

SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DO PAPEL: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO PAPEL PARDO RECICLÁVEL E VIRGEM

SUSTAINABILITY IN THE PAPER INDUSTRY: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE PRODUCTION PROCESSES OF RECYCLABLE AND VIRGIN BROWN PAPER

DOI: 10.24933/rep.v10i1.491

v. 10 n. 1 (2026)

MENDES, Carolina Soares Bronze¹; CAMARGO, Ana Beatriz Ribeiro de¹; BARBOSA, Ana Cristina Santos¹; FELIPPE, Monica Tais Siqueira D'Amelio²

¹Alunas do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Itatiba;

²Professora Orientadora Doutora, Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Itatiba.

carolina.sbm7@gmail.com

RESUMO. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre os processos de produção do papel pardo reciclável e do papel pardo virgem, com foco na sustentabilidade ambiental, viabilidade técnica e econômica. A pesquisa, de abordagem qualitativa, foi realizada por meio de revisão bibliográfica em fontes acadêmicas e técnicas. As pesquisas realizadas mostraram que o papel virgem, produzido a partir de fibras extraídas da madeira, oferece maior resistência mecânica, mas gera impactos ambientais significativos, como alto consumo de água e energia, maior emissão de CO₂ e custos elevados. Em contrapartida, o papel reciclado, oriundo da reutilização de aparas, apresenta menor resistência estrutural, podendo ser de 10% a 30% menor em comparação ao papel virgem, mas destaca-se pelo menor impacto ambiental, menor geração de resíduos e redução nos custos de produção. Comparativamente à produção de papel virgem, a fabricação de papel reciclado apresenta expressivas vantagens ambientais, incluindo uma redução de aproximadamente 70% no consumo de água, de 40% a 50% no consumo energético e de cerca de 50% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), reforçando seu potencial como estratégia para a promoção da sustentabilidade e o enfrentamento das mudanças climáticas. Em termos econômicos, o custo médio da produção de uma tonelada de papel pardo reciclado varia entre R\$ 1.700,00 e R\$ 2.200,00, representando uma economia de cerca de 35% a 45%. A análise demonstrou que, apesar das limitações mecânicas, o papel reciclado é uma alternativa viável e sustentável para a indústria, principalmente quando associado ao uso equilibrado de fibras virgens.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Papel pardo. Reciclagem. Impacto ambiental. Economia circular.

ABSTRACT. This work presents a comparative study between the production processes of recyclable brown paper and virgin brown paper, focusing on environmental sustainability, technical and economic viability. The research, using a qualitative approach, was conducted through a literature review of academic and technical sources. The research showed that virgin paper, produced from fibers extracted from wood, offers greater mechanical resistance but generates significant environmental impacts, such as high water and energy consumption, higher CO₂ emissions, and high costs. In contrast, recycled paper, derived from the reuse of waste paper, has lower structural resistance, which can be 10% to 30% lower compared to virgin paper, but stands out for its lower environmental impact, less waste generation, and reduced production costs. Compared with the production of virgin paper, the manufacture of recycled

paper offers significant environmental advantages, including a reduction of approximately 70% in water consumption, 40% to 50% in energy use, and about 50% in carbon dioxide (CO₂) emissions, reinforcing its potential as a strategy for promoting sustainability and addressing climate change. In economic terms, the average cost of producing one ton of recycled brown paper ranges from R\$ 1,700.00 to R\$ 2,200.00, representing savings of approximately 35% to 45%. The analysis demonstrated that, despite mechanical limitations, recycled paper is a viable and sustainable alternative for the industry, especially when associated with the balanced use of virgin fibers.

Keywords: Sustainability. Brown paper. Recycling. Environmental impact. Circular economy.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por alternativas mais ecológicas em diversos setores industriais, incluindo a produção de papel. A indústria do papel desempenha uma posição fundamental na economia global. Porém, seu processo produtivo pode gerar impactos ambientais significativos, especialmente no consumo de recursos naturais, na emissão de poluentes e na geração de resíduos sólidos. Dentre os diversos tipos de papel, destaca-se o papel pardo, que pode ser virgem ou reciclado.

O papel pardo virgem é aquele de primeira produção, feito a partir da celulose e que será utilizado pela primeira vez. O papel pardo reciclado é produto do reaproveitamento de papéis já utilizados. Ambos são essenciais na produção de embalagens e proteção de produtos, sendo que a principal diferença reside no seu processo de produção, composição e resistência (FIDELIP, 2022).

A produção de papel pardo virgem demanda o uso de matérias-primas primárias, como a celulose proveniente da madeira. Isso aumenta substancialmente os custos com a aquisição e processamento da matéria-prima, além de gerar um impacto ambiental e econômico significativo devido ao desmatamento e ao consumo de recursos naturais. Já a produção do papel pardo reciclado utiliza resíduos como matéria-prima, o que reduz o uso de fibras virgens. No entanto, mesmo sem o uso de celulose nova, a reciclagem ainda consome energia para o transporte do material, operação das máquinas e tratamento do papel reciclado (GOUVEIA, 2010).

O engenheiro químico tem uma função importante na busca por soluções que diminuam os custos e impactos ambientais, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes. Além disso, ele contribui para atender à crescente demanda por produtos recicláveis e reforça a importância de estudos que avaliem a viabilidade técnica e econômica da reciclagem em comparação com a produção convencional. Nesse contexto, é essencial comparar os métodos de fabricação de papel pardo reciclado e virgem, a fim de avaliar suas implicações ambientais, energéticas e econômicas, contribuindo assim para a formação do engenheiro químico.

Assim, este trabalho tem como objetivo compreender, analisar e comparar os processos produtivos desses dois tipos de papel, desde a coleta e o reaproveitamento de fibras celulósicas até a transformação final em chapas de papelão. A partir dessa análise, busca-se compreender qual alternativa apresenta maior sustentabilidade e viabilidade no contexto industrial brasileiro, auxiliando na tomada de decisões para um setor mais sustentável e alinhado com as exigências ambientais e econômicas atuais.

A Cadeia de Reciclagem de Papel

A reciclagem de papel é fundamental na preservação ambiental e na promoção da economia circular, contribuindo significativamente para a redução da extração de matérias-primas e para a diminuição dos impactos ambientais. No Brasil, embora o processo de reciclagem tenha mostrado avanços, enfrenta desafios estruturais, fiscais e de demanda que comprometem seu potencial de expansão. A Embrapa (2024) destaca que o papel reciclado pode substituir a celulose virgem em diversas aplicações industriais, reduzindo o consumo de água e energia. Entretanto, barreiras tributárias e a falta de incentivos adequados dificultam o crescimento desse setor.

