atribuindo impactos negativos à sua produção;
- Combustíveis fósseis e minerais: consumo menor para os papéis, pois o plástico é diretamente proveniente dessa matéria-prima.

Expõe-se, então, um cenário delicado: a produção atual de embalagens de papel não é sustentável o suficiente para suprir a demanda de embalagens plásticas. Dessa forma, a substituição das embalagens plásticas pelas de papel pode ser feita mediante a aplicação de métodos para a redução de seus impactos ambientais. Uma forma constantemente avaliada é o uso de fontes alternativas para a produção dessas embalagens.

Uma definição técnica para fibras alternativas é fornecida por ASHORI (2006), que as descreve como "materiais celulósicos não lenhosos dos quais podem ser extraídas fibras para a fabricação de papel". No entanto, é importante observar que o papel resultante da utilização exclusiva de fibras alternativas costuma não possuir propriedades desejáveis, como baixa drenabilidade, permeabilidade e resistência ao rasgo. Por esse motivo, geralmente são utilizadas em uma mistura com fibras de origem lenhosa (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016).

Entre as vantagens das fibras alternativas está a possibilidade de sua produção em pequena escala e com tecnologias convencionais (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016), o que indica que pequenos e grandes produtores podem se beneficiar delas sem a necessidade de adaptarem suas plantas produtivas. A necessidade da implementação de alternativas já era alvo de estudos décadas atrás. Em 2007, estimou-se que o consumo mundial de papel atingiria entre 400 e 425 milhões de toneladas por ano em 2010, e seria necessário entre 50 e 100 milhões de hectares de florestas apenas em países em desenvolvimento para manter essa demanda (ASHORI, 2006).

Ashori (2006) enumera várias fontes potenciais de fibras alternativas, incluindo palha, bagaço de cana, bambu, *kenaf* (*Hibiscus cannabinus*), cânhamo, juta, sisal, abacá, algodão e junco. Essas fontes possuem fibras de comprimento semelhante às fibras de origem lenhosa, quantidade equivalente de celulose e menor quantidade de lignina, simplificando o processo de deslignificação e reduzindo a necessidade de produtos químicos.

De acordo com Liu (2000), se a proporção de fibras alternativas de *kenaf*, juta e outras fibras aliadas de mesma origem etimológica (ROWELL; STOUT, 2006) substituir de 10 a 15% das fibras lenhosas, as propriedades mecânicas, ópticas e de superfície do papel resultante não seriam afetadas. No entanto, existem diversas desvantagens associadas ao uso de fibras alternativas em geral quando em maior volume na indústria de papel e papelão, como destacado por Ashori (2006):

- Várias das fontes dessas fibras alternativas possuem cultivos anuais e seria necessário armazená-las para que fosse possível um suprimento constante ao longo da produção;
- Todas as plantas utilizadas como fontes de fibras possuem alto volume (menor densidade) em comparação à madeira, ou seja, em comparação, seria necessário um armazém muito maior para armazená-las do que para armazenar a mesma quantidade de madeira;

- Há alto teor de sílica nessas plantas e sua remoção e descarte tornam-se novos problemas a serem tratados pela indústria.

Apesar de ditas desvantagens, o uso de fibras alternativas de origem não-lenhosa ainda é incentivado por pesquisadores. Dentre os motivos destacados, está presente a escassez de matéria-prima para fibras lenhosas, enquanto, em contrapartida, há diversas fontes não-lenhosas que poderiam substituir uma parcela do mercado produtivo. Além disso, o uso de algumas fibras alternativas pode vir a fazer com que o produto final obtenha propriedades vantajosas que não possuiria caso fosse composto apenas de fibras lenhosas (ABD EL-SAYED *et al*, 2020).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é abordar matérias-primas alternativas que tenham volume produtivo significativo em solo brasileiro para a produção de fibras destinadas à indústria de papel e papelão para embalagens.

### **2.2. Objetivos específicos**

Os seguintes objetivos específicos foram estipulados:

- Avaliar os aspectos produtivos das embalagens com fibras alternativas;
- Comparar as propriedades obtidas das embalagens com fibras alternativas com embalagens de origem lenhosa;
- Identificar fibras alternativas mais promissoras para confecção de embalagens no Brasil.;
- Identificar os países com maior produção científica na área e categorizar os artigos com base em sua finalidade.

### 3. REVISÃO

#### 3.1. PANORAMA DO PLÁSTICO NO BRASIL

Os materiais plásticos ao longo do tempo foram ganhando espaço no mercado, devido às suas características, como resistência mecânica e química, baixo peso, facilidade de aditivação e reciclabilidade, em substituição a diversos materiais, tais como aço, vidro e madeira. Tornaram-se então de uso comum no cotidiano e essencial em setores como embalagens, construção, transporte, saúde e eletrônica. Porém, apesar dos benefícios citados, os impactos ambientais gerados pelo consumo de plástico no Brasil são significativos, causando danos ao meio ambiente e gerando resíduos mal destinados. Conforme relatório da Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST), o Brasil foi responsável pela produção de 1,9 % do total de plásticos no ano de 2020. Em contrapartida, segundo os dados do Banco Mundial, o Brasil foi o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo em 2019, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. Desse total, são coletados 91 %; porém, somente 1,28 % é efetivamente reciclado, ou seja, reprocessado na cadeia de produção como produto secundário.

Em uma análise individual, dados até 2019 indicam que um brasileiro produzia, em média, 1 kg de resíduos plásticos em 7 dias, emitindo 0,3 kg de CO<sub>2</sub>. Desse total, 900 g eram coletados, dos quais 600 g eram destinados para aterros e 200 g eram descartados inadequadamente, resultando em apenas 100 g direcionados para a reciclagem. Todo o processo, do consumo ao descarte, leva, em média, a 200 g de resíduos mal administrados que correm o risco de serem introduzidos na natureza (De WIT *et al.*, 2019). Tomando como base a população do Brasil em 2022 (cerca de 203,1 milhões de habitantes), conforme relatado pela Agência de Notícias (2022), pode-se estimar uma quantidade de plásticos inadequadamente descartados equivalente a 60,9 mil toneladas.

No entanto, encontram-se em vigor medidas que visam à diminuição da disposição incorreta de resíduos plásticos. Dentre elas, destaca-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Tal norma possui como principais objetivos promover a redução do uso de plásticos, a destinação adequada de resíduos, a reutilização e a reciclagem. A lei utiliza diversos instrumentos para alcançar os objetivos propostos, dentre eles a coleta seletiva.

A Lei nº 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010, institui que: “art. 35. Sempre que estabelecido sistema de coleta seletiva pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos

sólidos e na aplicação do art. 33, os consumidores são obrigados a: I - acondicionar adequadamente e de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados; II - disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou devolução.” (BRASIL, 2010). Não obstante, estudos revelam que a coleta seletiva alcança apenas cerca de 41% dos municípios brasileiros (cerca de 2.283 cidades), abrangendo a reciclagem de apenas 10% de todo o potencial de conteúdo reciclável. Além disso, tal coleta concentra-se em grandes centros urbanos, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, o que indica um grau de negligência para com outras regiões do país (CONKE; DO NASCIMENTO, 2018).

O uso de plásticos como materiais de embalagem transcende décadas na história moderna. A falta de urgência na criação e na implementação de políticas públicas eficazes causam impactos cada vez mais perceptíveis ao meio ambiente. Tal como outros países, o Brasil consome um volume crescente de plásticos, gerando cada vez mais resíduos descartados irregularmente. Frente aos dados até então expostos, urge a necessidade da implementação de substitutos viáveis capazes de agregar propriedades semelhantes ou superiores ao plástico, ter a possibilidade de serem inseridos em uma economia circular e possuírem viabilidade econômica para sua produção.

### 3.2. HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DO PAPEL

O papel, como o conhecemos hoje, teve sua origem na China por volta do ano 105 d.C., utilizando principalmente o algodão como matéria-prima. A qualidade do papel era notável, e a produção era um monopólio chinês até o ano 751 d.C. Somente no século XI, os árabes introduziram a técnica de fabricação de papel na Espanha e, subsequentemente, no Ocidente (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

A indústria papeleira desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social durante o período de industrialização. Pode-se argumentar que o papel teve um impacto tão significativo no crescimento econômico global quanto a máquina a vapor, embora a história econômica geralmente dê mais ênfase à última. (JUHA *et al.*, 2013). A Revolução Industrial e o crescimento dos meios de comunicação impressos, como livros, jornais e revistas, provocaram um aumento significativo no consumo de papel. A partir do século XVIII, importantes avanços tecnológicos possibilitaram a fabricação de papel a partir de madeira, o que aumentou consideravelmente a capacidade de produção devido à disponibilidade da matéria-prima (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Além disso, a indústria passou

por um período de rápido crescimento, pelo menos até o início do século XXI. Nos Estados Unidos, por exemplo, a capacidade total da indústria aumentou em 20 % entre 1978 e 1992 (JUHA *et al.*, 2013).

A indústria de celulose e papel no Brasil teve um desenvolvimento tardio, iniciado em 1808 com a chegada da família real e a corte portuguesa, levando à criação de instituições e iniciativas culturais. Foi inaugurada, pelo Frei José Maurício da Conceição Velloso, uma fábrica de papel no Brasil, que utilizava a embira como matéria-prima, um arbusto com fibras resistentes. Embora tenha havido tentativas anteriores de estabelecer manufaturas de papel devido à presença da família real, foi somente em 1837 que André Gaillard inaugurou uma fábrica de papel no Rio de Janeiro. Em 1841, outra fábrica foi aberta na freguesia do Engenho Velho/RJ por Zeferino Ferraz, ambas produzindo papel de baixa qualidade usado principalmente em pacotes e embalagens (JUHA *et al.*, 2013).

Posteriormente, outras fábricas foram estabelecidas, mas somente no final do século XIX a demanda por papel no Brasil começou a ser atendida. No início do século XX, o eucalipto começou a ser usado como matéria-prima para celulose, mas somente entre os anos de 1957 e 1958 a produção em massa de celulose a partir do eucalipto ocorreu no Brasil (JUHA *et al.*, 2013).

Atualmente, o Brasil produz diversos tipos de papéis, abrangendo papel cartão, papéis de imprimir e escrever, de imprensa, papéis sanitários como toalhas e papéis higiênicos, bem como papéis especiais, incluindo papel-moeda, filtros de café, produtos autoadesivos e papéis metalizados, entre outros (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Essa variedade coloca o Brasil como um dos principais produtores globais de papel. Além disso, o país é pioneiro no cultivo de eucalipto para a fabricação de papel, destacando-se na exportação de celulose de fibra curta. As indústrias brasileiras de celulose e papel criam empregos e riqueza e desempenham um papel crucial na expansão de florestas plantadas (D'ALMEIDA *et al.*, 2013).

### 3.3. USO E PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE PAPEL E PAPELÃO

#### 3.3.1. Definições

A Organização Internacional de Normalização define como “papel” o substrato feito de fibras vegetais que possui gramatura inferior a 250 gramas por metro quadrado (gsm), enquanto define “papelão” aquele que possui gramatura superior a 250 gsm. Ambos fazem parte de um amplo portfólio de materiais que atuam como alternativas aos plásticos na produção de embalagens. Sua versatilidade provém da capacidade de aprimoramento de suas propriedades por revestimento com polímeros e laminados, sendo também resistentes, flexíveis e passíveis de impressão (CAMERON, 2018).

#### 3.3.2. PRINCIPAIS PROPRIEDADES

Algumas das principais propriedades observadas em uma embalagem de papel ou papelão são:

- **Rigidez:** Resistência à deformação. Quanto mais rígido, mais leve o material poderá ser, garantindo à embalagem a capacidade de sustentar seu próprio peso;
- **Imprimibilidade:** A qualidade da superfície disponível para impressão, importante para que todas as informações desejadas estejam nítidas e bem fixadas;
- **Absorção:** A capacidade de retenção de líquidos, o que influencia na interação com aditivos líquidos que possam integrar com a embalagem como, por exemplo, adesivos à base de água;
- **Força de perfuração:** Resistência à pressão localizada, como objetos pontiagudos ou cortantes. Quanto maior a resistência, maior a possibilidade do uso para armazenamento de grandes quantidades, como sacos de cimento, por exemplo;
- **Tensão de ruptura:** Resistência a forças de estiramento ou alongamento, as quais costumam ser altas, permitindo tensão constante durante processos de impressão, laminação e na produção de corrugados;
- **Resistência ao rasgo e à compressão:** Essencial para avaliação de empilhamentos;
- **Resistência a gorduras:** Resistência à penetração de substâncias oleosas;
- **Maciez ou rugosidade:** Avaliação da uniformidade da superfície do papel ou papelão.

O papel e o papelão destinados à indústria de embalagens podem ser combinados com outros materiais para agregar propriedades desejadas, dependendo do seu uso. Por exemplo, uma embalagem de alimentos pode conter alumínio laminado, que irá prover uma barreira aos gases, vapor d'água e radiação UV, ou polímeros como polietileno e polipropileno, que adicionam resistência à água, aderência entre o papel e o alumínio e também uma ótima selagem térmica da embalagem, evitando a entrada de gases através da região selada. A maior problemática envolvida na adição de outros materiais é que o processo de separação e reciclagem da embalagem torna-se ainda mais difícil (CAMERON, 2018). Já Yabannavar; Bartha (1993) indicam que a adição de revestimento por alguns materiais, como ceras e até mesmo polietileno, não previne a mineralização total do papel e do papelão quando em contato com um solo por um período de tempo.

### 3.4 MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS E LIGNINA

A lignocelulose é composta por lignina (10 a 25 %), hemicelulose (20 a 35 %) e celulose (35 a 50 %). Por sua vez, a lignina é uma molécula componente da madeira que promove forma e proteção às plantas e deve ser removida das fibras durante a produção de papel (PERMATA *et al.*, 2021). Sua remoção é necessária pois essa molécula influencia no amarelamento do papel com o tempo, alterando suas propriedades ópticas, uma vez que um papel amarelado não é considerado visualmente agradável para muitos objetivos.

Malachowska *et al.* (2020) ilustram em seu estudo que há motivos mais aprofundados que levam à remoção de lignina da polpa. Essa molécula é muito suscetível à oxidação pelo oxigênio do ar e a oxidação da celulose provoca o envelhecimento do papel, ocasionando a degradação de suas propriedades desejadas, como a resistência mecânica. Além de seus efeitos nas propriedades ópticas, a lignina forma fortes ligações com a celulose e a hemicelulose, dificultando a separação do material em fibras, tornando-se, assim, necessária a sua remoção.

O processo de remoção de lignina é denominado deslignificação que é realizado pelo tratamento químico (YASH DHOTE *et al.*, 2023). Atualmente, existem quatro processos industriais para isolar a lignina; esses processos são categorizados conforme a presença de enxofre no produto final (WANG *et al.*, 2020). A Tabela 1 apresenta o processo de extração e os agentes utilizados, mediante classificação da presença de enxofre.

**Tabela 1.** Classificação dos processos de extração da lignina conforme presença de enxofre.

Processos com enxofre		Processos sem enxofre	
<i>Kraft</i>	$NaOH + Na_2S$ (licor branco)	Lignina Organosolv	Ácido acético/Ácido fórmico/Água
Lignosulfonatos	$HSO_3$	Soda	$NaOH$

**Fonte:** Elaboração própria, adaptado de WANG *et al.* (2020).

Dentre os processos citados, o *Kraft* é o método mais utilizado para a extração de lignina, representando 90 % da capacidade de produção global (Azadi *et al.*, 2013).

### 3.5 MATÉRIAS-PRIMAS

A matéria-prima principal na produção padrão de papel de embalagem é a fibra de celulose retirada de árvores ou reciclada de resíduos. No que tange às propriedades do produto final, o comprimento da fibra é a característica mais importante. Fibras longas proporcionam resistência mecânica e fibras curtas proporcionam suavidade para impressão. Além das fibras de celulose, o papel contém, em menores proporções, lignina, hemicelulose e outros carboidratos menores (CAMERON, 2018).