A cadeia de reciclagem de papel começa com a coleta, que pode ser realizada por catadores, empresas especializadas ou por meio de programas municipais de coleta seletiva. O material coletado é encaminhado para centrais de triagem, onde passa por uma rigorosa separação para remover impurezas, como plásticos, grampos e tintas. Após essa triagem, o papel é submetido a processos de maceração e lavagem, que eliminam contaminantes e preparam as fibras de celulose para a reintrodução no ciclo produtivo. O processo também inclui etapas de destintagem e branqueamento, garantindo a qualidade do papel reciclado para diferentes usos industriais.

Apesar da eficiência técnica do processo, o setor de reciclagem enfrenta dificuldades econômicas e estruturais. Um estudo da Associação Nacional dos Aparistas de Papel (ANAP), realizado pela consultoria MaxiQuim, apontou que, em 2023, 1,8 milhão de toneladas de papel foram processadas por 53 empresas do setor (ANAP, 2023). Contudo, a falta de investimentos adequados é evidente, como demonstra a idade média da frota de caminhões de transporte, que aumentou de oito para quase onze anos entre 2018 e 2023. A renovação da frota, essencial para reduzir emissões de poluentes e aumentar a eficiência logística, sofreu um impacto negativo devido à escassez de financiamentos acessíveis (SETCESP, 2023).

Desafios Fiscais e a Demanda por Papel Reciclado

Um fator preocupante é a mudança de comportamento de setores industriais, como os segmentos gráfico e de embalagens, que reduziram a demanda por papel reciclado em favor da celulose virgem. Isso está diretamente relacionado às políticas fiscais desfavoráveis à reciclagem. Com a recente reforma tributária, a reciclagem não recebeu os incentivos esperados e pode sofrer um aumento na carga tributária, caso o texto final não seja alterado. O Projeto de Lei 4035/2021, em tramitação na Câmara dos Deputados, busca restabelecer a isenção de PIS/Cofins para materiais recicláveis, o que poderia estimular a atividade e reduzir os custos para as indústrias. Paralelamente, a ANAP apoia o PLP 68/2024, que propõe ajustes para beneficiar o setor de reciclagem dentro da reforma tributária, especialmente por meio das emendas 1511 e 1525, sugeridas pelo Senador Jorge Seif Júnior (PL-SC) (CONGRESSO NACIONAL, 2025).

Os desafios fiscais também envolvem decisões judiciais. O Supremo Tribunal Federal (STF), em 2021, declarou inconstitucional um benefício da Lei nº 11.196/2005, que previa isenção de PIS/Cofins para as vendas de recicláveis à indústria de transformação. Essa decisão impactou negativamente o setor, reduzindo sua competitividade. Especialistas alertam que, sem medidas corretivas, segmentos como o de plásticos — que atualmente recicla apenas 22% do seu potencial — dificilmente ultrapassará um crescimento de 1% ao ano até 2030 (CONGRESSO NACIONAL, 2021).

Em resposta a essa situação, o Projeto de Lei 4035/2021, em tramitação na Câmara dos Deputados, busca restabelecer a isenção de PIS/Cofins para materiais recicláveis, incentivando a atividade e ajudando a reduzir os custos operacionais das empresas. A proposta visa corrigir as distorções tributárias que afetaram o setor e promover um ambiente mais favorável à economia circular. Além disso, o Projeto de Lei 2.522/2022, de autoria do senador Carlos Portinho (PL-RJ), também propõe isenção de PIS/Pasep e Cofins para empresas que vendem materiais recicláveis, com o objetivo de corrigir distorções e estimular a aquisição desses insumos pela indústria (AGÊNCIA SENADO, 2022). Em 2023, o Projeto de Lei 2.522/2022 avançou na Comissão de Meio Ambiente do Senado, recebendo apoio do relator Nelsinho Trad (PSD-MS), que ressaltou os benefícios econômicos e ambientais dessa proposta, buscando fortalecer a economia verde e reduzir a carga tributária sobre a reciclagem (AGÊNCIA SENADO, 2023).

Além disso, o Projeto de Lei 3701/2023, também em tramitação no Senado, propõe alterações na Lei nº 11.196/2005, permitindo o creditamento de PIS e Cofins na aquisição de materiais recicláveis e isentando esses tributos na venda de resíduos reciclados (SENADO FEDERAL, 2023). Essas iniciativas refletem esforços contínuos para corrigir os impactos da reforma tributária de 2021 e garantir um ambiente mais favorável à reciclagem no Brasil. Apesar de ainda haver desafios no Congresso, o setor continua pressionando para que mais incentivos sejam incorporados à legislação tributária, a fim de fomentar a sustentabilidade e a economia circular.

Legislação

A legislação brasileira tem se esforçado para regulamentar e incentivar a reciclagem de materiais, incluindo o papel pardo reciclável, a fim de promover a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental. O Quadro 1 apresenta um resumo das principais legislações relacionadas à reciclagem de papel no Brasil.

Quadro 1 – Principais legislações para a reciclagem do papel no Brasil.

Lei/Decreto	Descrição	Data de Publicação	Principais Pontos
Lei nº 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos	Estabelece a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, promovendo a reciclagem e a responsabilidade compartilhada.	2 ago. 2010	Estabelece diretrizes para a gestão de resíduos e a logística reversa de embalagens, incluindo o papel.
Lei nº 14.026/2020 - Novo Marco Legal do Saneamento Básico	Define novos parâmetros para o saneamento e a gestão de resíduos sólidos, incentivando a coleta seletiva e a reciclagem.	15 jul. 2020	Impõe a criação de sistemas de coleta seletiva para aumentar a reciclagem de resíduos, incluindo papel.
Lei nº 14.260/2021 - Política Nacional de Reciclagem	Fortalece a reciclagem no Brasil, criando mecanismos de financiamento e apoio à coleta seletiva e à reciclagem de materiais.	6 dez. 2021	Incentiva a implementação de programas de reciclagem e aumenta a taxa de reciclagem no país.
Decreto nº 11.044/2022 - Logística Reversa de Embalagens de Papel e Papelão	Regula a obrigatoriedade de logística reversa para embalagens de papel e papelão, garantindo o retorno desses materiais ao ciclo produtivo.	8 jun. 2022	Obriga empresas a criar sistemas de logística reversa para embalagens de papel e papelão, promovendo o reaproveitamento desses materiais.

Lei Estadual de Minas Gerais nº 22.510/2017	Exige que os órgãos públicos do estado utilizem, no mínimo, 50% de papel reciclado em seus materiais gráficos.	23 jun. 2017	Promove o uso de papel reciclado na administração pública, incentivando a reciclagem dentro do setor público.
---	--	--------------	---

Fonte: Próprio autor.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a gestão e o gerenciamento adequado dos resíduos, incluindo a obrigatoriedade da logística reversa para embalagens, o que abrange o papel reciclável. Além disso, a Lei nº 14.260/2021, sancionada para fortalecer a economia circular, cria mecanismos como o financiamento de projetos voltados para a reciclagem e o reaproveitamento de materiais, incentivando a utilização de papel reciclado em processos produtivos e embalagens. Tais legislações buscam não só diminuir a quantidade de resíduos sólidos gerados, mas também aumentar a reciclagem, garantindo a participação da indústria e do consumidor na cadeia de reciclagem de materiais como o papel pardo reciclável (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2010; 2022).

Pegada de carbono e a reciclagem de papel

A reciclagem de papel pardo tem um importante papel na redução da pegada de carbono. Isso porque o reaproveitamento de fibras recicladas diminui significativamente a necessidade de produção de papel a partir de celulose virgem, processo que envolve a extração de recursos naturais e consome grandes quantidades de energia. Estudos apontam que a utilização de papel reciclado pode reduzir até 60% do consumo de energia em comparação com o processo de fabricação do papel virgem. Pode também evitar a emissão de gases de efeito estufa associados ao desmatamento e ao uso de energia não renovável. Assim, a reciclagem de papel pardo não só contribui para a diminuição da pegada de carbono, mas também ajuda a promover práticas mais sustentáveis no setor de embalagens e outras indústrias que utilizam esse material, alinhando-se aos objetivos globais de redução do impacto ambiental e de transição para uma economia circular (EMBRAPA, 2022; CALDAS, 2021).

Economia circular e a reciclagem de papel

A economia circular busca minimizar o desperdício e maximizar o uso de recursos, promovendo a reutilização, o reparo e a reciclagem de materiais. No contexto do papel pardo reciclável, a adoção desse modelo econômico é fundamental para reduzir a dependência de recursos naturais e promover práticas sustentáveis no setor de embalagens. A reciclagem de papel pardo contribui diretamente para a economia circular. As fibras recicladas são reintegradas ao ciclo produtivo, diminuindo a necessidade de produção de papel a partir de celulose virgem e, consequentemente, reduzindo o impacto ambiental. Além disso, a reciclagem de papel pardo permite a redução do consumo de energia, água e outros recursos, além de diminuir a quantidade de resíduos sólidos nos aterros sanitários. Dessa forma, o processo de reciclagem é um pilar essencial para a transição do Brasil para uma economia mais sustentável (CALDAS, 2021).

Para que a reciclagem de papel se torne um pilar sólido dentro da economia circular brasileira, é fundamental que as políticas públicas sejam aprimoradas, garantindo incentivos fiscais, maior investimento em infraestrutura e o fortalecimento das legislações relacionadas à sustentabilidade. Dessa forma, o Brasil pode aproveitar todo o potencial da reciclagem de papel

para se tornar um modelo de economia circular em um cenário global cada vez mais focado na redução do impacto ambiental.

Estrutura da celulose

A celulose é um polissacarídeo de origem vegetal formado por unidades repetidas de β -D-glicose, unidas por ligações glicosídicas do tipo β -1,4, o que resulta em cadeias lineares com elevado grau de polimerização. Sua fórmula empírica é $(C_6H_{10}O_5)_n$, sendo “n” o número de unidades que compõem a macromolécula. Essa estrutura permite a formação de extensas ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, conferindo à celulose elevada estabilidade, resistência à tração e insolubilidade em água e solventes orgânicos (ROWELL et al., 2005). As cadeias de celulose se organizam em micro fibrilas que apresentam regiões cristalinas — altamente organizadas — e regiões amorfas — com menor grau de organização. A proporção entre essas regiões afeta diretamente as propriedades mecânicas da fibra, como a flexibilidade e a rigidez (SIQUEIRA; PASQUINI; GROSSO, 2010). A maior cristalinidade, por exemplo, está associada a maior resistência, enquanto o aumento da porção amorfa contribui para maior absorção de água.

Nas fibras vegetais utilizadas na indústria papeleira, como o eucalipto e o pinus, a celulose é o componente majoritário da parede celular, estando associada à hemicelulose e à lignina. No entanto, para a aplicação na fabricação de papel, é necessário separar esses componentes por meio de processos químicos ou mecânicos, sendo o processo Kraft um dos mais utilizados (COSTA et al., 2018).

A integridade estrutural da celulose ao final do processo de extração influencia diretamente a qualidade da fibra obtida. Fibras virgens mantêm cadeias poliméricas mais longas e intactas, o que garante melhor desempenho mecânico ao papel. Já fibras recicladas tendem a apresentar degradação parcial das cadeias de celulose devido aos processos anteriores de uso e reprocessamento, o que compromete a resistência do produto (D’ALMEIDA, 1988; SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

A composição fibrosa é um dos principais fatores que determinam a qualidade, o desempenho mecânico e a sustentabilidade do papel. As fibras celulósicas empregadas na indústria papeleira podem ser classificadas quanto à sua origem e quanto ao seu comprimento, o que influencia diretamente nas características do produto (SILVA, 2015).

A indústria de papel utiliza, majoritariamente, três tipos de fibras: fibras virgens de origem vegetal, fibras recicladas e fibras sintéticas. As fibras virgens são obtidas diretamente de materiais vegetais, principalmente de espécies florestais como o pinus (coníferas) e o eucalipto (folhosas). Árvores coníferas fornecem fibras longas, enquanto as folhosas fornecem fibras curtas. As fibras virgens mantêm sua estrutura íntegra, o que garante maior resistência mecânica ao papel, sendo recomendadas para aplicações que exigem robustez, como embalagens. Segundo Silva et al. (2015), fibras longas oriundas de coníferas proporcionam melhor desempenho em resistência à tração e ao rasgo, enquanto as fibras curtas de folhosas oferecem melhor qualidade de superfície e opacidade.

As fibras recicladas são resultantes do reaproveitamento de papéis pós-consumo. Elas possuem menor resistência mecânica, devido à deterioração natural ao longo dos ciclos de reciclagem. Entretanto, essas fibras representam uma alternativa essencial para a sustentabilidade ambiental, pois reduzem o consumo de recursos naturais como madeira e água. Conforme Sékula (2011), as fibras recicladas só podem ser reutilizadas de quatro a sete vezes antes de perderem completamente sua funcionalidade estrutural, em função da progressiva ruptura e encurtamento das cadeias celulósicas.

As propriedades mecânicas do papel — como resistência à tração, rasgo, estouro e compressão (RCT e CMT) — estão diretamente relacionadas à morfologia e ao estado das fibras. As fibras longas permitem maior entrelaçamento e formação de pontos de ligação mais resistentes, enquanto as fibras curtas contribuem para maior compacidade da folha, mas com menor resistência. As fibras recicladas, por sua vez, já passaram por ciclos de refinação e têm suas ligações intercelulósicas degradadas, o que reduz sua capacidade de formar ligações resistentes (SANTOS; OLIVEIRA, 2020; D’ALMEIDA, 1988).

Na prática industrial, a combinação de fibras curtas e longas é comum, pois permite um equilíbrio entre resistência e qualidade superficial. Essa mistura contribui para um desempenho técnico adequado e um custo mais eficiente no processo produtivo (SANTOS & OLIVEIRA, 2020).