As árvores angiospermas, como álamos, eucaliptos e bétulas, são classificadas como madeira dura. Já as árvores coníferas, como abetos, lariços e pinheiros, são conhecidas como madeira macia. Na indústria, essas árvores são cultivadas com o objetivo específico da produção de fibras virgens, sendo constantemente replantadas. Segundo Cameron, (2018), as faixas de comprimento mais comumente utilizadas na produção de papel são de 1,1 a 1,5 mm (para as fibras curtas de madeira dura) ou 3 a 4 mm (para as fibras longas de madeira macia).

Em um estudo realizado em 2022, Coelho *et al.*, (2022), concluem que a rotatividade das plantações de eucalipto em áreas antes ocupadas pela mata atlântica, no Brasil, pode vir a reduzir a recuperação da flora nativa quando comparada a outras práticas de exploração madeireira. Além disso, Wells *et al.*, (2023), ressaltam que o cultivo de plantas não nativas pode ser prejudicial para as plantas nativas devido à disputa por nutrientes e água, podendo esgotá-los.

Por outro lado, o papel não necessariamente precisa ser composto integralmente por fibras virgens. Uma porcentagem de sua estrutura pode ser proveniente das fibras recicladas.

As fibras recicladas, por sua vez, são misturas de fibras de madeiras dura e macia, de comprimento variável. Há um limite para que as mesmas fibras possam ser utilizadas na produção de novas embalagens. Isso porque a cada reciclo, a fibra diminui de tamanho, afetando negativamente a resistência mecânica do material. Diz-se que a fibra é considerada muito pequena após seu sétimo reciclo. Além disso, a total remoção de tintas, plásticos, ceras e adesivos que compunham o material a ser reciclado, muitas vezes, é inviável. Sendo assim, o material gerado a partir de fibras recicladas pode apresentar pontos, manchas e até mesmo palavras escritas em sua superfície.

Diversas substâncias podem ser adicionadas como aditivos na produção de papel e papelão para embalagem. Esses aditivos possuem determinadas funções, visando atingir as especificações exigidas para produção e também pelo cliente, se a produção for sob demanda. A Tabela 2 engloba alguns dos aditivos mais utilizados e suas funções.

**Tabela 2:** Relação dos aditivos mais utilizados na produção de papel e papelão e suas principais funções.

Aditivo	Função
Cargas (ex: caulim, giz, dióxido de titânio)	Ampliam a imprimibilidade do papel, a brancura, a maciez da superfície, o brilho e a opacidade.
Pigmentos	Para alcançar alguma cor desejada, embora efeito similar possa ser atingido com a impressão do produto final.
Agentes branqueadores (FWA, ou <i>fluorescent whitening agents</i> ) e clareadores (OBA, ou <i>optical brightening agents</i> )	Aumentam a brancura do papel, auxiliando na estética do produto final sob a luz do varejo.
Agentes ligantes (ex: amido)	Utilizados para unir as fibras, restringindo seu movimento e gerando um material resistente. Também tem a função de unir as cargas às fibras.
Agentes de dimensionamento (ex: dímero ceteno alquilado, sulfato de alumínio)	Controla a penetrabilidade de água e tinta. Na ausência deles, a tinta poderia se espalhar sem controle pelas fibras.
Resinas de resistência úmida	Conferem resistência à água no produto final, quando conveniente.
Aditivos para resistência a óleos e graxas	Conferem resistência a óleos e graxas no produto final, quando conveniente.

Fonte: Elaboração própria, dados de (CAMERON, 2018).

### 3.6 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE FIBRAS VIRGENS

Cameron, (2018), cita dois métodos principais de produção de fibras virgens e dois métodos que utilizam uma mescla das duas principais técnicas. São eles: mecânico, químico, termomecânico (TMP) e químico termomecânico (CTMP ou semiquímico). Os métodos serão abordados em mais detalhes abaixo.

#### 3.6.1. Método mecânico

Esse é o processo mais simples e barato de produção de fibras virgens. Nele, as fibras são lavadas para retirada de impurezas brutas, como pedras, e passam por um processo de moagem. Atualmente, utilizam-se discos metálicos rígidos chamados pratos refinadores para moer as lascas de madeira. Apesar de barato, esse processo possui uma desvantagem que é a incapacidade de remoção de lignina e outras impurezas; com isso, as fibras desbotam com o tempo e a polpa produzida é utilizada para papéis de baixa qualidade ou para adicionar volume a polpas químicas e semiquímicas. A polpa também pode ser utilizada como camada intermediária na produção de *folding boxboard* (FBB), um tipo de papelão utilizado para produção de caixas (CAMERON, 2018). Apesar disso, a polpa produzida pelo método mecânico pode ser branqueada pela adição de peróxido de hidrogênio ou hidrossulfito de sódio (MAJOR *et al.*, 2005).

#### 3.6.2. Método químico

Em comparação com o método mecânico, é mais custoso do que o método físico por demandar energia térmica e substâncias químicas, gerando fibras de maior qualidade e mais esbranquiçadas. Há dois principais métodos de produção química de fibras: o de sulfato alcalino (conhecido como *Kraft*) e o de sulfito ácido. O primeiro método produz as fibras mais fortes, todas provenientes de celulose. Para a digestão, o método do sulfato utiliza uma combinação de hidróxido de sódio com sulfeto de sódio; já o método do sulfito utiliza sais de amônio ou metálicos provenientes do ácido sulfuroso, produzindo sulfitos ou bissulfitos, e gera um produto final de maior qualidade para branqueamento e também uma maior quantidade de polpa. Isso se deve à natureza ácida dos reagentes utilizados, que hidrolisam as impurezas; o lado negativo é que a mesma natureza ácida também hidrolisa parte da celulose, resultando em um produto com menor força, quando comparado ao método do sulfato.

Os processos químicos de produção de polpa são diversos e a Tabela 3 reúne alguns dos mais conhecidos.

**Tabela 3:** Principais processos químicos de produção de polpa.

Natureza do método	Método
Alcalino	Soda
	<i>Kraft</i>
	Sulfito alcalino
	Sulfito neutro
Ácido	Sulfito ácido

Fonte: Elaboração própria, dados de CAMERON (2018).

### 3.6.3. Métodos termomecânico e químico termomecânico

Esses dois métodos são intermediários entre os métodos mecânico e químico e são utilizados para fins de diminuição de custos de produção. O método termomecânico utiliza água quente para o amolecimento das fibras e a diminuição dos danos provocados a elas pelo método mecânico. Já o método químico termomecânico utiliza uma digestão parcial das fibras em temperaturas elevadas para em seguida seguir com o processo mecânico convencional.

O próximo passo é a inserção da polpa adquirida em um grande tanque agitado por uma lâmina ao fundo, o hidrapulper. Nesse equipamento, a polpa é dispersa em água entre uma concentração de 0,3 % a 3,0 %, a depender do produto desejado. As pequenas concentrações são utilizadas para produção de papel e as grandes concentrações são utilizadas para produção de papelão. No hidrapulper, a adição de polpa e outros aditivos é denominada *furnish* ou mistura. Há ainda a possibilidade da polpa virgem não ser produzida pelos responsáveis pela produção do produto. Logo, alguns produtores podem optar por sua compra.

### 3.7. PRODUÇÃO DE FIBRAS RECICLADAS

A produção de fibras a partir de material reciclado também se dá no hidrapulper. O material reciclado, devidamente selecionado e descolorido, é inserido no hidrapulper sob as mesmas condições de uma fibra virgem. No entanto, o produto possui menor qualidade em comparação e, algumas vezes, é necessário inserir 20 % a mais de seu peso para garantir uma qualidade competitiva. O papelão proveniente das fibras recicladas é denominado *waste-based board* (WBB), *coated recycled board* (CRB) ou *white line chip* (WLC).

WBB (papelão reciclado): utilizado para fins que não demandem alta qualidade de impressão. Possuem baixo acabamento estético.

CRB (papelão reciclado revestido): semelhantes ao WBB, porém possuindo uma camada de revestimento, que lhes confere propriedades adicionais a depender do uso final. Esse revestimento melhora sua capacidade de impressão e aparência.

WLC (papelão duplex branco): semelhante ao CRB, porém possui uma camada de revestimento branco em sua superfície, o que lhe garante uma boa base de impressão e uma estética agradável.

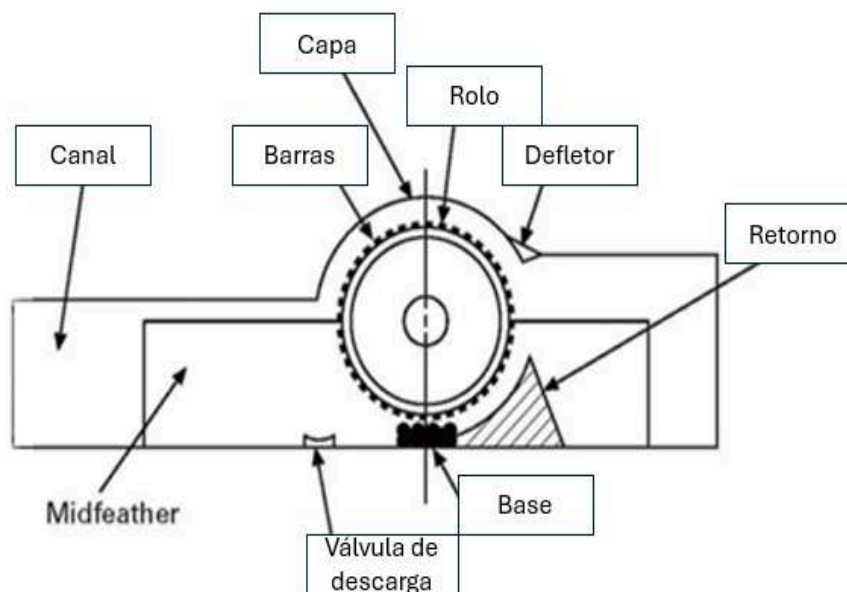
### 3.8. TRATAMENTO DE FIBRAS

A fibra extraída não está apta para processamento de imediato. Primeiro, ela precisa passar por dois processos básicos da produção de papel: refino, desfibramento e branqueamento.

#### **3.8.1. Refino e desfibramento**

Esse processo tem como objetivo ampliar a flexibilidade e a superfície de contato das fibras, mas acaba encurtando seu comprimento - o que resulta em um produto mais frágil. A polpa, suspensa em água, é submetida a uma passagem em uma superfície rotacional, causando desfibrilação e inchaço. Esse processo pode ser contínuo ou em batelada, a depender do refinamento exigido. O processo é ilustrado na Figura 1.

**Figura 1:** Ilustração do processo de refino e desfibramento da polpa.



Fonte: Adaptado de CAMERON (2018)

### 3.8.2. Branqueamento

O processo de *bleaching*, ou branqueamento, das fibras de papel é o responsável pela remoção de colorações indesejáveis. O processo de amarelamento do produto proveniente dos processos químicos tende a ser menos acentuado do que o de processos mecânicos. Isso porque os processos químicos passam pela deslignificação, com agentes que eliminam parte da lignina. O processo de branqueamento tem como função eliminar a maior porção restante da lignina por meio de sua oxidação por diferentes agentes.

Esse processo é tradicionalmente realizado com cloro, mas, por questões ambientais e de segurança, alternativas tornaram-se mais populares e vantajosas, como *elemental chlorine free* (ECF) e *totally chlorine free* (TCF).

- ECF: Utiliza dióxido de cloro em vez de gás cloro ou hipoclorito de sódio. Esse processo possui a desvantagem de produzir compostos organoclorados que precisam ser tratados antes de seu descarte.
- TCF: Utiliza apenas substâncias químicas com base no oxigênio, como gás oxigênio, ozônio e peróxidos. Esse método é considerado mais verde do que o ECF pelo fato de não gerar compostos organoclorados.

### 3.9. NORMAS PADRÕES E MODELOS DE TESTES

No desenvolvimento dos experimentos utilizados como base neste trabalho, foram empregadas diversas normas e métodos de testagem e quantificação. Este tópico possui como objetivo abordar normas e técnicas utilizadas, fundamentando seus princípios básicos.

#### 3.9.1 Método CIE - $L^*$ , $a^*$ , $b^*$

Esse método, criado pela Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Eclairage*, ou CIE), consiste na definição de cores em termos de três dimensões: luminosidade - ou claridade ( $L^*$ ); eixos vermelho-verde ( $a^*$ ), em que valores positivos indicam vermelhidão e valores negativos indicam mais verde; e eixos amarelo-azul ( $b^*$ ), em que valores positivos indicam mais amarelo e valores negativos indicam mais azul. Tal método é detalhado por Mokrzycki; Tatol, (2011), e utiliza ainda a noção da existência de três tipos de receptores de cores nos olhos humanos. Por ser linear, o modelo quantifica, aproximadamente, a diferença visual captada pelos olhos humanos:

Tais parâmetros são utilizados para calcular a diferença total perceptível de cor ( $\Delta E_{ab}^*$ ), segundo a equação:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (\text{Equação 01})$$

O índice 2 indica o valor após algum tratamento e o índice 1, o valor antes de algum tratamento.

A interpretação da qualidade de impressão para a indústria gráfica é dada por faixas de valores para  $\Delta E_{ab}^*$ , conforme a Tabela 4.

**Tabela 4:** Faixas de valores de  $\Delta E_{ab}^*$  e suas interpretações.

Valor de $\Delta E_{ab}^*$	Percepção de cor	Tolerância
$\leq 1.0$	Diferença não detectada	
1 - 2	Diferença detectada por observadores mais atentos	Aceitável
2 - 3.5	Diferença detectada por observadores menos atentos	
3.5 - 5	Todos os observadores podem perceber diferenças	Não aceitável
$>5$	Um observador enxergará duas cores distintas	

Fonte: Elaboração própria, dados de (RUDOLF *et al.*, 2023)

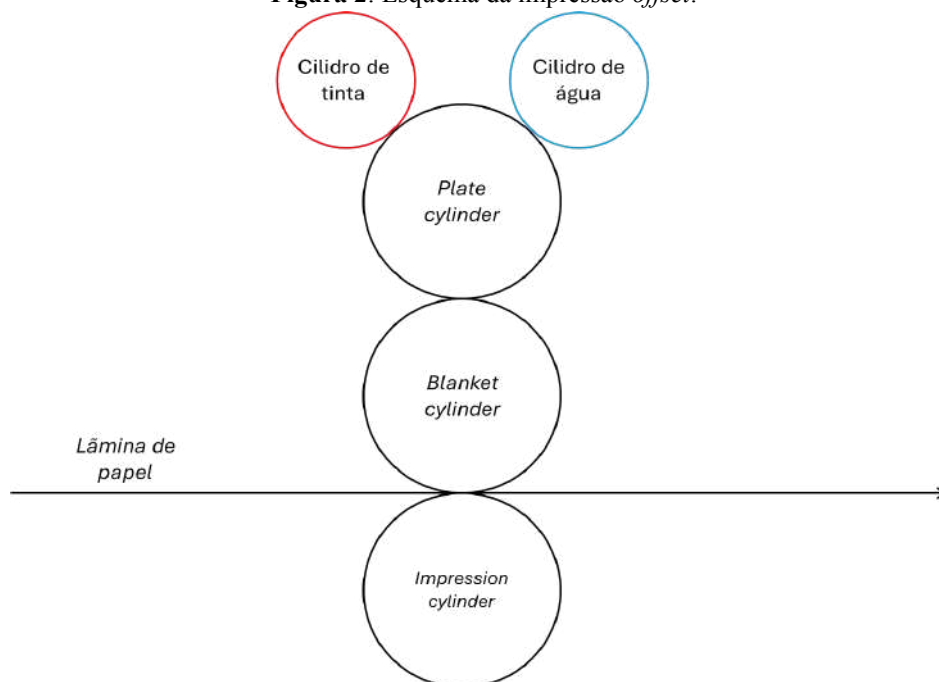
### 3.9.2. Técnica offset de impressão

De acordo com *THE EDITORS OF ENCYCLOPEDIA BRITANNICA* (2016), a técnica *offset* de impressão baseia-se no princípio da imiscibilidade entre água e óleo.

Nessa técnica, o papel é prensado entre dois cilindros contendo a imagem a ser impressa. Segundo *EXPRESS CARDS* (2016), o primeiro passo da técnica é separar a imagem a ser impressa em diferentes cores e decodificar cada espectro em placas de alumínio que, em seguida, são prensadas em cilindros emborrachados (*plate cylinder*). Os cilindros emborrachados entram em contato com outros dois cilindros: um contendo água e outro contendo tinta à base de óleo vegetal. A parte do cilindro emborrachado que não contém imagens a serem impressas é, então, embebida em água. Já a parte com imagem, embebida em tinta, é transferida para outro cilindro (*blanket cylinder* ou *offset cylinder*).

Ainda segundo *EXPRESS CARDS* (2016), o papel é alimentado à impressora por jatos de ar, garantindo que apenas uma folha seja inserida por vez. A impressão ocorre no momento que a folha passa pelo *blanket cylinder* e um terceiro cilindro em branco (*impression cylinder*). Esse processo é repetido a cada cor que compoñha a imagem. O papel com a tinta a secar é, então, empilhado com uma fina camada de pó como separador, permitindo que a secagem ocorra sem transferências de tinta entre uma folha e outra. A Figura 2 ilustra o processo.

**Figura 2:** Esquema da impressão *offset*.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.9.3 Imprimibilidade

A propriedade de imprimibilidade abrange tanto a qualidade com que uma tinta pode ser aderida ao papel durante o ato de impressão quanto também à facilidade da operação. Uma maior qualidade de impressão está relacionada com uma menor incidência de anormalidades na impressão, como contornos bem definidos, contraste e brilho (METTÄNEN, 2010).

### 3.9.4 Supercalandragem

A supercalandragem é importante para melhorar o brilho, suavidade e opacidade do papel no processo de fabricação, sendo utilizada quando ele precisa possuir uma superfície extremamente lisa, pois atua no aumento da uniformidade do papel. O processo ocorre pela passagem do papel através de vários rolos pesados e uniformemente polidos, as calandras, que geralmente são compostas por aço e dispostas em pilha. Um exemplo de sua utilização é na confecção de papel para revistas ou embalagens de luxo (ÖZDEN, SÖNMEZ, 2020).

### **3.9.5 Standard test method**

A ASTM é uma organização internacional que possui como objetivo criar padrões a serem seguidos para garantir a qualidade, saúde e segurança de diversos produtos. Ao longo deste trabalho, são mencionados alguns padrões seguidos durante a caracterização de polpas ou papéis produzidos nas publicações aqui expostas.

#### **3.9.5.1 ASTM D6789-02**

Título: *Standard Test Method for Accelerated Light Aging of Printing and Writing Paper by Xenon-Arc Exposure Apparatus*

O método padrão ASTM D6789-02, conforme descrito por ASTM *International* (2017), descreve um padrão para teste de envelhecimento artificial de papel de impressão e escrita utilizando um aparato de exposição à luz de xenônio. Nesse teste, são utilizados filtros que simulam a luz do dia que penetra por uma janela de vidro, porém a um fluxo substancialmente maior do que o natural. Essa luz provoca reações fotoquímicas no papel, alterando sua reflectância e sua cor, tornando possível um estudo da estabilidade óptica desse papel. Essa avaliação é útil para que pesquisadores entendam se o papel desenvolvido possui resistência óptica o suficiente para seguir para um uso específico.

#### **3.9.5.2 ASTM D5229**

Título: *Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*

Esse método padrão determina as propriedades de absorção de materiais de compósitos de matriz polimérica. Após secas em estufa até massa constante, as amostras são expostas a uma umidade controlada ou submersas em água. A massa é, então, medida em intervalos regulares, durante a exposição à água, até nova estabilidade. Assim, a absorção é medida como a diferença percentual entre a massa seca e a massa em cada ponto de medição. Por meio dessa análise, é possível entender se o material está apto a realizar determinadas funções em que a umidade seja um fator determinante.

#### **3.9.5.3 ASTM E1131**

Título: *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*

Trata-se do padrão para análise termogravimétrica de materiais. Por ele, é possível calcular a quantidade e a taxa de mudança de massa de um material quando submetido a

condições controladas de temperatura. Nele, uma amostra de 1 mg a 50 mg é exposta a gás inerte a uma taxa de aquecimento. Em seguida, a amostra é colocada em uma balança dentro de uma fornalha, em que a massa é monitorada durante o aquecimento até se tornar constante. Por essas medidas, é possível entender a composição do material, fator importante para materiais complexos, e sua estabilidade térmica.

#### **3.9.5.4 ASTM D4168**

Título: *Standard Test Methods for Transmitted Shock Characteristics of Foam-in-Place Cushioning Materials*

Trata-se de um padrão para medir a absorção de choque/impacto de materiais de acolchoamento moldados no local. O objetivo desse teste é estabelecer como um determinado material irá reagir frente a choques caso utilizado para amortecer ou proteger itens embalados. Para tal, o material é submetido a um ambiente de temperatura e umidade controlados, sendo então liberado em queda livre cinco vezes, a uma altura escolhida para atingir a carga estática desejada.

#### **3.9.6 ISO 2836:2004**

Título: *Graphic technology — Prints and printing inks — Assessment of resistance of prints to various agents*

De acordo com *International Organization for Standardization* (2004), a ISO 2836:2004 explora a resistência de um material impresso a agentes sólidos e líquidos, solventes, vernizes e ácidos, aplicando-se aos métodos padrão de impressão quando o material apropriado é utilizado.

Essa norma descreve apenas as substâncias ou os agentes que se enquadram como válidos nesse tipo de teste, sendo eles compostos por uma ampla variedade. Descreve também métodos a serem utilizados de acordo com o tipo de material aplicado, os materiais laboratoriais indicados e as concentrações a serem utilizadas dos agentes e substâncias, quando aplicável. Atualmente, a ISO 2836:2004 encontra-se revisada pela ISO 2836:2021.

#### **3.9.7 PADRÕES TAPPI**

A TAPPI (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*) é uma instituição sem fundos lucrativos, formada por voluntários, dentre eles cientistas, engenheiros,

acadêmicos e fornecedores da cadeia produtiva de papéis. Sua matriz é localizada em Atlanta, Georgia, EUA e a instituição atua há mais de um século.

O objetivo da TAPPI é discutir assuntos relevantes para a indústria de papéis, sendo também certificada para desenvolver padrões de produção e testes que garantam que o papel produzido atenda aos mínimos requisitos de seu uso final.

Ao longo deste trabalho, serão citadas normas e padrões TAPPI que foram utilizadas durante alguns dos testes realizados pelos pesquisadores. Dentre esses padrões, temos:

- TAPPI T248 sp-00 - *Laboratory beating of pulp (PFI mill method)* / Desfibramento laboratorial da polpa (método do moinho PFI);
- TAPPI T479 - *Smoothness of paper (Bekk method)* / Suavidade do papel (método Bekk);
- TAPPI T425 om-01 - *Opacity of paper (15/d geometry, illuminant A/2°, 89% reflectance backing and paper backing)* / Opacidade do papel (geometria 15/d, iluminante A/2°, fundo de 89% de reflectância e fundo de papel).

Todos os padrões TAPPI são publicados em seus periódicos e são divididos em: métodos de testes, especificações, *guidelines* e glossários (“About TAPPI”, 2019).

#### 4. METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica referente às fibras alternativas para a produção de embalagens foi feita delimitando o intervalo de tempo de 2000 até 2023, utilizando a base de dados *Scopus*. Dentre as publicações encontradas, optou-se por explorar aquelas que trouxessem matérias-primas produzidas em solo brasileiro – com capacidade produtiva superior a 10 mil hectares – e estudos das propriedades do papel produzido. Foram analisadas quatro matérias-primas:

- Polpa de palha de triticales;
- Polpa de cana de açúcar;
- Casca vazia de frutas da palma;
- Fibras de coco.

A prospecção tecnológica também foi feita a partir dos dados disponíveis na base *Scopus*. Foram selecionadas duas combinações de palavras-chave, conforme Tabela 5, que retornaram uma ampla gama de resultados. Desses resultados, obtiveram-se as análises temporais e geográficas. Em seguida, foi feita a análise dos 50 artigos mais recentes que melhor se encaixassem no tema proposto pelo presente trabalho, trazendo a análise das abordagens desses artigos. Por último, foi feita a análise das fibras selecionadas para avaliação no presente trabalho. As análises mostram as tendências de artigos relacionados ao tema de fibras alternativas para embalagens de papel e papelão ao longo do tempo, países e os tipos de fibras utilizadas.

A Tabela 5 traz as palavras-chave e delimitações utilizadas, junto com a quantidade de resultados obtidos, enquanto a Tabela 6 evidencia as palavras-chave utilizadas para a pesquisa dos artigos referentes às fibras escolhidas.

**Tabela 5:** Palavras-chave utilizadas em pesquisas na plataforma *Scopus* e quantidade de resultados obtidos.

Ordem de pesquisa	Palavras-chave e limitações	Quantidade de resultados
1	alternative AND fibers AND for AND paper AND production	467
2	alternative AND fibers AND packaging	281

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 6:** Palavras-chave utilizadas para a prospecção das fibras selecionadas.

Fibra	Palavras-chave	Quantidade de resultados
Triticale	packaging AND fibers AND triticale AND NOT nutrition	7
Bagaço de cana-de-açúcar	packaging AND pulp AND sugarcane AND bagasse AND NOT films	17
Casca de fruta da palma	packaging AND pulp AND palm AND oil	22
Coco	packaging AND pulp AND coconut	7

Fonte: Elaboração própria.

## 5. AS FIBRAS ALTERNATIVAS

### 5.1. POLPA DE PALHA DE TRITICALE

De acordo com (PLAZONIC *et al.*, 2016), que exploram a viabilidade dos resíduos da colheita de trigo, cevada e triticale para a produção de papel, o triticale é o cereal que possui a maior quantidade de celulose (52,88%) dentre os três analisados, possuindo também baixa quantidade de lignina. A figura 3 apresenta a palha de triticale.

Figura 3: Palha de triticale.



Fonte: Autor desconhecido.

O triticale foi o primeiro cereal sintetizado, sendo um híbrido do trigo (*Triticum spp.*) e do centeio (*Secale cereale*). O objetivo dessa hibridização foi unir as qualidades dos dois cereais, uma vez que o trigo possui alto potencial produtivo e altíssima qualidade de panificação, porém é sensível a baixas temperaturas e cultivável somente em solo fértil. Já o centeio não possui as mesmas propriedades de panificação, mas pode ser facilmente cultivado em solos arenosos e menos férteis. O triticale herda diversas qualidades, sendo algumas delas: alto valor proteico dos grãos, alto potencial de rendimento de grãos e biomassa, resistência a doenças, crescimento em baixas temperaturas e tolerância à seca (DE MORI *et al.* 2014).

No Brasil, o cultivo de triticale iniciou-se em 1985 e foi amplamente difundido como fonte de alimento animal. Também é utilizado na indústria de alimentos, para a produção de farinha.

Em pesquisa recente, Rudolf *et al.* (2023) elaboraram sobre a aplicabilidade da polpa virgem do triticale para produção de papel para embalagem. Para a confecção dos estudos, os pesquisadores sintetizaram um material contendo a polpa virgem do triticale com fibras recicladas de madeira em uma proporção de até 30 %. Avaliou-se a imprimibilidade com tinta preta por meio de técnicas *offset* de impressão. A estabilidade do material foi testada sob as condições de envelhecimento, atrito e tratamento químico, sendo quantificadas por técnicas de espectrofotometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Os pesquisadores coletaram a palha de triticale após colheita em um campo na Croácia, manualmente, reduzindo-os a fragmentos de até 3 cm de comprimento. A palha foi purificada por técnica da polpação alcalina. Em seguida, a polpa gerada foi adicionada à polpa reciclada de fibras de madeira nas proporções de 10 %, 20 % e 30 % e comparada ao papel produzido apenas por fibras recicladas. O objetivo foi melhorar as propriedades do papel reciclado resultante, como sua força, para que pudesse ser utilizado como embalagem em vez do destino comum a esse tipo de material reciclado, que é a produção de jornais. Os papéis foram formados, de acordo com as dimensões sugeridas pela EN ISO 5269-2:2004: formato circular, peso base de 42,5 g/m<sup>2</sup> e diâmetro de 200 mm. Foram produzidas 50 unidades de cada tipo de papel. Os tipos de papel e as proporções de polpa são dados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Tipos de papel produzidos e a proporção de fibras de triticale em cada um.

Tipo de papel	Porcentagem de fibras de madeira reciclada	Porcentagem de fibras de triticale
N	100	0
1NTR	90	10
2NTR	80	20
3NTR	70	30

Fonte: Elaboração própria, dados de (RUDOLF *et al.*, 2023)

A impressão foi realizada pelo processo de *dry offset*, a uma velocidade de 0,5 m/s e uma pressão de 600 N, com uma tinta totalmente preta. O equipamento utilizado foi uma máquina de teste de impressão multipropósito Prüfbau, utilizando a quantidade de 1,1 cm<sup>3</sup> de tinta de baixa migração Sun Pak FSP, produzida pela *Sun Chemicals*, de viscosidade 87,47 ±

2,74 Pa·s, a uma temperatura de 23 °C e umidade relativa de 50 %. Antes de cada teste e após impressão, cada papel passou um descanso de 24 h para secagem da tinta por polimerização por oxidação, sob as mesmas condições ambientes da impressão.

O teste de envelhecimento utilizou uma câmara de teste Suntest XLS+, equipada com um filtro de luz diurna com emissão de luz visível e próxima à radiação ultravioleta, variando de comprimentos entre 290 nm a 800 nm. O teste foi realizado de acordo com a designação ASTM D6789-02, com um nível de energia luminosa de  $765 \pm 50 \text{ W/m}^2$ , temperatura na câmara de 39,5 °C e umidade relativa de 50 %. Foram realizados dois ciclos de envelhecimento, cada ciclo correspondendo a 48 h de teste e comparável a 44,5 dias de exposição natural. Também foi medida a reflectância de luz na superfície da tinta preta através de todo o espectro.

O teste de atrito foi realizado com o auxílio do equipamento *Hanatek T4 Rub and Abrasion Tester*, de acordo com o padrão BS 3110 BS Standards (1959), sob constante pressão de 0,23 kg, e 20, 40 e 60 movimentos circulares com velocidade constante de uma rotação por segundo. Também foi realizado um teste de transferência de tinta entre folhas, utilizando-se uma face oposta do mesmo tipo de papel a ser testado. O atrito foi novamente implementado entre os papéis sob 20, 40 e 60 rotações.

O tratamento químico levou em consideração que as embalagens podem entrar em contato com diversas substâncias químicas orgânicas e inorgânicas durante seu transporte e armazenamento. Foram escolhidos seis dos vários químicos previstos na ISO 2836:2004, considerados pelos pesquisadores como os materiais mais prováveis a entrar em contato com a embalagem durante sua vida útil. As substâncias químicas, as condições de aplicação e o tempo de exposição são listados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Substâncias químicas utilizadas no teste de resistência química.

Substância química	Condições de exposição	Tempo de exposição (min)
Água		1440
Óleo de soja	Filtro embebido e pressionado	1440
Ácido cítrico 5 %	sobre o papel de teste sob peso	60
Ácido acético 5 %	de 1 kg	30
Hidróxido de sódio 1 %		10
Etanol 96 %	Submersão em recipiente	5

Fonte: Elaboração própria, dados de (RUDOLF *et al.*, 2023)

Os resultados do estudo do envelhecimento indicaram que, quanto maior a proporção de fibras de triticales, mais estável a luminosidade da tinta preta. Foi constatado ainda que, no caso do parâmetro  $b^*$ , houve significativas diferenças positivas, principalmente após o período de 96 h de teste. Isso pode ser explicado pelo fato de o papel de teste não ter passado por branqueamento - portanto, sendo amarelado pela presença de lignina durante seu envelhecimento. Para efeitos de comparação, o papel do tipo 3NTR teve um amarelamento 22,2 % maior do que o papel do tipo N, indicando, portanto, que uma maior porcentagem de fibras de triticales tornaria o papel mais suscetível à perda de suas qualidades quando não realizado o branqueamento.