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo entre os processos produtivos do papel pardo virgem e reciclado, abrangendo desde a obtenção das fibras celulósicas até a produção de chapas de papelão. A análise visou avaliar a sustentabilidade e a viabilidade técnica e econômica de ambos os modelos no cenário industrial brasileiro, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em prol de uma logística e cadeia produtiva mais sustentáveis.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi uma revisão integrativa de caráter qualitativo, para compreender os processos de fabricação do papel pardo virgem e reciclável. A pesquisa abrangeu todas as fases, desde a extração da madeira ou a coleta das aparas para iniciar a reciclagem, até a distribuição do produto ao cliente.

A pesquisa envolveu a coleta e análise de dados da literatura pertinente aos processos de produção dos papéis pardo virgem e reciclado. Para isso, foram realizadas consultas em bases de dados acadêmicas, como Google Acadêmico, *Science.gov*, Scielo, *ResearchGate* e Academia.edu. Foram identificados estudos recentes que descreveram as etapas do processo produtivo, os químicos envolvidos, os custos e outros aspectos pertinentes. Também foram consultados livros especializados e procedimentos operacionais que abordam os processos analisados como os tipos de fibras. As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram: "produção de papel pardo", "papel pardo virgem", "papel pardo reciclável", "processo de fabricação de papel", "indústria de papel e celulose", "sustentabilidade papel pardo", "produção de papel reciclado vs virgem", "impacto ambiental indústria do papel" e "comparação dos processos".

O critério de seleção considerou a atualidade das publicações, a rigorosidade da abordagem metodológica e a confiabilidade das fontes, com prioridade para artigos revisados e fontes reconhecidas, garantindo uma base sólida e atualizada. O Quadro 2 apresenta os principais artigos selecionados para utilização na pesquisa deste trabalho.

Quadro 2 – Principais artigos utilizados como base do estudo.

Título do artigo	Autores	Ano de publicação
Reutilização de fibras celulósicas e seus efeitos nas propriedades do papel.	Maria Cristina Sékula	2011
Tecnologias de reciclagem e sustentabilidade na indústria de papel	Roberta S. Costa e Fábio M. Almeida	2018
Propriedades físicas e mecânicas do papel reciclado em comparação ao papel virgem.	Vera T. Santos e Renato A. Oliveira	2020

O impacto ambiental da indústria de papel e celulose	José Paulo Maia	2024
Análise energética na produção de papel	José Carlos Felipe	2024
Influência das fibras recicladas nas propriedades de resistência do papel	Tânia R. da Silva, Lucas F. Moura e Mariana A. Costa	2015
Celulose e Papel: Tecnologia de Fabricação do Papel	Maria Luiza Otero D'Almeida	1988

Fonte: Próprio autor.

Foram selecionados 6 artigos no período de 2011 a 2024 e 1 artigo de 1988 de literatura base. Após a coleta e análise dos dados obtidos, foi realizada uma discussão comparativa entre os dois processos produtivos, com o intuito de avaliar qual deles oferece maior viabilidade e sustentabilidade, sem comprometer a qualidade do produto ou eficiência do processo.

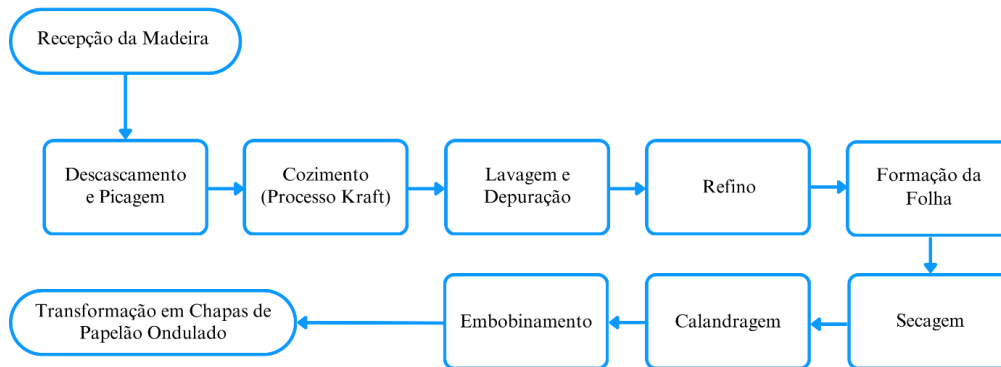
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Processo de produção do papel virgem

Na indústria de papel e celulose, a matéria-prima é transportada até as fábricas, onde passa por uma etapa de descascamento e picagem, transformando-se em cavacos uniformes. Estes são alimentados em digestores contínuos ou por bateladas, nos quais ocorre a cocção com licor branco (solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio), no chamado processo Kraft. Esse processo tem como objetivo separar a celulose da lignina e de outros componentes da madeira, resultando em uma polpa marrom de alta resistência, ideal para papéis de embalagem.

Após a cocção, a polpa é lavada e pode ou não passar por uma etapa de branqueamento, dependendo do grau de coloração desejado. No caso do papel pardo, geralmente o branqueamento é inexistente. Em seguida, a polpa é refinada mecanicamente para melhorar as ligações entre as fibras, o que aumenta a resistência mecânica do papel. A etapa seguinte é a formação da folha, feita em máquinas contínuas como a máquina Fourdrinier, onde a polpa é distribuída sobre uma tela de malha fina. A água é removida por gravidade, vácuo e prensas mecânicas, até que o papel atinja a umidade adequada para a secagem. A secagem é realizada em cilindros aquecidos a vapor, que reduzem a umidade para cerca de 5 a 8%. Após essa etapa, o papel é calandrado e segue para as bobinas industriais. Essas bobinas são, então, cortadas conforme a necessidade dos clientes e destinadas a fabricantes de caixas e chapas de papelão ondulado (ABPO, 2012). A Figura 1 ilustra as principais etapas que compõem o processo de produção do papel pardo virgem, desde a obtenção da matéria-prima até o produto final.

Figura 1 – Representação esquemática do processo de produção do papel pardo virgem.

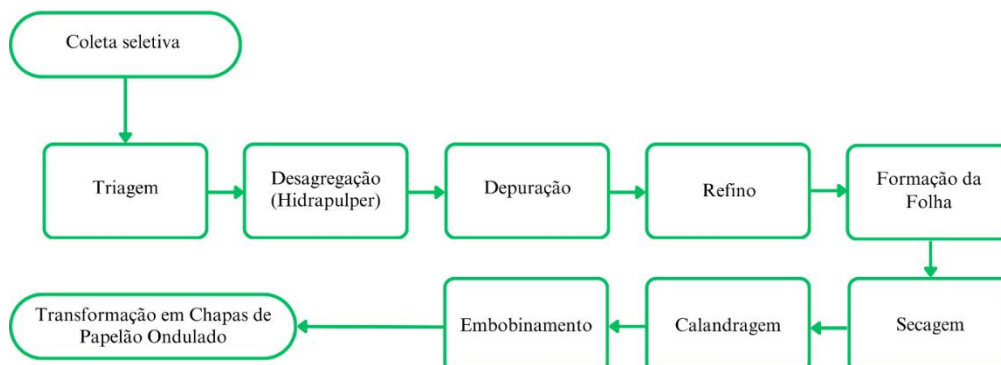


Fonte: Próprio autor.