O teste de reflectância foi realizado em amostras de papel em branco e impressas. Para comprimentos de onda curtos, todos os resultados retornaram baixa reflectância. O teor de triticales mostrou-se inversamente proporcional à reflectância e, nas áreas impressas em preto, a reflectância mostrou-se baixa em toda a região do visível. Logo, pode-se concluir que todos os tipos de papel possuíram boa imprimibilidade, uma vez que uma maior reflectância indicaria pontos de perda de tinta preta e exposição de uma superfície mais clara. Foram repetidos os testes após envelhecimentos de 48 h e 96 h, obtendo-se maior reflectância para todos os papéis. Notou-se um aumento acentuado em comprimentos de onda maiores que 500 nm, o que indica maior reflectância na região do vermelho, resultado que concorda com o visto nos ensaios espectrofotométricos para verificação de alteração de cor pelo método CIE -  $L^*, a^*, b^*$ .

O teste de atrito revela que todos os tipos de papel sofrem alteração de cor após as 20 rotações iniciais, até que, sob os maiores valores de rotação, a mudança nas cores atingiu um máximo de 28 %. A adição de fibras de triticales aumenta a rugosidade média do papel, sendo possível inferir desde o início que a estabilidade da tinta seria menor quanto maior a proporção de fibras de triticales. Portanto, não era esperado que o teste revelasse uma melhora quanto a essa propriedade. Por outro lado, o teste de transferência de tinta constatou a estabilidade na aderência da tinta para proporções de fibra de triticales até 30 %.

Os resultados dos testes de resistência química indicam que não houve reações aos agentes inorgânicos. Já quando em contato com os agentes orgânicos, constatou-se que apenas o óleo de soja foi capaz de alterar significativamente a cor total, sendo o valor da diferença maior que 2, ou seja, visível por um observador inexperiente<sup>1</sup>. Os papéis contendo fibras de triticales apresentaram resultados semelhantes ao papel ausente em triticales.

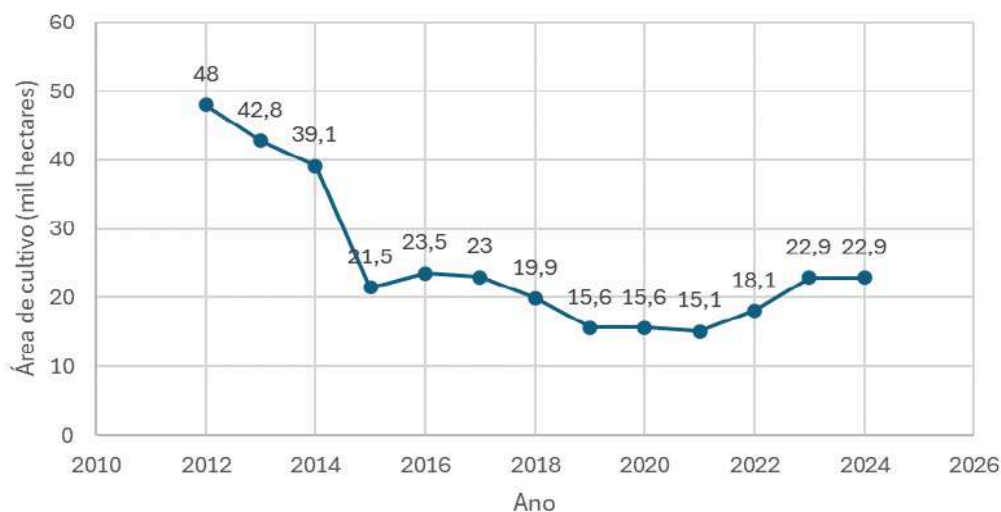
Diante do exposto pelo trabalho de Rudolf *et al.* (2023), o papel com base em fibras de triticales, em uma proporção de 10 % a 30 %, quando em conjunto com fibras virgens de celulose, possui propriedades desejáveis para a sua utilização na indústria de alimentos, apesar de sua fragilidade/suscetibilidade frente à exposição ao óleo de soja.

No entanto, o grande obstáculo para a implementação industrial da fibra de triticales na produção de papel para embalagens de alimentos está associado ao uso primário desse cereal em solo brasileiro. Historicamente, o triticales é utilizado como fonte de alimentação animal e humana, mas não possui grande valor agregado quando comparado, por exemplo, com o milho. Por esse motivo, observou-se que, com o aumento da produção de milho de segunda safra e a consequente queda de preço, a área de cultivo de triticales no Brasil diminuiu expressivamente. Para efeitos de comparação, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) de 2018, atualizados anualmente, a área de cultivo de triticales no Brasil em 2012 foi de 48,0 mil hectares; já em 2024, o estimado é que seja de 22,9 mil hectares, valor idêntico ao de 2023. Apesar disso, observa-se a tendência do aumento ou manutenção na área de cultivo existente no decorrer dos anos de 2019 a 2023, com leve queda no ano de 2021, conforme indicado pela Figura 4.

---

<sup>1</sup> Ver item 3.10.

**Figura 4:** Área de cultivo do triticale no Brasil de 2012 a 2023, com estimativa de 2024, em mil hectares.



Fonte: Autoria própria, dados da Conab (2018).

Outra dificuldade encontrada é o potencial do triticale na indústria de biocombustíveis, como etanol, e até mesmo biogás. Rosenberg *et al.* (2002) realizaram um estudo dos custos associados à produção de biocombustíveis comparando centeio, triticale e trigo, concluindo que a produção de um litro de combustível a partir do triticale era a alternativa mais economicamente viável. No entanto, esse uso, que se destaca por tratar-se de uma medida popular contra os efeitos de alterações climáticas, pouco se destaca por supostamente impactar o uso primário do triticale, que é utilizado na alimentação de animais (SOLOMON, 2010).

De acordo com Bates *et al.* (2020), o papel produzido com polpa de triticale, em proporções de até 30 % junto às polpas recicladas de fibras da madeira, pode ser utilizado como matéria-prima de embalagens que possuam determinado grau de detalhes de impressão. Isso porque a rugosidade do papel resultante provoca distorções em linhas impressas muito finas, de 0,025 a 0,05 mm de espessura.

Dado o grande potencial em solo brasileiro de plantação de triticale e os recentes esforços para mitigação dos impactos ambientais relacionados à indústria de papel, percebe-se que essa palha possui potencial técnico para ocupar uma parcela da indústria de embalagens. Há, atualmente, escassez de estudos que evidenciam a viabilidade do uso dessa alternativa em escala industrial, o que indica que não há previsão de sua implementação para esses fins em futuro próximo.

## 5.2. POLPA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

A polpa de cana de açúcar (figura 5) é um resíduo fibroso, obtido após a moagem e extração do suco da cana-de-açúcar. É uma fibra alternativa extremamente promissora para a aplicação em embalagens por causa de sua abundância e de seu baixo custo, uma vez que surge como um subproduto da indústria açucareira. Além disso, a fibra possui comprimento semelhante à fibra de eucalipto (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016). Sua utilização na indústria de fabricação de papel é promissora, pois possui como características desejáveis sua abundância, baixo custo de produção, fibras longas, baixo consumo de energia para refino e maciez (BHARDWAJ *et al.*, 2022).

**Figura 5:** Polpa de cana de açúcar.



Fonte: Autor desconhecido.

O bagaço é composto quimicamente por lignina (20 a 30%), celulose (40 a 45 %) e hemiceluloses (30 a 35 %), possuindo baixo teor de cinzas (1,9 %). A proporção exata de cada componente, no entanto, depende de fatores como as condições climáticas e as propriedades do solo. O bagaço da cana corresponde a cerca de 35 % da cana-de-açúcar e possui diversas aplicações na indústria, sendo a mais popular a geração de etanol de segunda geração. Ele também possui a chamada medula e a fibra verdadeira. Anualmente, é estimado que sejam produzidas de 400 a 500 milhões de toneladas de bagaço mundialmente (BHARDWAJ *et al.*, 2022). Apesar de seu uso primário como fonte de energia renovável, o bagaço de cana é citado como uma das duas principais fibras alternativas já utilizadas na produção mundial de papel. No entanto, ainda existem controvérsias a respeito de seu uso, pois alguns estudos afirmam que a pegada de carbono do bagaço se assemelha ou ultrapassa a de fibras virgens de madeira (SUAREZ *et al.*, 2024). Tais fatos evidenciam que a literatura ainda carece de

avaliações que levem em consideração, além das propriedades do papel produzido, os impactos pelos resíduos gerados a partir dos métodos químicos de produção.

A fibra verdadeira e a medula, apesar de possuírem a mesma composição química, são estruturalmente distintas. A fibra verdadeira é um componente da casca da cana-de-açúcar e de seus tecidos vasculares. Possui uma razão entre comprimento e diâmetro de aproximadamente 70 e elevados coeficientes de expansão e contração, que refletem uma forte ligação entre as suas fibras (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016).

Já a medula possui formato e comprimentos irregulares, tendo uma razão entre comprimento e diâmetro bem menor, aproximadamente 5. A medula possui células de formatos irregulares, paredes finas e fracas, compondo a haste da cana-de-açúcar. Possui também a capacidade de absorver uma grande quantidade de água e, quando em altas quantidades, torna o papel resultante difícil de ser seco. Essa propriedade enfraquece as fibras, em contraste com as fibras verdadeiras (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016).

Noé Aguilar-Rivera (2016) afirma que o melhor método de digestão das fibras do bagaço de cana-de-açúcar é o método alcalino, utilizando hidróxido de sódio (NaOH). Tal processo pode ser feito de maneira contínua ou por batelada, mas a natureza grossa da matéria-prima exige uma quantidade de licor 7 vezes maior quando comparada ao processo de digestão de fibras da madeira. Além disso, o teor de umidade deve ser o menor possível, pois um alto teor torna o bagaço de cana difícil de ser penetrado pelo licor, uma vez que ele já está saturado com água.

O processo de branqueamento para essas fibras ocorre após limpeza e centrifugação para separação por tamanho. Noé Aguilar-Rivera (2016) sugere que o melhor processo de branqueamento nesse caso ocorre em quatro etapas: cloração, extração alcalina e duas etapas de oxidação com hipoclorito ou dióxido de cloro. O uso do dióxido de cloro garante uma maior viscosidade à massa, resultando em uma polpa de maior qualidade e de características comparáveis à polpa de fibras de madeira.

Dentre as várias características desse tipo de fibra, podem ser citadas algumas vantagens e desvantagens, segundo Rainey; Clark (2004), como mostra a Tabela 9.

**Tabela 9:** Vantagens e desvantagens do uso das fibras de bagaço de cana de açúcar.

Vantagens	Desvantagens
A forma de cultivo da cana-de-açúcar facilita o armazenamento do bagaço durante meses, garantindo alimentação contínua do processo.	Se a desmedulagem não for eficiente, a água não é drenada com eficiência da massa, resultando em uma operação mais lenta.
Os custos de transporte são muito baixos, já que a extração das fibras ocorrem no momento da manipulação da cana para outros fins industriais.	O bagaço costuma conter impurezas e as impurezas coloridas costumam não ser totalmente removidas.
Não há necessidade de criar novas regiões de plantio, pois o bagaço é um coproduto de outro processo industrial. Portanto, não traria novos impactos ambientais.	O processo de manipulação da cana-de-açúcar para seus fins principais pode danificar as fibras do bagaço, ocasionando em um produto final de menor resistência mecânica.

Fonte: Elaboração própria, dados de RAINEY; CLARK (2004).

A massa produzida costuma agregar fibras de madeira macia, pois não possuem a resistência mecânica necessária para etapas do processo em que a maquinaria precisa operar em maiores velocidades, por exemplo. Para esse processo, quando utilizada uma proporção menor do que 10 % a 30 % de fibras de madeira - recicladas ou não - na polpa, a maquinaria costuma ter uma velocidade de operação menor do que aquela comum para fibras de origem da madeira. Outras diferenças destacáveis na maquinaria utilizada para trabalhar com esse tipo de polpa é a presença de uma área de drenagem de água mais extensa, devido à maior absorção da polpa provinda do bagaço de cana. No entanto, a maquinaria não costuma apresentar outras grandes diferenças operacionais quando comparada ao processo convencional (NOÉ AGUILAR-RIVERA, 2016).

Noé Aguilar-Rivera (2016) explora a síntese de papel adicionando a polpa reciclada de caixas corrugadas à fibra alternativa. Essas caixas são compostas por longas fibras não esbranquiçadas de madeira, um baixo teor de lignina (entre 10 % e 15 %) e um alto teor de celulose (50 %), sendo o resto hemicelulose, cinzas e outras substâncias. As fibras de bagaço de cana, por sua vez, são compostas por celulose (entre 32 % e 48 %), lignina (entre 19 % e 24 %) e pentosana (entre 27 % e 32 %), sendo o restante cinzas e sílica (RAGHAVAN, [s.d.]).

A metodologia adotada utilizou um bagaço de cana desmedulado, com 6,7 vezes mais fibras do que medula. Foram produzidas polpas das seguintes proporções de fibra de bagaço e caixas corrugadas: 100 % fibra virgem do bagaço, 90 % de fibra virgem de bagaço e 10 % de caixas corrugadas, 80 % de fibra virgem de bagaço e 20 % caixas corrugadas, 70 % de fibras de bagaço e 30 % de caixas corrugadas.

A cocção de todas as misturas e da fibra de bagaço pura foi realizada em um digestor rotativo de aço inoxidável em batelada, aquecido eletricamente. O licor branco utilizado foi o hidróxido de sódio a 13 %, com uma proporção de peso de licor 10 vezes maior que de fibra. A reação ocorreu por 30 min, a 170 °C. Ao fim, as polpas deslignificadas foram lavadas, desintegradas em um misturador e peneiradas.

O experimento obteve como resultado uma polpa de resistência e drenagem aceitáveis segundo os padrões da TAPPI. O tratamento alcalino e a deslignificação proporcionaram aumento da resistência ao rasgo e à tração. Outros benefícios também foram observados, como a diminuição do tempo de drenagem e o aumento da porosidade da polpa.

As fibras do bagaço de cana serviram como agentes ligantes para as fibras longas de caixas corrugadas, aumentando as propriedades desejáveis da polpa, como resistência mecânica. O estudo conclui que todas as polpas produzidas com proporções distintas entre bagaço de cana-de-açúcar e caixas corrugadas possuem propriedades semelhantes às polpas produzidas pela fibra da madeira, com maior resistência e menor demanda de energia para refino.

Gond; Gupta (2020) analisaram a viabilidade da extração de microfibras do bagaço de cana-de-açúcar para a utilização na indústria de embalagens. Utilizando uma matéria-prima proveniente da Índia, os pesquisadores utilizaram bicarbonato de sódio para o tratamento químico das fibras. Segundo eles, o bicarbonato de sódio não tinha sido estudado como um reagente para isolamento e tratamento antibacteriano no isolamento das fibras do bagaço de cana-de-açúcar. A solução de bicarbonato utilizada possuía uma concentração de 10 % em massa e a mistura foi agitada em intervalos de uma hora durante um total de 96 horas.

O bagaço foi lavado e seco sob a luz do sol durante 24 horas, seguido de aquecimento a 80 °C em um forno, por 8 horas. As fibras secas foram cortadas em tamanhos de 5 mm e moídas. Com o auxílio de um agitador de peneiras, foram obtidas partículas de 15 micrômetros de comprimento. Após o tratamento com o bicarbonato de sódio, a polpa obtida foi lavada com água destilada e seca a 60 °C durante 8 horas em um forno. Por fim, a polpa foi moída a 1500 rpm por 30 minutos, com o objetivo de se obter nanopartículas.