Processo de produção do papel reciclado

O papel pardo reciclado é produzido a partir da reutilização de papéis pós-consumo e aparas industriais. O processo inicia-se com a coleta seletiva e o transporte do material até centros de triagem, onde ocorre a separação por tipo de fibra e remoção de impurezas como plásticos, metais e materiais orgânicos. Em seguida, o papel é encaminhado ao hidrapulper, onde é misturado com água e agitado até se transformar em uma polpa de fibras reaproveitadas. Essa polpa passa por sistemas de depuração e flotação, nos quais são removidas as partículas de tinta, adesivos e outros contaminantes. Se necessário, aditivos são adicionados para reforçar a estrutura da fibra e melhorar as propriedades do papel final. A massa fibrosa segue para a refinaria, onde as fibras são tratadas para garantir melhor entrelaçamento. Na etapa seguinte, a polpa é enviada à máquina de papel, onde ocorre a formação da folha. A água é retirada através de seções de vácuo, prensas e secadores, resultando em uma folha contínua de papel reciclado. Posteriormente, essa folha passa pela calandra para nivelamento e brilho superficial, e são enroladas em grandes bobinas. Estas bobinas podem ser utilizadas diretamente na confecção de chapas de papelão ondulado ou cortadas para produção de embalagens como caixas (PULGÃO, 2024). A Figura 2 sintetiza as etapas que compõem o processo de produção do papel pardo reciclado.

Figura 2 – Etapas do processo de produção do papel pardo reciclado.



Fonte: Próprio autor.

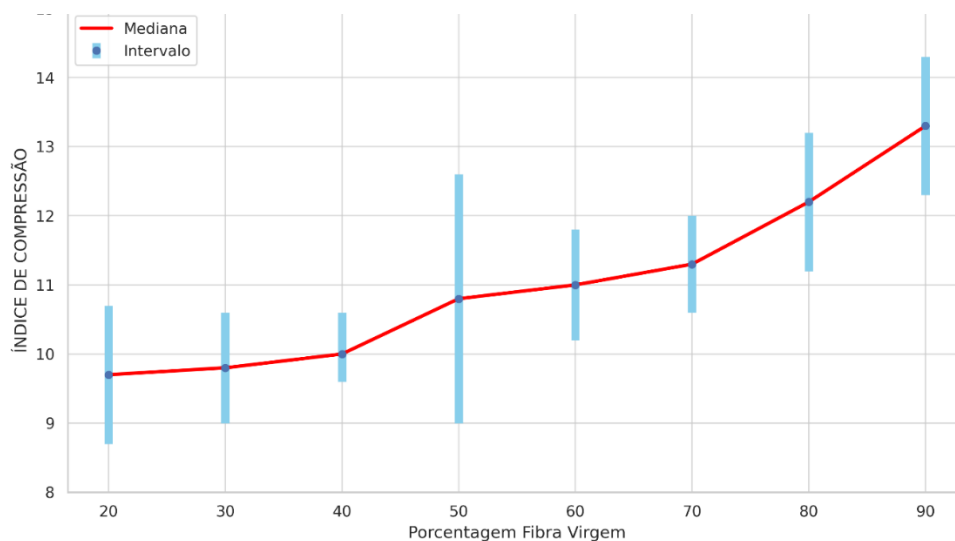
Comparando as Figuras 1 e 2 é possível verificar que os processos de produção do papel virgem e do papel reciclado apresentam diferenças significativas, especialmente no que diz respeito à matéria-prima e à sustentabilidade. O papel virgem é produzido a partir da madeira, que passa por etapas como descascamento, picagem, cozimento (Processo Kraft) e lavagem, o que envolve o uso intensivo de recursos naturais e produtos químicos. Já o papel reciclado tem início com a coleta seletiva de papéis usados, passando por processos mecânicos mais simples, como triagem e desagregação (Hidrapulper), sem a necessidade de extração de matéria-prima da natureza. Enquanto o processo do papel virgem é mais longo e complexo, o do papel reciclado é mais direto e sustentável.

Comparação entre as qualidades do papel virgem e do papel reciclado

Ao comparar as propriedades do papel pardo virgem e reciclado, Santos e Oliveira (2020) apontam que o primeiro possui maior resistência mecânica devido à preservação da estrutura das fibras. Já o papel reciclado, composto por fibras que já passaram por múltiplos ciclos de reutilização, apresenta uma resistência menor.

De acordo com D'Almeida (1988), a resistência do papel está intimamente ligada à qualidade e à composição das fibras, além do processo de fabricação. Essa relação é evidenciada pela diminuição do índice de resistência à compressão (RCT) nas amostras com maior percentual de fibras recicladas. Na Figura 3 observa-se a relação entre o índice de compressão (RCT – Ring Crush Test) e a porcentagem de fibra virgem presente na composição do papel. O gráfico demonstra uma tendência clara de aumento da resistência mecânica conforme se eleva o teor de fibra virgem no material. A linha vermelha representa a mediana dos valores obtidos em cada proporção de mistura entre fibras virgens e recicladas, enquanto as barras azuis indicam o intervalo de variação dos dados. Nota-se que amostras com maiores porcentagens de fibra virgem (acima de 70%) apresentam índices de compressão mais elevados, evidenciando a influência da estrutura intacta das fibras virgens na resistência do papel. Por outro lado, materiais com menor proporção de fibra virgem — e, portanto, maior presença de fibra reciclada — apresentam valores reduzidos de compressão, o que está associado ao enfraquecimento progressivo das fibras ao longo dos ciclos de reutilização.

Figura 3 – Comportamento do índice de compressão em relação à porcentagem de fibra virgem.



Fonte: Adaptado de Saad (2018).

É importante destacar que o gráfico abrange tanto o papel pardo reciclado quanto o papel virgem, considerando amostras com diferentes proporções de mistura entre esses dois tipos de fibra. Assim, ele fornece uma representação visual clara do impacto da composição das fibras na resistência mecânica do papel. Isso reforça a relevância do equilíbrio entre sustentabilidade (com o uso de fibras recicladas) e desempenho técnico (associado ao uso de fibras virgens) na produção de embalagens e materiais de papel (SILVA et al., 2015).

Avanços Tecnológicos na Reciclagem de Papel

As tecnologias de reciclagem têm avançado consideravelmente, permitindo que papéis reciclados possuam características mais próximas às dos papéis virgens. Processos como a refinação química com enzimas, que ajudam a restaurar as propriedades das fibras, e o uso de novas tecnologias de depuração para remover melhor as impurezas, são alguns exemplos de inovações que têm sido aplicadas. Esses avanços podem, no futuro, melhorar ainda mais a qualidade do papel reciclado, aumentando sua competitividade no mercado, especialmente em aplicações que exigem maior resistência mecânica (SINPACEL, 2023; SANTOS & OLIVEIRA, 2020).

A refinação enzimática é uma tecnologia emergente que utiliza enzimas específicas para modificar as fibras de celulose, melhorando suas propriedades sem o uso intensivo de energia. Estudos indicam que a aplicação de enzimas pode reduzir significativamente o consumo de energia e melhorar as propriedades finais do papel, como resistência e qualidade da superfície (ABTCP, 2023).

No entanto, é importante destacar que as fibras recicladas não podem ser reutilizadas indefinidamente sem perda de qualidade. Esse fato reforça a necessidade de uma combinação equilibrada de fibras recicladas e virgens para garantir a viabilidade técnica e econômica da indústria de papel e celulose.

O impacto negativo na resistência do papel reciclado é uma consequência da degradação das fibras ao longo do ciclo de vida. Pesquisas indicam que as fibras recicladas perdem suas propriedades mecânicas a cada novo ciclo de reciclagem, o que pode comprometer a qualidade do produto (COPPOLA et al., 2020). No entanto, embora a resistência seja inferior, a redução do impacto ambiental é um ponto positivo considerável.

Impactos ambientais e industriais da celulose no processo de produção de papel

A celulose é a principal matéria-prima na fabricação do papel virgem, sendo obtida, majoritariamente, de florestas plantadas de eucalipto e pinus. Apesar de representar uma alternativa renovável à extração de florestas nativas, o cultivo e processamento da celulose apresentam impactos ambientais e industriais significativos.

Do ponto de vista produtivo, a extração da celulose demanda o uso intensivo de água, energia e insumos químicos, especialmente durante o processo Kraft, em que a madeira é cozida com hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) para separar a lignina da celulose. Esse processo libera compostos organossulfurados que contribuem para a poluição atmosférica, além de gerar grandes volumes de efluentes líquidos com alta carga orgânica e alcalina, exigindo estações de tratamento robustas (Souza, 2025; Embrapa, 2024). Adicionalmente, a monocultura de eucalipto, principal fonte de celulose no Brasil, está associada a alterações no equilíbrio ecológico, como a redução da biodiversidade local, acidificação do solo e esgotamento dos recursos hídricos subterrâneos, sobretudo em regiões de clima seco e solos arenosos (Gouveia,

2010; Maia, 2024). Outro fator de preocupação é a emissão de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da queima de combustíveis fósseis no transporte da madeira e no funcionamento de caldeiras industriais, que pode ultrapassar 3 toneladas de CO₂ por tonelada de papel produzido (Santos, 2023).

No entanto, com a crescente pressão ambiental, muitas indústrias têm adotado práticas de manejo florestal sustentável certificadas por selos como FSC e PEFC, investindo também em tecnologias para reaproveitamento de resíduos como a lignina e a cinza da biomassa. Ainda assim, os impactos associados à produção da celulose permanecem relevantes, especialmente quando comparados às alternativas baseadas na reciclagem de papel, que dispensam etapas químicas intensivas e o uso de celulose virgem (EMBRAPA, 2022).

O impacto ambiental e social na reciclagem do papel

A reciclagem de papel, quando implementada de forma estruturada, eficiente e integrada a políticas públicas e estratégias empresariais sustentáveis, representa uma das alternativas mais viáveis para a redução dos impactos ambientais da indústria de papel e celulose. Trata-se de uma prática que promove não apenas a economia de recursos naturais, mas também a redução de resíduos, a diminuição de emissões de gases de efeito estufa e o fortalecimento da economia circular. Esta indústria é uma das maiores consumidoras de recursos naturais do setor industrial, especialmente água, energia e matéria-prima florestal. Nesse contexto, a reciclagem de papel tem se consolidado como uma estratégia essencial para a redução de impactos ambientais e sociais, promovendo a transição para uma economia mais circular, resiliente e de baixo carbono (VEOLIA, 2022).

Segundo a Embrapa (2022), o uso de fibras recicladas pode reduzir em até 60% o consumo de energia elétrica e em 70% o uso de água, se comparado à produção de papel a partir de celulose virgem. Além disso, de acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2021), a produção de papel reciclado emite até 74% menos gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), em comparação à produção convencional. Isso ocorre devido à menor demanda energética, à não queima de biomassa e à redução no transporte de matéria-prima florestal.

Esta substituição evita o desmatamento e a degradação ambiental, contribuindo para o sequestro de carbono pelas florestas. Estima-se que cada tonelada de papel reciclado evita o corte de aproximadamente 17 árvores adultas (BRACELPA, 2009) e reduz a emissão de cerca de 1,5 tonelada de CO₂ equivalente (FERREIRA et al., 2017).

Ao retornar ao ciclo produtivo, o papel reciclado evita que toneladas de resíduos sejam encaminhadas a aterros sanitários ou lixões, prolongando sua vida útil e reduzindo os riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas. A reciclagem também minimiza a produção de efluentes líquidos e a necessidade de uso de produtos químicos agressivos, comumente utilizados no branqueamento do papel virgem (CETESB, 2013).

Do ponto de vista social, a reciclagem de papel se configura como uma atividade que gera empregos, promove a inclusão social e fortalece economias locais. A base dessa cadeia produtiva, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, está sustentada por cooperativas e associações de catadores, que atuam na triagem, separação e comercialização do papel pós-consumo. De acordo com Lima e Rocha (2019), essas organizações são fundamentais para o funcionamento da cadeia de reciclagem, promovendo a dignidade e a valorização de trabalhadores em situação de vulnerabilidade. Dados da Associação Brasileira de Reciclagem de Papel (ABTCP, 2021) apontam que o setor gerou mais de 200 mil empregos diretos e indiretos no país, contribuindo significativamente para a economia circular e a inclusão

produtiva. A presença dessas cooperativas também reduz os custos de coleta pública de resíduos e incentiva práticas de educação ambiental e responsabilidade social corporativa. Quando inserida em uma política integrada de resíduos sólidos, a reciclagem se torna um pilar central para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 12 (consumo e produção responsáveis) e 13 (ação contra a mudança global do clima).