Os pesquisadores realizaram diversos ensaios para averiguar os resultados obtidos. Abaixo, encontram-se os principais pontos a destacar:

- A análise DLS (*Dynamic Light Scattering* ou Espalhamento Dinâmico de Luz), método utilizado para estudo estatístico da distribuição de partículas nano/micro em uma suspensão, revela que todas as partículas obtidas estavam no intervalo de tamanho nano, atingindo parte dos objetivos do experimento.
- A análise TEM (*Transmission Electron Microscopy* ou Microscopia Eletrônica de Transmissão) identificou diferentes formas para as fibras que compõem a amostra (cilíndricas, esféricas e em forma de gancho). Esse resultado é dado como positivo, uma vez que as diferentes proporções das fibras garantem uma ampla gama de propriedades possíveis a depender do uso final do material produzido.
- A análise FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscope* ou Microscópio Eletrônico de Varredura por Emissão de Campo) revela que as fibras não tratadas com o bicarbonato de sódio possuíam uma estrutura externa lisa, sem deformidades; por outro lado, após o tratamento, há redução do diâmetro das fibras e presença de rugosidades. Isso indica a remoção de lignina e hemicelulose.
- A análise XRD (*X-ray Diffraction* ou Difração de Raios X) evidenciou que o índice de cristalinidade das fibras tratadas foi de 57,9 %. Esse valor é próximo daquele das fibras de eucalipto (55,3 %), por exemplo. Esses resultados indicam que as fibras de bagaço de cana podem ser utilizadas para produtos que visam grande resistência mecânica.

Além disso, o bagaço de cana mostra-se promissor também quando utilizado em conjunto com outras fibras alternativas. Bhardwaj *et al.* (2022) avaliaram a viabilidade da produção de papel da mistura de fibras de bagaço de cana com casca de milho revestido com cera de abelha–quitosana, em proporção de 50 % em massa entre as fibras, e concluíram que o papel desenvolvido possuía propriedades mecânicas aceitáveis. As propriedades testadas foram: tensão de ruptura, tensão de perfuração, porosidade e absorção de água. O bagaço de cana também se mostrou promissor quando misturado com bagaço de amla e TiO<sub>2</sub> para a produção de embalagens para alimentos. Após avaliação mecânica, química e de barreira à umidade, constatou-se que as propriedades do papel produzido foram ainda superiores às daquelas do papel de fibras de bagaço de cana pura (JAIN *et al.*, 2023).

Dado o exposto, as fibras de cana-de-açúcar possuem enorme potencial para serem implementadas industrialmente na produção de papel para embalagens, principalmente dentro do contexto do Brasil. Isso porque o Brasil, segundo LNBR (s.d.), que, segundo Conab (2023), são utilizadas exclusivamente para a geração de energia. Apesar do uso primário do

bagaço de cana também estar diretamente conectado à busca por uma economia mais sustentável, os resultados promissores aqui expostos devem ser levados em consideração.

### 5.3. FIBRAS DE CASCAS VAZIAS DE PALMA

O óleo de palma é um óleo vegetal de extensivo uso na indústria, sendo amplamente utilizado pela indústria alimentícia e química, sendo o mais produzido no mundo (United States Department of Agriculture, 2024). De acordo com Villela *et al.* (2014), o Brasil possui diversos pontos de grande potencial de produção da palma de óleo, principalmente na região amazônica. Essa região apresenta boas condições climáticas e a área descrita como propícia no estudo de Villela *et al.* (2014) está, atualmente, desmatada. Os pesquisadores indicam que há, atualmente, 31,8 milhões de hectares de terra desmatada que poderiam ser utilizados para o plantio da palma de óleo, o que, caso utilizados, colocariam o Brasil dentre os maiores produtores.

A extração do óleo de palma é uma atividade financeira fundamental em muitos países, como na Malásia e na Indonésia. Dentre os produtos gerados a partir dessa atividade, podemos citar: troncos de palma de óleo, folha de palma de óleo, cascas vazias de frutas (CVF), fibras prensadas de palma, cascas de palma e efluente de moinho de óleo de palma (ABDULLAH; SULAIM, 2013). O CVF pode ser utilizado como fonte de energia ou pode servir como matéria-prima alternativa para a produção de papel. O interesse em possíveis aplicações na indústria de embalagens para os resíduos gerados da extração do óleo de palma surgiu a partir de dois fatores principais: a escassez de fontes de fibras de madeira para a produção de papel e o crescente volume de resíduos gerados devido à expansão exacerbada das plantações (MOHD ALI *et al.*, 2020).

Estima-se que uma tonelada da fruta (figura 6) possa gerar até 0,22 tonelada de CVF (ABDULLAH; SULAIM, 2013). A produção de embalagens utilizando essa fibra alternativa está presente em alguns lugares da Ásia. Atualmente há produção de embalagens de cimento utilizando o processo semiquímico (MOHD ALI *et al.*, 2020).

**Figura 6:** Palma.



Fonte: Autor desconhecido.

O CVF é composto por celulose (de 43 % a 65 %), hemicelulose (de 17 % a 33 %) e lignina (de 13 % a 37 %) (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017). Ele possui fibras curtas de propriedades comparáveis àquelas do eucalipto, possuindo formas cilíndricas e variando em diâmetro de 1 a 2 mm (FERRER *et al.*, 2011). Além disso, pelo fato de as paredes celulares serem mais grossas, fornecem uma maior resistência ao rasgo para a embalagem.

O processamento do CVF se iniciou com o corte das fibras para redução de comprimento (MOHD ALI *et al.*, 2020). Em seguida, foi realizada a moagem mecânica, para que as fibras alcancem um tamanho padrão. Para a polpação com esse material, pode ser escolhido o método mecânico, químico ou semiquímico, sendo esse último realizado com soda ou sulfato. Além disso, antes da polpação, é possível realizar um pré-tratamento com lipase para remoção de manchas do papel final. Os resultados apontam que o CVF é capaz de atender às expectativas quanto às propriedades do produto para produção de papel, tais como resistência mecânica e baixa rugosidade. Já o branqueamento também pode ser realizado a depender do uso pretendido do papel produzido.

Mohd Ali *et al.* (2020) exemplificam um processo comum na indústria, que se inicia no corte das fibras de CVF em tamanhos de até 30 mm. Em seguida, a polpação semiquímica é realizada utilizando soda cáustica a 50 % a uma temperatura de 92 °C. Após o processo de polpação, a polpa de CVF de palma de óleo pode ser lavada e refinada em um refinador de disco. A mistura de polpa de CVF com outros aditivos, como dióxido de titânio e argila, é diluída no reservatório de entrada da unidade de fabricação para ajustar as propriedades ópticas do papel. Para verificar o efeito do tratamento, uma pequena quantidade de polpa de CVF é testada em uma máquina composta por uma seção de prensagem, secadores e uma mesa de drenagem. A mistura de papel é filtrada através de uma tela de arame móvel para

remover o excesso de água e produzir uma folha de papel. A formação da folha de papel é realizada quando as fibras de CVF são consolidadas em uma camada fina. Cilindros de ferro fundido aquecidos são usados durante o processo de secagem para reduzir o teor de água em até 8 %, por meio de correias de tecido móveis. Após realizar o processo de secagem, as folhas de papel passaram por tratamentos de acabamento, sendo processadas em um rolo de papel. Esse processo é conhecido como supercalandragem, no qual o rolo é cortado em várias partes para obter o tamanho padrão das folhas de papel.

O CVF também é destaque em pesquisas que avaliam seu desempenho quando misturado a outras fibras alternativas, como o *kenaf*. O *kenaf* é uma planta herbácea que pode ser colhida após 4-5 meses de plantio, permitindo dois ciclos de colheita por ano. Para a avaliação de desempenho, as fibras de CVF foram limpas e cortadas para obter comprimentos de até 2 cm, sendo, em seguida, mantidas em recipientes fechados. O processo de polpação foi realizado com soda-antraquinona. Em relação ao *kenaf*, foram recolhidos caules dos quais foram retiradas as folhas e flores, cortando-os em pedaços de diâmetro de 2 cm com o auxílio de uma máquina cortadora. Esses mesmos pedaços foram, em seguida, cortados em fragmentos de 2 cm de espessura, com o objetivo de melhorar a penetração durante a polpação. Por último, foram secos até que atingissem 10 % de teor de umidade. A polpação das fibras de *kenaf* foi realizada pelo método *Kraft*. O processo de polpação para ambas as fibras foi realizado a 170 °C por aproximadamente 3 horas (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017).

A polpação foi seguida por lavagem para eliminação dos químicos e peneiração. O processo de branqueamento foi realizado por dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio. Todo o processo de branqueamento ocorreu em um recipiente submerso em água quente (70 °C). Utilizou-se uma técnica conhecida como D-Ep-D, em que há adição de dióxido de cloro (D) seguida de peróxido (Ep) e, por último, dióxido de cloro novamente. Ao fim, as polpas clareadas foram lavadas com água destilada, secas em uma centrífuga e deixadas em um recipiente fechado longe do contato com a luz.

Realizaram-se as desintegrações das polpas por 20 minutos, seguida por maceração em uma máquina de moinho PFI com 4000 revoluções, de acordo com o padrão TAPPI T248 sp-00. As misturas foram baseadas em proporções de massa de polpa de *kenaf* para massa de polpa de CVF, sendo as proporções: 10 %, 30 %, 50 % e 70 %. Também foram produzidos papéis 100 % de *kenaf* e 100 % de CVF.

Foram obtidos papéis de 60 g/m<sup>2</sup>, os quais foram acondicionados entre 22 e 24 °C e umidade relativa entre 48 % e 52 %, durante 24 horas. Para caracterização, os pesquisadores realizaram medições de opacidade e maciez dos papéis produzidos.

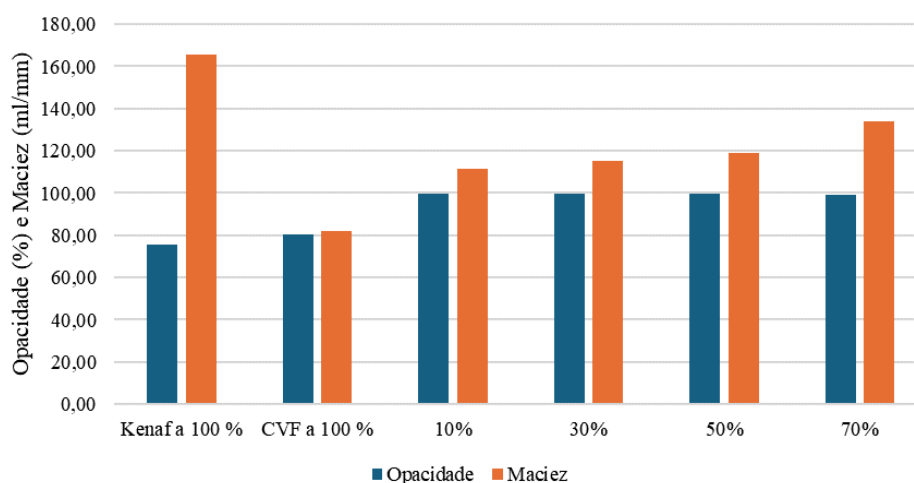
Quanto à opacidade, observou-se que, quanto maior a proporção de CVF, maior o seu percentual. Esse resultado foi associado à disposição das fibras de CVF, as quais deixam menos espaços vazios na composição final, o que também torna as superfícies mais macias. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 7. A maciez toma como base o padrão TAPPI T479, enquanto a opacidade toma como base o padrão TAPPI T425 om-01 (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017).

**Tabela 10:** Valores de opacidade e maciez para as diferentes proporções de fibras de CVF e *kenaf*.

	<i>Kenaf</i> a 100 %	CVF a 100 %	10 %	30 %	50 %	70 %
Opacidade (%)	75,69	80,24	99,63	99,58	99,55	99,36
Maciez (ml/mm)	165,63	82,00	111,30	115,00	119,00	133,80

Fonte: Elaboração própria, dados de (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017)

**Figura 7:** Visualização dos diferentes valores de opacidade e maciez obtidos para os papéis produzidos a partir das fibras de CVF e *kenaf*.



Fonte: Elaboração própria, dados de (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017)

Os resultados das misturas de fibras são comparados aos das fibras puras. A fibra 100 % de CVF possui maior opacidade, pois o arranjo das fibras curtas não permite a criação de

vazios entre as fibras que a compõem. Além disso, esse arranjo acarreta uma superfície mais macia. Como as fibras de CVF são menores que as de *kenaf*, seu arranjo é mais compacto (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017).

Foi medido também o índice de tração que, segundo os autores, é uma medida da resistência do papel à tração direta dividida pela gramatura do papel. Observou-se que os papéis puros somente de CVF e somente de *kenaf* possuem valores de índice maiores do que todas as misturas, aproximadamente 45 Nm/g e 83 Nm/g, respectivamente. As proporções de 10 %, 30 % e 50 % apresentam valores menores que o da fibra pura de CVF. A explicação encontrada é de que a presença de fibras de seu núcleo aumenta a proporção de fibras curtas. Essa tendência é observada conforme o aumento da proporção de *kenaf*. Portanto, observou-se que, para esse parâmetro, a mistura com qualquer proporção de CVF está em desvantagem com relação ao *kenaf* puro (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017).

Quanto à resistência ao rasgo, observou-se que quanto maior a proporção de *kenaf*, maior a resistência. Acredita-se que esse fenômeno ocorra devido à maior força entre as fibras da mistura quando na presença de maiores proporções de fibras de *kenaf*. Os resultados obtidos foram maiores do que o mínimo requerido para o papel *offset*, que é de 5 mNm<sup>2</sup>/g. Portanto, o estudo concluiu ao fim que as propriedades estudadas por ele atendiam à demanda para a produção de papel (RAFIDAH DAHLAN *et al.*, 2017).

#### 5.4. FIBRAS DE COCO

O coco verde (figura 8) é comum em regiões tropicais como o Brasil, tendo destaque econômico, social e ambiental, em que é uma importante fonte de emprego e renda, as fibras de coco verde apresentam o teor de 37,2 % a 43,9 % de lignina e 31,5 % a 37,4 % de celulose (Gonçalves *et al.*, 2019). A produção de coco verde, no Brasil, tem aumentado consistentemente nas últimas décadas. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), a produção de coco verde no Brasil foi de 1,83 bilhão em 2022. Devido ao panorama apresentado, junto com a crescente demanda de produção de coco, também é associado um maior volume de resíduos, sobretudo das cascas, o que tem causado problemas nas áreas urbanas e aumentado a geração de resíduos sólidos (cerca de 6,7 milhões de toneladas de cascas por ano). Tal acúmulo de cascas de coco verde é problemático, pois requer um longo tempo para decompor (entre 8 e 12 anos). Por causa, ainda, da necessidade de um maior espaço de armazenamento e de sua difícil compactação, a vida útil dos aterros

aos quais são destinados é reduzida (SILVA, 2014). Porém, a maior parte dos resíduos do coco, como a casca, folhas e cachos dos coqueiros, é queimada ou descartada como lixo em propriedades rurais, ruas de grandes cidades e lixões. Quando queimados, esses materiais geram substâncias poluentes para o meio ambiente (SILVA; JERÔNIMO, 2012). O grande volume de resíduos e a falta de destinação correta causam sérios problemas ambientais, pois o descarte incorreto dessas cascas libera gases como o metano, que contribuem para o efeito estufa e o aquecimento global (SILVA, 2014; DIAS *et al.*, 2019).

**Figura 8:** Coco verde.



Fonte: Autor desconhecido.