Ensaio físico-mecânico dos papéis componentes do papelão ondulado

De acordo com Campos (2004), diversos ensaios podem ser realizados nos papéis que compõem as chapas de papelão ondulado, tanto no momento do recebimento da matéria-prima quanto durante o processo produtivo. Esses testes asseguram o desempenho estrutural e funcional das embalagens. A Associação Brasileira do Papelão Ondulado (ABPO, 2012) destaca os principais:

- a) **Gramatura:** determina a massa por unidade de área do papel (g/m^2). Trata-se de uma das propriedades básicas para o controle de qualidade do material, pois influencia diretamente na resistência e no custo do produto.
- b) **Ring Crush Test (RCT):** avalia a resistência à compressão do papel em formato de anel. Esse ensaio é especialmente importante para os papéis de capa e de miolo, sendo considerado um indicador antecipado da resistência à compressão vertical (ECT) das chapas e das embalagens como um todo.
- c) **Concora Medium Test (CMT):** mede a resistência ao esmagamento do papel ondulado utilizado no miolo. Esse teste simula as condições reais de uso do papel na formação da onda, sendo crucial para avaliar a integridade da estrutura ondulada.
- d) **Espessura (Caliper):** verifica a espessura do papel ou da chapa de papelão. A uniformidade dessa propriedade é essencial para a estabilidade dimensional e para o desempenho da embalagem durante o empilhamento.
- e) **Umidade:** mede o teor de água presente na amostra. A umidade influencia a resistência mecânica do papel e sua capacidade de colagem. Valores fora dos limites recomendados podem comprometer tanto o processo quanto o desempenho final do produto.
- f) **Método de Cobb:** determina a quantidade de água absorvida pela superfície do papel em um intervalo de tempo definido. Papéis com alta absorção tendem a apresentar baixo desempenho mecânico, enquanto níveis muito baixos podem dificultar a colagem entre as camadas da chapa.
- g) **Resistência ao Arrebatamento (Ensaio de Mullen):** quantifica a pressão necessária para romper uma amostra de papel, geralmente das camadas de capa. Esse teste fornece uma estimativa da resistência global do papel a esforços multidirecionais.

A aplicação sistemática desses ensaios permite o monitoramento da qualidade dos papéis utilizados e contribui para a otimização do desempenho das embalagens no transporte, armazenamento e uso.

Comparação entre os custos de produção

Além dos aspectos ambientais, a análise econômica dos processos de produção também é fundamental para avaliar a viabilidade de alternativas sustentáveis na indústria do papel. Os custos de produção do papel pardo virgem e do papel pardo reciclado diferem substancialmente, especialmente no que se refere à matéria-prima e ao consumo de energia e água.

A produção do papel virgem envolve custos elevados com a extração da madeira, transporte, uso intensivo de produtos químicos (como sulfato de sódio e hidróxido de sódio) e elevado consumo energético e hídrico. Segundo dados da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 2023), o custo médio de produção de uma tonelada de papel pardo virgem varia entre R\$ 2.900,00 e R\$ 3.500,00, considerando todos os insumos, mão de obra, manutenção de equipamentos e tratamento de resíduos industriais, sendo que esse valor pode ser ainda maior em fábricas que operam com menor eficiência energética ou logística menos otimizada, enquanto o processo de fabricação do papel reciclado se baseia no reaproveitamento de papel pós-consumo, o que reduz significativamente os custos com matéria-prima e extração de recursos naturais. A principal despesa concentra-se na triagem, desagregação das fibras e remoção de contaminantes (como tintas e adesivos). De acordo com dados do Instituto de Pesquisas Ambientais e Industriais Pulgão (2024), o custo médio da produção de 1 tonelada de papel pardo reciclado varia entre R\$ 1.700,00 e R\$ 2.200,00. Esse valor representa uma redução de aproximadamente 35% a 45% em relação ao papel virgem.

Comparação entre os trabalhos

A análise comparativa entre os processos de produção de papel pardo revela um cenário de *trade-off* entre a integridade estrutural da fibra virgem e a eficiência socioambiental do material reciclado. Do ponto de vista mecânico, a superioridade do papel virgem é maior, uma vez que a estrutura original das fibras de celulose é preservada durante o processo Kraft. Como demonstrado pelos ensaios de resistência à compressão (*Ring Crush Test* — RCT), há uma correlação direta entre o teor de fibra virgem e a capacidade de carga do material, atingindo picos de desempenho em composições superiores a 70% de fibra primária. Em contrapartida, a fibra reciclada sofre um enfraquecimento progressivo a cada ciclo de reutilização, o que limita sua aplicação em embalagens que exigem alto rigor estrutural.

As limitações técnicas do papel reciclado são amplamente compensadas por sua vantagem competitiva nos pilares ambiental e econômico. Enquanto a produção de papel virgem demanda o uso intensivo de recursos naturais e químicos agressivos, como o hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, que geram efluentes de alta carga orgânica e emissões atmosféricas significativas, a reciclagem opera sob os princípios da economia circular. A utilização de fibras reaproveitadas reduz o consumo de água em até 70% e a demanda de energia elétrica em 60%, além de mitigar as emissões de gases de efeito estufa em aproximadamente 74%. Socialmente, o setor de reciclagem no Brasil atua como um motor de inclusão, sustentando mais de 200 mil postos de trabalho por meio de cooperativas de catadores, conferindo ao material reciclado um valor agregado ético que o papel virgem, pautado na monocultura e em grandes plantas industriais, dificilmente alcança isoladamente.

Financeiramente, a reciclagem também se mostrou vantajosa. O custo médio de produção de uma tonelada de papel pardo reciclado, varia entre R\$ 1.700,00 e R\$ 2.200,00. Representa uma economia operacional de até 45% em relação ao papel virgem. Essa viabilidade econômica, aliada aos avanços em refinação enzimática e tecnologias de depuração, sugere que a lacuna de qualidade entre os materiais tende a diminuir. A estratégia mais eficaz para a indústria brasileira não reside na exclusão de um processo pelo outro, mas sim no uso equilibrado de blends de fibras. Essa combinação permite usufruir da economia e sustentabilidade do reciclado sem comprometer a segurança técnica exigida pelo mercado de embalagens e logística.

CONCLUSÃO

Este estudo analisou comparativamente os processos de produção do papel pardo virgem e do papel pardo reciclado, considerando aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais. Os resultados confirmam que, embora a fibra virgem detenha a primazia em termos de resistência mecânica devido à preservação de sua integridade estrutural, o modelo de reciclagem consolida-se como a alternativa de menor pegada ecológica. Essa superioridade ambiental é evidenciada pela redução drástica no consumo de água em cerca de 70%, na demanda de energia elétrica entre 40% e 50%, e na emissão de gases de efeito estufa em aproximadamente 50%, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Apesar dos benefícios claros, o setor ainda enfrenta desafios estruturais, como a degradação progressiva das fibras pós-consumo, que perdem resistência a cada ciclo de reutilização, e a carência de incentivos fiscais e infraestrutura para coleta seletiva. A oscilação de preços no mercado de recicláveis e a ausência de metas regulatórias obrigatórias surgem como barreiras à consolidação dessa prática em larga escala. Nesse cenário, a atuação do engenheiro químico torna-se o elo estratégico para a otimização de sistemas, atuando tanto na pesquisa de novos aditivos e métodos de refinação enzimática quanto no desenvolvimento de soluções que permitam elevar o desempenho técnico do material reciclado com o menor impacto ambiental possível.