Um estudo realizado com o objetivo de investigar as propriedades mecânicas e térmicas dos biocompósitos híbridos com reforço de fibra de coco e algodão, foi efetuado mediante a seleção de cocos maduros, os quais contêm maior teor de lignina e são mais resistentes. Já o algodão, rico em celulose, foi utilizado como reforço secundário para não comprometer a flexibilidade do material. O papel reciclado serviu como matriz sobre a qual as fibras foram depositadas. Foi utilizada a zeína (proteína do grão) como aglutinante, que foi misturada na polpa junto com fibra de coco picada e fibras de algodão após fervura a 115 °C em um forno elétrico de indução (NANDAN *et al.*, 2023).

Para o experimento foram feitas três amostras com diferentes proporções de fibras:

- Amostra 1, contendo 50 % em massa de fibra de coco (partículas), 10 % em massa de algodão e 40 % em massa de papel.
- Amostra 2, um material de papel de embalagem padrão BIS de 150 GSM para comparação de amostras.

- Amostra 3 com 20 % em massa de fibra de coco (partículas e fibras), 13,23 % em massa de algodão, 66,67 % em massa de papel e reforçada com resina zeína.

Para a validação dos resultados, foram realizados alguns testes, como o de tração, de impacto, de absorção de água e de análise térmica.

Para o teste de tração, a amostra 3 (20 % de fibra de coco), com fibras mais longas, apresentou melhor resistência à tração. Sendo assim, a incorporação da fibra na matriz polimérica aumentou tanto a resistência quanto o módulo do compósito. As características dos compósitos são significativamente influenciadas pelo comprimento da fibra. A matriz tem a função essencial de distribuir a carga para as fibras e mantê-las unidas. A interface entre fibra e matriz são fatores cruciais para a eficácia de um compósito reforçado com fibra.

No teste de impacto, em que o material é submetido a choques constantes para avaliar sua resistência, observou-se que a amostra 3 (20 % de fibra de coco) apresentou melhor desempenho devido à presença de reforço com fibras mais longas, em comparação com a amostra 2 (embalagem padrão), que não continha fibras de reforço. Isso comprova que o comprimento das fibras está diretamente relacionado à resistência ao impacto dos compósitos.

O teste de absorção de água utilizou amostras com dimensões de 50 mm x 50 mm, selecionadas conforme ASTM D5229. A massa da amostra foi medida antes da imersão em água e após um tempo de permanência de 24 horas. A massa foi novamente anotada e para encontrar a porcentagem de água absorvida, foi utilizada a equação 02. Devido à sua natureza hidrofóbica, a zeína utilizada na amostra 3 como aglutinante contribuiu para a redução da absorção de água.

$$\% \text{ absorção de água} = \frac{\text{peso úmido} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \quad (\text{Equação 02})$$

A análise térmica (TGA) foi realizada de acordo com a norma ASTM E1131. É feita mediante o aumento gradual da temperatura até a completa decomposição do material. A estabilidade térmica do compósito aumentou ligeiramente com a adição de fibra de coco, de modo que a amostra 2 iniciou primeiro a decomposição, seguida pela amostra 1 e por fim a amostra 3. A decomposição da amostra 3 (20 % fibra de coco) começou em 300 °C, aproximadamente, e teve a decomposição completa por volta de 450 °C. Já a amostra 2, sem adição de fibra, começou a decompor a cerca de 250 °C com a decomposição completa em torno de 400 °C.

O experimento realizado por Nandan *et al.* (2023) demonstrou que a amostra com adição de fibra de coco apresentou resultados superiores em comparação com a amostra sem adição de fibra de coco. O compósito com fibra de coco apresentou maior resistência à tração do que o material de papel padrão utilizado para sacolas de transporte. Além disso, ambos os materiais com adição de fibra de coco demonstraram maior resistência ao impacto do que o material convencional de saco de papel. No entanto, a amostra 1 com 50 % em massa de fibra de coco (partículas) apresentou alta absorção de água, tornando-a inadequada para transportar substâncias aquosas. Em contraste, a amostra 3 com 20 % em massa de fibra de coco (partículas e fibras) apresentou tendências de baixa absorção de água em comparação com os materiais padrão para sacos de papel (amostra 2). Portanto, foi verificado que a adição de fibra de coco ao compósito melhora significativamente as propriedades da embalagem.

Em outro trabalho que utiliza as fibras de coco no ramo de embalagens, investigou-se o desempenho da fibra como material de amortecimento em sistemas de embalagens, com o objetivo de demonstrar a viabilidade da substituição dos materiais plásticos, como o plástico bolha. Para a realização do estudo, foram utilizados como matérias-primas: fibras da casca do coco verde e agentes aglutinantes naturais (látex de borracha natural centrifugado e fécula de mandioca). Os agentes aglutinantes foram utilizados na fabricação com o objetivo de modelar e moldar as almofadas de fibras de coco (CASTRO *et al.*, 2012).

A extração de fibra de coco foi realizada por desfibrção mecânica, em que as cascas inteiras do coco foram passadas por um processo de pré-limpeza a seco e depois desfibradas por um processo mecânico, ou seja, sem esmagamento prévio das cascas em fragmentos. Foi utilizada uma máquina rotativa em que as cascas do coco foram expostas a altos impactos para desintegrar a casca em fibra e em pó. Após a desintegração, as fibras foram separadas do pó de coco por meio de uma peneira rotativa e secas ao sol até um teor final de umidade de 15 %.

Apoiado na norma ASTM D 4168 (2002), foi realizado o ensaio para absorção de choque no material de amortecimento. A preparação das amostras para o teste foi feita tanto para a fibra sem aditivos quanto para a fibra com aditivos. Os corpos de prova foram todos moldados com a mesma massa e o mesmo formato. Para isso, as fibras foram moldadas em uma caixa de papelão contendo as dimensões do corpo de prova. A adição dos aglutinantes foi feita por pulverização sobre as fibras utilizando um pulverizador pneumático. O material foi depositado no molde e as almofadas resultantes foram secas ao sol durante 30 minutos,

seguida da remoção do molde e secagem das almofadas até um teor de umidade de 15 %. Todos os corpos de prova foram acondicionados por 48 horas a 23 °C e a 50 % RH.

Para a realização do ensaio, utilizaram-se tábuas de madeira como carga estática submetidas à queda livre vertical sobre as almofadas de fibras de coco a fim de avaliar a capacidade da fibra em retardar o impacto. Os testes foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, foram utilizados corpos de prova constituídos por almofadas de fibras de coco sem aditivo; na segunda etapa, corpos de prova constituídos por almofadas de fibras de coco com agentes aglutinantes. Todos os testes foram realizados a 21 °C e a 60 % RH. A altura de queda foi de 0,30 m. Podendo-se estimar a perda de espessura de cada corpo de prova imediatamente após a absorção do choque.

A avaliação do comportamento de absorção de choque da almofada de fibra de coco sem aglutinantes se mostrou eficaz para proteger produtos com níveis de fragilidade inferiores a 40 G. Durante a realização do teste, foi possível estimar a perda de espessura dos corpos de prova após sucessivos impactos. Percebeu-se que as almofadas de fibra de coco com adição de aglutinantes não obtiveram melhor desempenho do que as almofadas de fibra de coco sem aglutinantes. Logo, o uso de aglutinantes revelou-se não contribuir para aumentar o desempenho das fibras como material de amortecimento. Dentre as almofadas avaliadas, as fibras sem adição de aglutinantes destacaram-se por apresentarem melhor desempenho que as demais amostras testadas, tendo em vista que apresentaram maior capacidade de reduzir a aceleração do impacto. Já nas almofadas formadas com látex, foram observados maiores valores de aceleração, devido à menor eficácia das fibras embutidas ou recobertas pela borracha vulcanizada para fins de amortecimento. Quanto ao gel de amido, houve comportamento semelhante ao do látex.

Após a análise dos dados, Castro et al. (2012) concluíram que a fibra de coco em sua forma natural apresentou melhor efeito de amortecimento quando comparada às almofadas de fibra moldadas com aglutinantes. Porém, também foi verificado que a utilização de agentes aglutinantes aumenta as possibilidades de utilização da fibra de coco como material de amortecimento alternativo, pois facilitam o manuseio no momento da moldagem das almofadas.

A fim de comprovar as características da fibra de coco como material de reforço, em 2020 Noor et al. (2020), realizaram uma pesquisa utilizando como matéria-prima além da

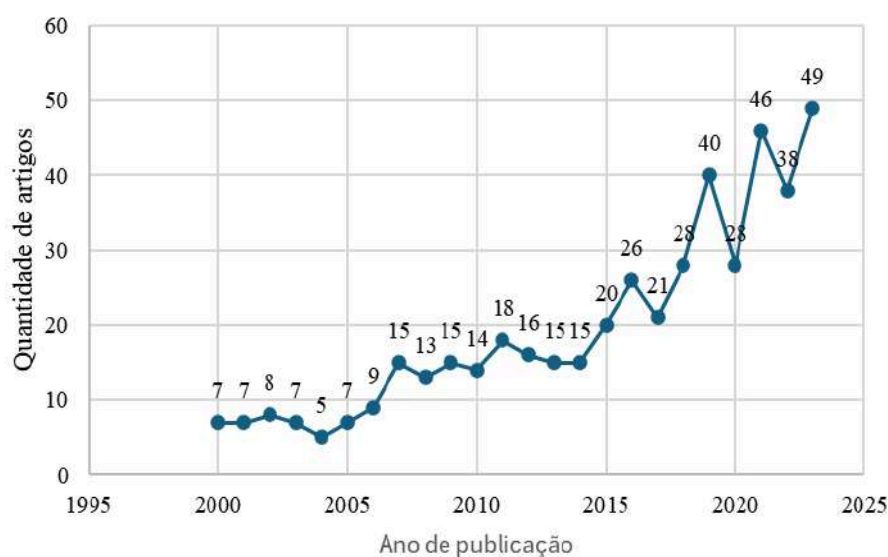
fibra de coco, resíduos de papel reciclado e PVA (Poli acetato de vinila) como aglutinante. As matérias-primas foram preparadas da seguinte forma: os resíduos de papel foram transformados em celulose pela quebra das fibras no processo de polpação; a fibra de coco foi cortada em pequenos pedaços. Para a produção das bioembalagens, foi feita a mistura das matérias-primas em água em temperatura ambiente, na proporção de 4 g de resíduos de papel para 1 g de fibra de coco, variando-se a quantidade de PVA de 1 g a 4 g. Após a mistura, o material foi colocado em moldes e seco ao sol. Para avaliação do desempenho do material, foi feito o teste de resistência à tração, utilizando um corpo de prova de comprimento e largura de 25 cm x 5 cm. O material foi levantado a uma altura de até um metro durante cinco minutos, ao qual foi dada uma variação de carga de 1 N, 2 N, 3 N, 4 N, 5 N e 10 N.

Como resultado, Noor et al. (2020) constataram após análise visual, que havia diferença na textura do papel compósito da bioembalagem. O papel com menor quantidade (1 grama) de PVA mostrou-se mais áspero do que o papel com maior quantidade (4 gramas). Logo, observou-se que o PVA contribuiu para o refinamento da superfície do papel. Para os resultados do teste de resistência à tração, foi observado que todas as amostras possuíam resistência até a carga de 10 N. Portanto, conclui-se que resíduos de papel e compósitos de fibra de coco podem ser usados como materiais de bioembalagem, pois apresentam boa resistência de levantamento superior a 1 kg.

## 6. REVISÃO DOS ARTIGOS

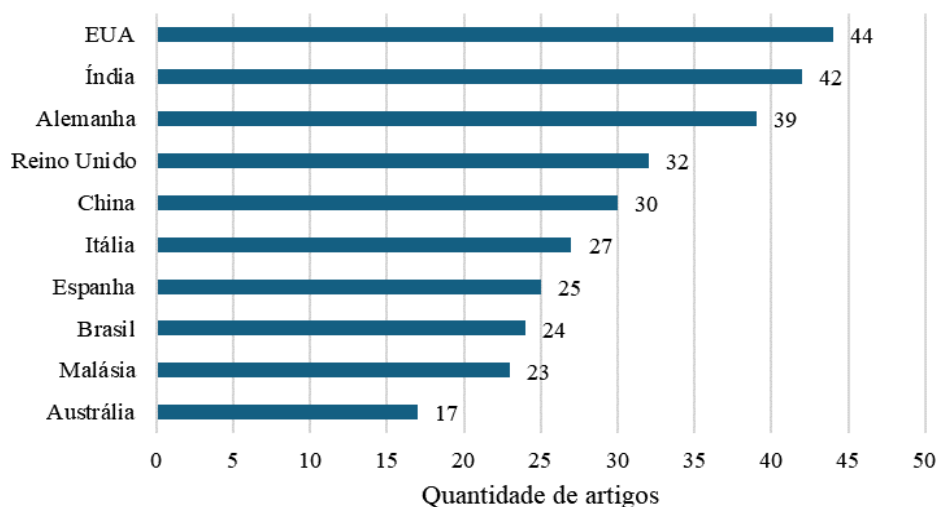
Para a revisão dos artigos, utilizou-se a base do *Scopus*, com o intuito de verificar a perspectiva da abordagem de fibras alternativas para a produção de embalagens de papel e papelão. Foram escolhidas diferentes palavras-chave que pudessem trazer resultados coerentes com o tema da pesquisa. As Figuras 9 a 12 avaliam a evolução temporal e geográfica das publicações encontradas como resultado para as palavras-chave apresentadas na Tabela 6<sup>2</sup>.

**Figura 9:** Evolução temporal de publicações sob os critérios da pesquisa 1.



Fonte: Elaboração própria, dados do *Scopus*.

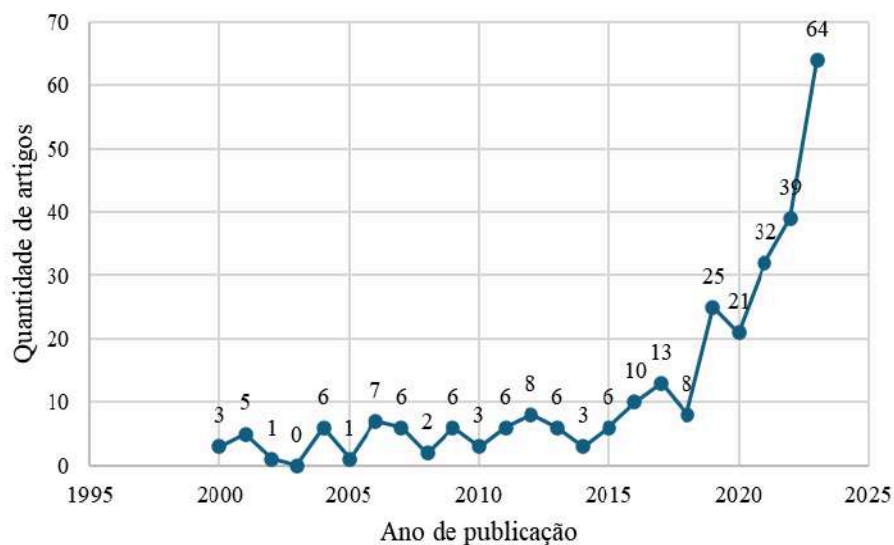
**Figura 10:** Tendência geográfica com relação ao país de origem sob os critérios da pesquisa 1.



<sup>2</sup> Ver capítulo 4.

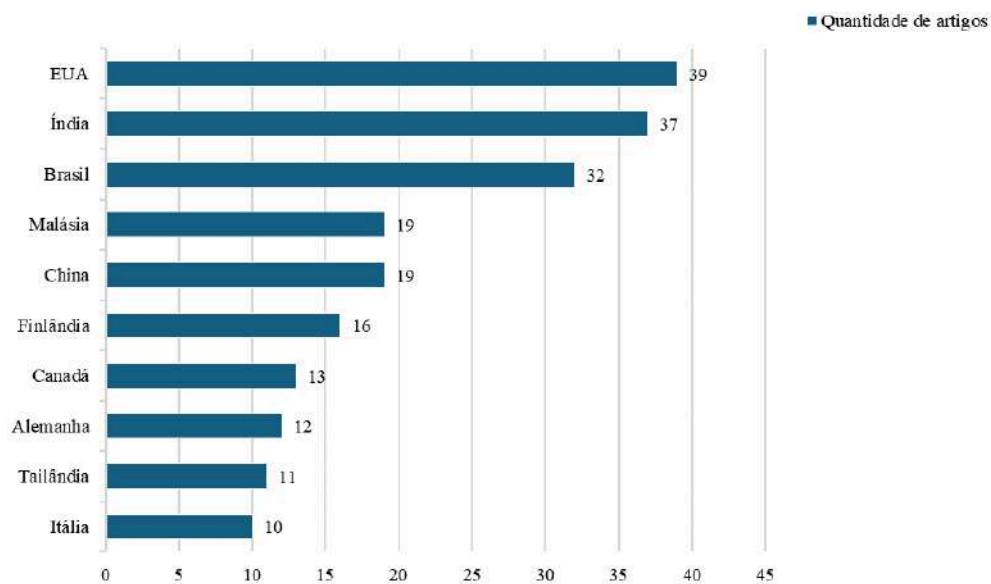
Fonte: Elaboração própria, dados do *Scopus*.

**Figura 11:** Evolução temporal de publicações sob os critérios da pesquisa 2.



Fonte: Elaboração própria, dados do *Scopus*.

**Figura 12:** Tendência geográfica com relação ao país de origem sob os critérios da pesquisa 2.



Fonte: Elaboração própria, dados do *Scopus*.

Para ambas as pesquisas, observa-se a tendência do crescimento do volume de publicações relacionadas ao uso de fibras alternativas em algum segmento da indústria de embalagens utilizando-se como palavras-chave “*packaging*”, “*alternative*”, “*fibers*”, “*paper*” e “*production*”. Todas as publicações resultantes da pesquisa se encaixam na utilização de fibras alternativas em algum segmento da indústria de embalagens, mas não necessariamente como matéria-prima na produção de polpa. Optou-se por não utilizar operadores booleanos

para a remoção desses resultados, de forma que demonstram ainda o interesse no desenvolvimento dessas matérias-primas na indústria para a substituição de opções de baixa degradabilidade, como o plástico. Como exemplo, as fibras alternativas também foram documentadas na elaboração de materiais para *coating* de embalagens convencionais de papel ou plástico, com o objetivo de agirem como agentes antimicrobianos.

De uma forma geral, o aumento de publicações desse teor está relacionado à crescente atenção dada pela comunidade científica à busca e à validação de fontes alternativas de produção. Muitas publicações citam como principais motivações a eventual escassez e abandono programado de fontes de petróleo, para substituição do plástico, as pegadas de carbono ocasionadas pelo uso e produção de papel e papelão por meio das fibras de madeira, para aplicação das fibras alternativas, a escassez de fontes de fibra de madeira para o atendimento de demandas futuras e a deposição de resíduos sólidos de plástico que são indevidamente descartados no meio ambiente.

Nota-se também uma distribuição heterogênea de países autores, com liderança predominante dos Estados Unidos. Adicionalmente, há uma tendência crescente de implementar legislações que proíbam a utilização de embalagens não recicláveis, como a *California's Senate Bill 54* (SB 54), que proíbe a utilização de embalagens que não atendam a determinados requisitos ambientais, como reciclabilidade, até 2032 (OWEN; LI, 2024).

Com relação ao Brasil, observa-se que o volume de publicações é expressivo apenas sob as condições da pesquisa 2, posicionando o país em terceiro lugar. Apesar disso, nota-se que, das pesquisas brasileiras, a quase totalidade explora o uso de fibras alternativas para a produção de embalagens de papel como substitutas de fibras de madeira, ao contrário de outros países que exploram de maneira expressiva outras utilizações dentro da indústria de embalagens.

Em publicação de (JULIANO BARROS; CAMPOS, 2011), são abordados diversos problemas ambientais ocasionados pela plantação exacerbada de eucalipto e pinus em território brasileiro. A pesquisa cita três dos principais problemas: o maior uso de água para o crescimento da biomassa de eucalipto, esgotando recursos hídricos locais; o desgaste do solo, como erosão e perda de nutrientes, devido à manipulação constante e inadequada do plantio, e o tamanho das plantações, que muitas vezes ultrapassa o máximo estipulado por estudo realizado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo

(ESALQ/USP), que estima que a plantação não pode comprometer mais de 20 % dos recursos hídricos em que se localiza.

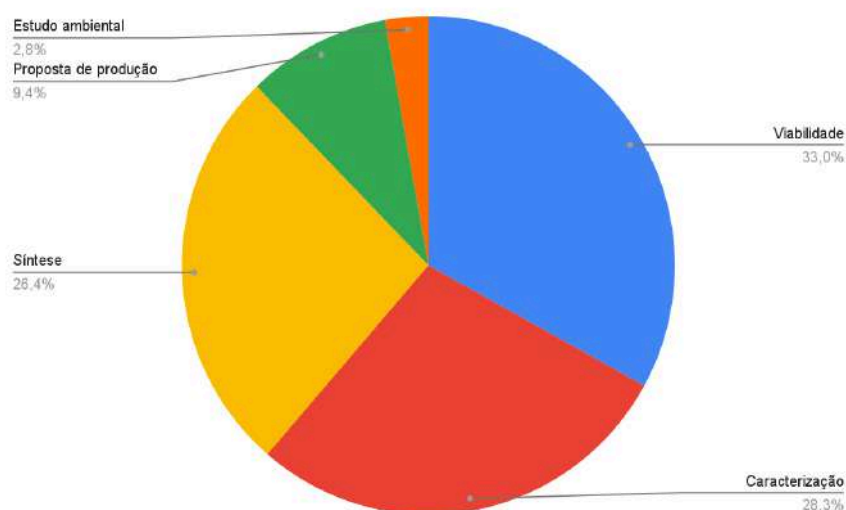
Além disso, cita diversos outros problemas socioambientais ligados ao tema, como o impacto das plantações no dia a dia de populações nativas dos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins. O cultivo das árvores está ligado, ainda, a problemas de saúde provocados pela exposição a agrotóxicos e acidentes devido ao uso de maquinaria pesada.

Dada à exposição de tais problemas, percebe-se o interesse brasileiro na procura e validação de fontes alternativas para fibras. O Brasil é um país que possui grandes produções na agricultura, podendo se beneficiar da biomassa gerada pelos resíduos que, muitas vezes, são descartados ou direcionados para outros setores da indústria como fontes de energia.

Das pesquisas realizadas, optou-se por selecionar os 50 artigos mais recentes que melhor se encaixassem no tema proposto pelo presente trabalho. Desses 50 artigos, foram feitas as análises de abordagem, para mapear a possível rota de interesse frente ao uso dessas matérias-primas e o ponto de maturidade das pesquisas relacionadas. Alguns artigos se encaixam em mais de uma categoria de abordagem, enquanto outros artigos não estudam especificamente uma única fibra.

A Figura 13 apresenta a distribuição dos 50 artigos selecionados dentre as classificações escolhidas, sendo essas: viabilidade, que é a abordagem de uma fibra alternativa quanto à sua viabilidade dentro da indústria de embalagens, como critérios decisivos as propriedades do papel produzido; caracterização, que é o estudo das propriedades da fibra alternativa ou do papel produzido a partir dela; síntese: que é a síntese direta de papel a partir da fibra alternativa na qual o trabalho se baseia; proposta de produção: que é a abordagem industrial do trabalho ao propor rotas e até mesmo plantas para a produção de papel de fibra alternativa; estudo ambiental: que é o estudo dos impactos ambientais, como a pegada de carbono, derivados da utilização das fibras alternativas. De modo geral, todos os campos envolvem preocupações e análises ambientais, pois como citado, a grande motivação para os estudos decorre da urgência e da necessidade de fontes alternativas para a fabricação de embalagens de papel, com o objetivo de melhorar o tempo de degradação dos materiais e diminuir o impacto na natureza.

**Figura 13:** Tendência de abordagem dentro dos 50 artigos selecionados.



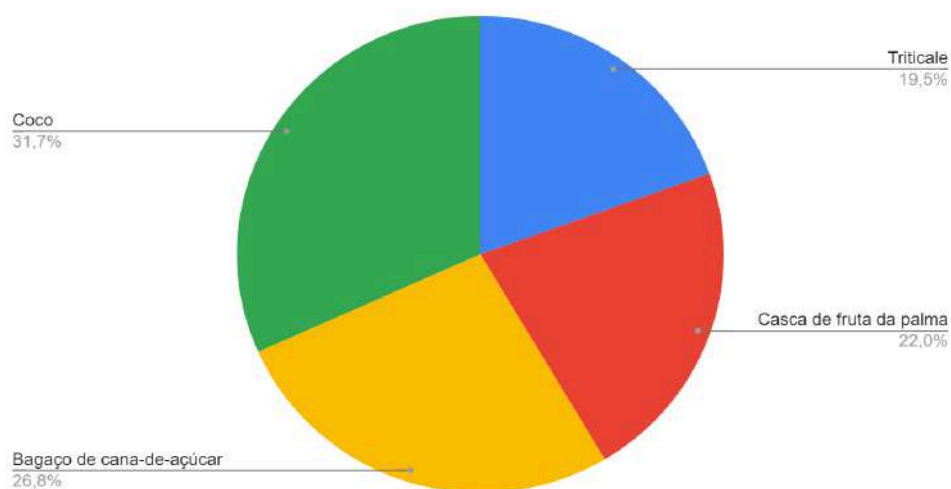
Fonte: Elaboração própria.

A maioria dos artigos são classificados nos campos de viabilidade e caracterização, os quais refletem aproximadamente 60 % das pesquisas. Esses resultados podem indicar que, atualmente, o interesse está em encontrar diferentes maneiras de introduzir essas fibras na cadeia produtiva. No entanto, observa-se escassez de publicações que apresentem propostas de produção em escala industrial, revelando que o uso de fibras alternativas na indústria tal como proposto ainda está na fase inicial.

Também foram selecionados artigos por meios de palavras-chave<sup>3</sup> incluindo as fibras alternativas desenvolvidas ao longo deste trabalho. As fibras alternativas foram: triticales, bagaço de cana-de-açúcar, casca da fruta da palma e casca de coco. Para essa seleção, foram analisadas as quantidades de publicações para cada fibra, analisando sua tendência. A pesquisa retornou, ao todo, 39 artigos, que foram analisados segundo a Figura 14.

<sup>3</sup> Ver capítulo 4.

**Figura 14:** Avaliação de artigos encontrados a partir das palavras-chave contendo as fibras alternativas escolhidas.



Fonte: Elaboração própria.

Aqui, todos os artigos analisados estavam exclusivamente voltados para a utilização das polpas das fibras como matéria-prima na produção de embalagens. O baixo volume de artigos que exploram as fibras escolhidas evidencia, mais uma vez, que esse ramo de estudos está em fase de maturação. Ainda há escassez de estudos aprofundados sobre as fibras analisadas. Frente ao exposto até então sobre o grande potencial de utilização delas pelo Brasil, no que tange às embalagens, entende-se que há grandes oportunidades acadêmicas para o desenvolvimento de tecnologias que possam tornar realidade a inserção desses materiais na indústria.

## 7. CONCLUSÃO

Dados os impactos ambientais ocasionados pelo uso de embalagens plásticas e também pela demanda de embalagens de papel produzidos a partir da madeira, observa-se que as fibras alternativas surgem como uma maneira de mitigar os danos, porém com pouca intenção de substituir por completo outras fontes. Muitas publicações optam por explorar a síntese de papéis a partir da mistura de fibras, em uma tentativa de encontrar um papel que possua as mesmas características ou características superiores ao seu equivalente proveniente da madeira.

Estudos demonstram que é possível a incorporação de diversas fibras alternativas na produção de papel e papelão no setor de embalagens, encontrando-se uma grande oportunidade de eliminar a questão do descarte indevido ou desperdício da biomassa enquanto se resolve um problema ambiental. Como por exemplo, o descarte de cascas de coco em aterros sanitários que geram a emissão de gases poluentes contribuindo para o aquecimento global, além de favorecer a proliferação de mosquitos e a disseminação de doenças, causando também poluição olfativa e visual devido ao mau cheiro e à acumulação de resíduos.

A produção mundial de coco verde teve um crescimento significativo nos últimos anos. No Brasil, as maiores plantações e produções concentram-se na faixa litorânea, especialmente no Nordeste e parte da região Norte. Apesar disso, ainda há poucos avanços na utilização dessas fibras para produção de embalagens no país. Entretanto, estudos avaliados neste trabalho, mostram que a fibra de coco pode ser eficaz como material reforçante em embalagens e amortecimento, proporcionando maior resistência mecânica devido ao tamanho das suas fibras.

O cultivo de tritcale no Brasil foi drasticamente reduzido com o passar dos anos, devido às desvantagens financeiras relacionadas ao uso primário desse material. No entanto, há espaço para sua implementação na indústria de embalagens. Há crescentes estudos nos últimos anos que evidenciam a capacidade dessa fibra de atender às características mecânicas necessárias para seu uso quando em proporções de 10 % a 30 % com outras fibras da madeira.

O bagaço de cana-de-açúcar já é amplamente utilizado como matéria-prima na produção de papel, sendo uma das duas fibras alternativas mais utilizadas. Seu uso solitário como matéria-prima é amplamente conhecido e, atualmente, pesquisadores procuram encontrar misturas dessa fibra com alternativas para melhorar a qualidade do papel produzido.

As misturas com caixas corrugadas, bagaço de amla e casca de milho mostraram resultados mecânicos promissores em todas as proporções estudadas.

Quanto à polpa da casca da fruta vazia da palma, observa-se que há a necessidade de adaptações à maquinaria de uma planta, caso haja sua implementação em algum processo já existente. Isso porque suas fibras não resistem à mesma velocidade de processamento que as fibras de origem da madeira e possuem maior absorção de água. Portanto, uma alternativa é a mistura dessa fibra com outras opções, como demonstrado a partir da introdução do *kenaf*. No caso exposto, é possível observar que as particularidades dimensionais das fibras de CVF e *kenaf*, quando unificadas, possuem grande impacto nas propriedades mecânicas do papel. Em baixas proporções de *kenaf*, o papel pode não possuir a resistência necessária para sua aplicação em embalagens. Porém, em proporções mais altas, como a 70 % de *kenaf*, o CVF mostra-se como um potencial aliado na manutenção das características mecânicas necessárias para a indústria.

Em geral, todos os experimentos aqui expostos demonstram uma melhora em comparação com as características do papel puro de fibras lenhosas, dadas às determinadas proporções das fibras alternativas na composição da polpa. Dentre as fibras analisadas, as características do papel produzido foram variadas, de forma que não se pode comparar o desempenho entre as fibras, uma vez que, dependendo das características desejadas no produto, podem-se utilizar diferentes fibras em diferentes proporções.

A prospecção revela que, de uma maneira geral, a tecnologia das fibras alternativas ainda precisa de maturação para ser, de fato, implementada na indústria. Muitas publicações focam no estudo da síntese e caracterização do papel resultante, o que evidencia que ainda há foco na busca pelo material que melhor pode atender a determinadas especificações. Além disso, países que são grandes produtores de culturas sazonais, como EUA, Índia e Brasil, lideram esse tipo de pesquisa, o que é um indicador positivo, uma vez que possuem o incentivo da implementação dos resultados promissores em suas práticas industriais sem a necessidade de gastos extras de importação ou ampliação de área produtiva.

As quatro fibras escolhidas mostraram-se bastante promissoras também para o cenário brasileiro. Isso porque o Brasil possui expressiva capacidade de produção de todas essas alternativas. Pela prospecção, observa-se que o país é um dos líderes de publicações sobre o tema, mas quando voltado para as fibras de triticale, bagaço de cana-de-açúcar, casca do fruto da palma e casca de coco, a baixa quantidade de artigos indica que ainda há um longo

caminho a se percorrer até que se possa desfrutar dos benefícios ambientais dessas fibras alternativas.