A principal contribuição acadêmica deste trabalho reside na sistematização de dados técnicos e econômicos que fundamentam a viabilidade do uso de *blends* de fibras para o setor de embalagens. Ao identificar que amostras com proporções equilibradas de fibra virgem mantêm a segurança estrutural necessária, o estudo oferece uma diretriz para que as indústrias reduzam seus custos de produção — que no papel reciclado são entre 35% e 45% menores — sem comprometer a qualidade final. Em termos de aplicações práticas, os resultados servem para otimizar processos industriais, fortalecer parcerias com cooperativas de catadores para garantir a qualidade da matéria-prima e subsidiar políticas públicas focadas em metas de baixo carbono e na Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A transição para um modelo papeleiro resiliente no Brasil depende de uma abordagem sistêmica que envolva a responsabilidade compartilhada entre governo, setor privado e consumidores. A integração entre inovação tecnológica e a valorização da base da cadeia produtiva representa o caminho promissor para alinhar a competitividade econômica às urgentes demandas de preservação ambiental. Conclui-se, portanto, que a adoção do papel reciclado, aliada ao uso estratégico de fibras virgens, é a solução mais viável para o futuro sustentável da indústria no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

ABPO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO PAPELÃO ONDULADO. **Manual Técnico do Papelão Ondulado**. São Paulo, 2012.

ABTCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Panorama industrial: custos e desempenho da produção de papel**. São Paulo: ABTCP, 2023.

AGÊNCIA SENADO. **Avança isenção de tributos na venda de reciclados**. 30 ago. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/noticias/materias/2023/08/30/avanca-isencao-de-tributos-na-venda-de-reciclados>. Acesso em: 8 abr. 2025.

AGÊNCIA SENADO. **Indústrias de recicláveis podem ter crédito e isenção das contribuições sociais.** 17 out. 2022. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/noticias/materias/2022/10/17/industrias-de-reciclaveis-podem-ter-credito-e-isencao-das-contribuicoes-sociais>. Acesso em: 8 abr. 2025.

ANAP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS APARISTAS DE PAPEL. **Panorama da reciclagem de papel no Brasil.** São Paulo, 2023.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Florestas plantadas: oportunidades e desafios da indústria brasileira de celulose e papel no caminho da sustentabilidade.** Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2012.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Sustentabilidade e inovação na indústria de papel e celulose.** São Paulo, 2009.

CALDAS, A. R. **Avaliação da pegada de carbono de paletes de madeira reutilizados.** 2021. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4039>. Acesso em: 23 abr. 2025.

CAMPOS, R. G. **Papel e Celulose: Propriedades e Aplicações Industriais.** São Paulo: Ed. Blucher, 2004.

CONGRESSO NACIONAL. **Projeto de Lei nº 4035, de 2021.** Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicameras/-/ver/pl-4035-2021>. Acesso em: 8 abr. 2025.

COPPOLA, F.; MODELLI, A. Oxidative degradation of non-recycled and recycled paper. **Cellulose**, v. 27, p. 8977–8987, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03395-0>. Acesso em: 23 abr. 2025.

COSTA, R. S.; ALMEIDA, F. M. Tecnologias de reciclagem e sustentabilidade na indústria de papel. **Revista Brasileira de Sustentabilidade**, v. 7, n. 3, p. 45–56, 2018.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação do papel.** 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. 2 v.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Reciclagem de papel: aspectos ambientais e econômicos.** Brasília: Embrapa, 2022.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sustentabilidade e meio ambiente: o papel da reciclagem na redução da pegada de carbono.** Brasília: Embrapa Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 23 abr. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sustentabilidade na indústria do papel: impactos e desafios.** Brasília: Embrapa, 2024.

FELIPE, J. C. **Análise energética na produção de papel.** São Paulo: Editora Técnica, 2024.

FERREIRA, A. C. et al. A reciclagem de papel como estratégia ambiental e econômica. *Revista Ciências Ambientais*, v. 13, n. 1, p. 25–38, 2017.

FOELKEL, C. **Atualidades tecnológicas na indústria de celulose e papel**. 2. ed. Porto Alegre: LCTE, 2007.

GOUVEIA, R. L. **Sustentabilidade e reciclagem de materiais: práticas e impactos ambientais**. Rio de Janeiro: Ecotexto, 2010.

IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa na indústria brasileira**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://iema.org.br>. Acesso em: 23 abr. 2025.

LIMA, M. R.; ROCHA, L. T. Cooperativas de catadores e inclusão social: uma análise da cadeia de reciclagem de papel. *Revista de Políticas Públicas Sociais*, v. 5, n. 2, p. 59–72, 2019.

MAIA, J. P. **O impacto ambiental da indústria de papel e celulose**. Rio de Janeiro: Brasil Ed., 2024.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto nº 11.044, de 8 de junho de 2022**. Institui o sistema de logística reversa de embalagens de papel e papelão. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jun. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/participamaisbrasil/decreto-embalagens-de-papel-e-papelao>. Acesso em: 8 abr. 2025.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2010/L12305.htm. Acesso em: 8 abr. 2025.

PULGÃO, Instituto de Pesquisas Ambientais e Industriais. **Eficiência energética e econômica na produção de papel reciclado**. Belo Horizonte: Pulgão, 2024.

ROWELL, R. M. et al. Cellulose nanocomposites. In: HON, D. N.-S.; SHIRAISHI, N. (ed.). **Wood and Cellulosic Chemistry**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2005. p. 673–712.

SANTOS, V. T.; OLIVEIRA, R. A. Propriedades físicas e mecânicas do papel reciclado em comparação ao papel virgem. *Revista Brasileira de Engenharia Industrial*, v. 12, n. 1, p. 33–42, 2020.

SANTOS, R. T.; OLIVEIRA, L. B. Propriedades mecânicas do papel reciclado e virgem: uma análise comparativa. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 7, n. 2, p. 45–53, 2020.

SÉKULA, M. C. Reutilização de fibras celulósicas e seus efeitos nas propriedades do papel. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 23, n. 4, p. 65–71, 2011.

SENADO FEDERAL. **PL 3701/2023.** Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/158897>. Acesso em: 8 abr. 2025.

SILVA, T. R. da; MOURA, L. F.; COSTA, M. A. Influência das fibras recicladas nas propriedades de resistência do papel. **Revista de Ciência e Engenharia de Materiais**, v. 11, n. 2, p. 17–25, 2015.

SIQUEIRA, G.; PASQUINI, D.; GROSSO, C. R. F. Celulose: estrutura e aplicações. **Polímeros**, v. 20, n. 1, p. 51–56, 2010.

Recebido em: 09/07/2025

Publicado em: 23/06/2026