Como sugestões futuras, seria interessante reproduzir em patentes as análises que aqui foram realizadas para artigos. Além disso, seria desejável explorar as fibras selecionadas com uma visão mercadológica, entendendo como essa gradual substituição impactaria o mercado de embalagens.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABD EL-SAYED, ESSAM S.; EL-SAKHAWY, M.; EL-SAKHAWY, M. A.-M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 35, n. 2, p. 215–230, 25 jun. 2020.
- ABDULLAH, N.; SULAIM, F. The Oil Palm Wastes in Malaysia. **Biomass Now - Sustainable Growth and Use**, 30 abr. 2013.
- About TAPPI. Disponível em: <<https://www.tappi.org/menus/functional-navigation/About-Us/>>. Acesso em: 23 jun. 2024
- ASHORI, A. **Nonwood Fibers—A Potential Source of Raw Material in Papermaking**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 45, n. 10, p. 1133–1136, out. 2006.
- ASSOCIAÇÃO Brasileira de Embalagem: ABRE. In: **ESTUDO ABRE MACROECONÔMICO DA EMBALAGEM E CADEIA DE CONSUMO**. 1. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2023-2/>. Acesso em: 14 maio 2024.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6789-02: Paper—Standard Test Method for Accelerated Light Aging of Printing and Writing Paper by Xenon-Arc Exposure Apparatus**. West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- AZADI, P., INDERWILDI, O. R., FARNOOD, R., & KING, D. A. (2013). **Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 506–523.
- BHARDWAJ, A. et al. Development and Characterization of Chitosan and Beeswax–Chitosan Coated Biodegradable Corn Husk and Sugarcane Bagasse-Based Cellulose Paper. **Waste and Biomass Valorization**, 14 out. 2022.
- BATES, I. et al. Determining the quality of paper substrates containing triticale pulp for printing industry. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 35, n. 2, p. 272–278, 10 abr. 2020.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010.** , 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 9 ago. 2023

BS STANDARDS. **BS 3110:1959: Graphic Technology—Inks. Printing Inks—Methods for Measuring the Rub Resistance of Print.** Southampton, UK, 1959.

CAMERON, N. **Fundamental Packaging Technology, Materials and Processes.** Los Angeles, CA, EUA: Trittech Digital, 2018.

CASTRO, Clívia D. Pinho da Costa et al. Testing the Use of Coconut Fiber as a Cushioning Material for Transport Packaging. **Materials Sciences and Applications**, [S. l.], p. 151-156, 30 mar. 2012.

COELHO, A. J. P. et al. Atlantic Forest recovery after long-term eucalyptus plantations: The role of zoochoric and shade-tolerant tree species on carbon stock. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119789, 1 jan. 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 11, n. 2, agosto 2023**

**Conab - Triticale.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/item/7658-triticale>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

CONKE, L.; DO NASCIMENTO, E. **A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras: uma avaliação metodológica.** Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 10, n. 1, 2018.

D'ALMEIDA, M. L. O.; KOGA, M. E. T.; FERREIRA, D. C.; PIGOZZO, R. J. B.; TOUCINI, R.; REIS, H. M. dos; VIANA, E. F. **Celulose SENAI.** São Paulo, 2013.

**De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões | Agência de Notícias.** Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>. Acesso em: 9 ago. 2023.

DE MORI, C.; NASCIMENTO JUNIOR, A.; MIRANDA, M. Z. de. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura de triticale no mundo e no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014. 23 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos online, 150). Disponível em [http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do150.pdf](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do150.pdf). Acessado em: 9 mar. 2024.

DE WIT, W. *et al.* **Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização WWF Brasil**. Gland, Suíça: WWF - Fundo Mundial para a Natureza (Antigo World Wildlife Fund), 2019. Disponível em: [https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/51804/1552932397PLASTIC\\_REPORT\\_02-2019\\_Portugues\\_FINAL.pdf](https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/51804/1552932397PLASTIC_REPORT_02-2019_Portugues_FINAL.pdf). Acesso em: 9 ago. 2023.

DESHWAL, G. K.; PANJAGARI, N. R.; ALAM, T. An overview of paper and paper based food packaging materials: health safety and environmental concerns. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 10, p. 4391–4403, 23 jul. 2019.

DIAS, N. B.; SCHNEIDER, P.; CHAVES, G.; CELESTE, W. Aproveitamento da casca de coco verde para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering**, p. 179-195, 2019.

DOLCI, G. *et al.* How does plastic compare with alternative materials in the packaging sector? A systematic review of LCA studies. **Waste management & research**, 5 abr. 2024.

EXPRESS CARDS. **How Offset Printing Works**. YouTube, 23 jun. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5LMU-zB8Sro>

FREITAS, L.; FONSECA, I. **Relatório de Pesquisa Diagnóstico sobre Catadores de Resíduos Sólidos**. [s.l.] IPEA, 2012. Disponível em: <https://retosalsur.org/wp-content/uploads/2013/08/DIAGNOSTICO-CATADORES-BRASIL-IPEA-2012.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2023.

GEYER, R. A Brief History of Plastics. **Mare Plasticum - The Plastic Sea**, p. 31–47, 2020.

GONÇALVES, M. F. S.; BRITO, M.; LIMA, C. V. H.; BARBOSA, F. B. M. H. Logística reversa do resíduo de coco verde. Revista LOGS: **Logística e Operações Globais Sustentáveis**, v. 1, n. 1, 2019.

GOND, R. K.; GUPTA, M. K. A novel approach for isolation of nanofibers from sugarcane bagasse and its characterization for packaging applications. **Polymer Composites**, v. 41, n. 12, p. 5216–5226, 4 set. 2020.

HISANO, A. Cellophane, the New Visuality, and the Creation of Self-Service Food Retailing. **SSRN Electronic Journal**, 2017.

HORTA, P.M., MATOS, J.P., MENDES, L.L. “Digital food environment during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in Brazil: an analysis of food advertising in an online food delivery platform”, **The British Journal of Nutrition**. 2020.

IBGE, **Produção Agrícola Municipal 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/15/11863?indicador=11929>. Acesso em: 17 jan. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2836:2004: Graphic Technology—Prints and Printing Inks—Assessment of Resistance of Prints to Various Agents**. Geneva, Switzerland, 2004.

JAIN, P. et al. Functionalization of sugarcane bagasse-based paper with amla pomace/titanium dioxide nanoparticles providing antimicrobial protection for food safety. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 25 abr. 2023.

JIA, L.; EVANS, S.; LINDEN, S. VAN DER. Motivating actions to mitigate plastic pollution. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, 8 out. 2019.

JONES, B.; TADAJEWSKI, M. **The Routledge companion to marketing history**. London ; New York, Ny: Routledge, Taylor & Francis Group, 2016.

JUHA, J.O.; LAMBERG, J.A. Lamberg; PELTONIEM, M.; SÄRKKÄ, T.; VOUTILAINEN, M. **A EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DE PAPEL GLOBAL. O PAPEL**, [s. l.], v. 74, n. 9, 2013. Disponível em: [http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1380633861\\_9d98ac5d69c82e3958cc89d10147e758\\_976076025.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1380633861_9d98ac5d69c82e3958cc89d10147e758_976076025.pdf). Acesso em: 1 out. 2023.

JULIANO BARROS, C.; CAMPOS, A. **DESERTO VERDE - Os impactos do cultivo de eucalipto e pinus no Brasil**. p. 24, 2011.

KOTTASOVÁ, I. **The Great Pacific Garbage Patch is now so huge and permanent that a coastal ecosystem is thriving on it, scientists say.** Disponível em: <<https://edition.cnn.com/2023/04/17/world/plastic-pollution-ocean-ecosystems-intl-climate/index.html>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

LIU, A. **World Production and Utilization of Jute, Kenaf, and Allied Fibers.** Disponível em: <http://www.chinaconsultinginc.com/kenafworkshop.htm>. Acesso em: 10 mar. 2024.

LNBR | **BioValue – Palha e bagaço de cana-de-açúcar – LNBR.** Disponível em: <<https://lnbr.cnpem.br/biovalue/biomassas/palha-bagaco/#:~:text=O%20Brasil%20apresenta%20um%20potencial>>.

MAJOR, D. et al. PULP BLEACHING CONTROL AND OPTIMIZATION. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 38, n. 1, p. 466–476, 2005.

MAŁACHOWSKA, E. et al. Influence of lignin content in cellulose pulp on paper durability. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 19998, 17 nov. 2020.

METTÄNEN, M. Printing: Methods for measuring and predicting the printability of paper. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 25, n. 3, p. 391–404, 1 ago. 2010.

MEYERS, H.; GERSTMAN, R. The evolution of packaging. **The Visionary Package**, 2005.

MOHD ALI, M. et al. Pulp and paper production from oil palm empty fruit bunches: A current direction in Malaysia. **Journal of Agricultural and Food Engineering**, v. 1, n. 2, p. 1–9, 12 jul. 2020.

MOKRZYCKI, Wojciech; TATOL, Maciej. Color difference Delta E - A survey. **Machine Graphics and Vision**, v. 20, p. 383-411, 2011.

NANDAN, H. Vishnu et al. Experimental investigations on the mechanical properties and thermal analysis of coir-paper hybrid composite carry bag material. **Elsevier**, [S. l.], p. 1-4, 18 set. 2023.

NAPPER, I. E.; THOMPSON, R. C. Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. **Global Challenges**, v. 4, n. 6, 6 abr. 2020.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Great Pacific Garbage Patch** . Disponível em: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/great-pacific-garbage-patch/>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

NEGRÃO, Celso; CAMARGO, Eleida. **DESIGN DE EMBALAGEM: DO MARKETING À PRODUÇÃO**. 1. ed. atual. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2008. 337 p. v. 1. ISBN 978-85-7522-155-6.

NELMS, S. E. et al. Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory? **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 31 jan. 2019.

NOÉ AGUILAR-RIVERA. **Sustainable Sugarcane Bagasse Cellulose for Papermaking**. p. 121–163, 12 ago. 2016.

NOOR, A et al. Bio-packaging based on a composite of paper waste and coconut fiber. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], p. 1-6, 8 out. 2020.

OWEN, J.; LI, X. **Sustainable packaging in the US: From strategy to implementation**. Disponível em: <<https://www.rabobank.com/knowledge/s011424876-sustainable-packaging-in-the-us-from-strategy-to-implementation>>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ÖZDEN, Ö; SÖNMEZ, S. **Calendering of paper and its effects on printability**. 2020. p. 38-60. ISBN 978-625-7243-79-7.

**Paper and board production increased by 5.8% in 2021, returning to pre-Covid level**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2022/02/Cepi\\_Preliminary-\\_2021\\_Report.pdf](https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2022/02/Cepi_Preliminary-_2021_Report.pdf)>. Acesso em: 5 fev. 2024.

**Perfil 2021**. São Paulo, SP, Brasil: ABIPLAST, 2021.

PERMATA, D. A. et al. Delignification of Lignocellulosic Biomass. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 12, n. 2, p. 462–469, 2021.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts 2022 • Plastics Europe**. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

PLAZONIĆ, I.; BARBARIĆ-MIKOČEVIĆ, Ž.; ANTONOVIĆ, A. **Chemical Composition of Straw as an Alternative Material to Wood Raw Material in Fibre Isolation**. *Drvna industrija*, v. 67, n. 2, p. 119–125, 2016.

**Preliminary Statistics 2022** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/02/Cepi\\_Preliminary-statistics-2022\\_15022023.pdf](https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/02/Cepi_Preliminary-statistics-2022_15022023.pdf)>. Acesso em: 5 fev. 2024.

RAGHAVAN, K. **Review of the Economics, Technologies and Products in the Non-wood Sector**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.tappi.org/content/Events/19PEERS/19PEE16.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

RAFIDAH DAHLAN et al. Characterisation of pulp and paper manufactured from oil palm empty fruit bunches and kenaf fibres. **Pertanika journal of tropical agricultural science**, v. 40, n. 3, p. 449–457, 1 jan. 2017.

RAINEY, T. J.; CLARK, N. AN OVERVIEW OF BAGASSE AS A RESOURCE FOR THE AUSTRALIAN PAPER INDUSTRY. v. 106, n. 1271, p. 1–8, 1 jan. 2004.

ROSENBERGER, A. *et al.* **Costs of bioethanol production from winter cereals: the effect of growing conditions and crop production intensity levels**. *Indust Crops Prod*, v. 15, p. 91-102, 2002.

ROWELL, R.; STOUT, H. Jute and Kenaf. **International fiber science and technology series**, 15 nov. 2006.

RUDOLF, M. et al. **Overall Stability Valorization of Printed Sustainable Packaging Paper Containing Triticale Straw Pulp**. *Processes*, v. 11, n. 5, p. 1465, 1 maio 2023.

SILVA, A. C. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 4077-4086, 2014.

SILVA, G. O.; JERÔNIMO, C. E. Estudo de Alternativas para o Aproveitamento de Resíduos Sólidos da Industrialização do Coco. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**. 2012, v(10), nº 10, p. 2193 – 2208.

SOLOMON, B.D. **Biofuels and sustainability**. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1185, p. 119-134, 2010.

**Standard Test Method for Accelerated Light Aging of Printing and Writing Paper by Xenon-Arc Exposure Apparatus.** Disponível em: <<https://www.astm.org/d6789-02.html>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

**Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.** Disponível em: <<https://www.astm.org/e1131-20.html>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

**Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.** Disponível em: <[https://www.astm.org/d5229\\_d5229m-20.html](https://www.astm.org/d5229_d5229m-20.html)>. Acesso em: 7 jul. 2024.

**Standard Test Methods for Transmitted Shock Characteristics of Foam-in-Place Cushioning Materials.** Disponível em: <<https://www.astm.org/d4168-95r21.html>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

SUAREZ, Antonio; GHOSH, Ashok; PAULSEN, Fritz; HART, Peter W. **Life cycle carbon analysis of packaging products containing nonwood residues: A case study on linerboard and corrugating medium.** TAPPI Journal, v. 23, n. 3, p. 131-134, Mar. 2024. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2024.

TAKAHASHI, H. Aproveitamento de fibra de coco verde com amido de mandioca visando aplicações em em sistemas de embalagem. **XVII Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp**, 1.

TEIXEIRA, M. B. D.; OLIVEIRA, R. A; GATTI, T. H.; SUAREZ, P. A. Z. **O Papel: Uma Breve Revisão Histórica, Descrição da Tecnologia Industrial de Produção e Experimentos para Obtenção de Folhas Artesanais.** Revista Virtual de Química, Brasília, v. 9, n. 3, 20 jun. 2017. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/PauloSua rezNoP relo.pdf>. Acesso em: 1 out. 2023.

TERZIOĞLU, N. et al. Archetypes to categorise upstream packaging strategies for a circular economy. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 21, p. 200211, 1 maio 2024.

THE EDITORS OF ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Offset printing | printing technique**, 19 jun. 2016. (Nota técnica).

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World Production, Markets, and Trade Report**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2024.

VILLELA, A. A. et al. Status and prospects of oil palm in the Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 270–278, ago. 2014.

WANG, L. An Exploratory Comparative Study on Eco-Impact of Paper and Plastic Bags. **Journal of Fiber Bioengineering and Informatics**, v. 1, n. 4, p. 307–320, jun. 2008.

WANG, Yu-Yan et al. **Recent Advances in the Application of Functionalized Lignin in Value-Added Polymeric Materials**. *Polymers*, p. 2-25, 3 out. 2020.

WELLS, J. J. et al. Towards a holistic understanding of non-native tree impacts on ecosystem services: A review of Acacia, Eucalyptus and Pinus in Africa. **Ecosystem Services**, v. 60, p. 101511, abr. 2023.

WOOL, R. P. LIGNIN POLYMERS AND COMPOSITES. **Bio-Based Polymers and Composites**, p. 551–598, 2005.

YABANNAVAR, A.; BARTHA, R. Biodegradability of some food packaging materials in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 11, p. 1469–1475, nov. 1993.

YASH DHOTE et al. Impact of optical brightening agents on alkali-based inks in packaging: A comparative study on color accuracy. **Color research & application/Color research and application**, 5 dez. 2023.