UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS JOSÉ VAZ DE CAMARGO

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE PAPEL *TISSUE* NUMA UNIDADE INDUSTRIAL BRASILEIRA: IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA GERAÇÃO DE RESÍDUOS CELULÓSICOS E OPORTUNIDADES

CURITIBA

2024

LUCAS JOSÉ VAZ DE CAMARGO

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE PAPEL *TISSUE* NUMA UNIDADE INDUSTRIAL BRASILEIRA: IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA GERAÇÃO DE RESÍDUOS CELULÓSICOS E OPORTUNIDADES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná; como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Manufatura.

CURITIBA
2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Camargo, Lucas José Vaz de
Análise da produção de papel tissue numa unidade industrial brasileira: impacto ambiental causado pela geração de resíduos celulósicos e oportunidades / Lucas José Vaz de Camargo. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Harrisson Lourenço Corrêa

1. Celulose. 2. Papel – Indústria. 3. Papel tissue. 4. Engenharia de produção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Corrêa, Harrisson Lourenço. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS JOSÉ VAZ DE CAMARGO** intitulada: **ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE PAPEL TISSUE NUMA UNIDADE INDUSTRIAL BRASILEIRA: IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELA GERAÇÃO DE RESÍDUOS CELULÓSICOS E OPORTUNIDADES**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 03 de Outubro de 2024.

Assinatura Eletrônica
04/10/2024 16:28:42.0
HARRISON LOURENÇO CORRÊA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
26/12/2024 12:00:35.0
FERNANDO ALTINO MEDEIROS RODRIGUES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica
04/10/2024 17:04:53.0
GIOVANA DE FATIMA MENEGOTTO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de, em um primeiro momento, agradecer a Deus, por me dar a oportunidade de conseguir desenvolver esse desafio.

À minha esposa Luana, que me apoiou e estimulou, dando a coragem e motivação para que eu não desistisse nos momentos difíceis.

Aos meus pais Mauro e Vânia, pelos valores e ensinamentos que me levaram a sempre buscar dar o melhor de mim em todos os momentos, além de sempre buscar melhorar cada vez mais.

Ao Professor Doutor Harrison Lourenço Corrêa, por suas orientações, apoio e dedicação para com o desenvolvimento do meu trabalho e dos meus conhecimentos.

A Professora Ana Furtado do IQ/UERJ pelo apoio com as análises realizadas nesse trabalho.

Ao colega Diogo Cardoso Rego pelo suporte e apoio durante o desenvolvimento do meu trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura pelo apoio demonstrado desde o início do curso de mestrado.

RESUMO

O desenvolvimento e otimização de conceitos relacionados à melhoria contínua de processos atrelados à diminuição do impacto ambiental têm se tornado um dos pilares para o setor industrial. O ramo de papel e celulose, em que a matéria prima provém de reflorestamentos de madeiras de pinus e eucalipto, tem a necessidade de buscar inovações voltadas para a otimização dos recursos e processos. Isso ocorre devido ao valor da matéria prima, que é uma commodity e ao impacto ambiental que a sua extração e o processo fabril podem causar. Desse modo, o objetivo deste trabalho é identificar resíduos e a sua composição em uma empresa de produção de papel *tissue*, que é o papel produzido com baixa gramatura a partir de matéria prima celulósica, derivada de celulose de eucalipto (fibra curta) ou material reciclado (aparas). Para isso, foi realizado um mapeamento macro do processo de fabricação, considerando toda a planta e equipamentos que fornecem itens necessários à produção, como vapor, ar e água. Também foi realizado o mapeamento de forma micro da produção, focando na área das máquinas de papel, desde a preparação da massa que será utilizada no processo até a saída da bobina na máquina de papel. Com isso, realizou-se o balanço de massas das entradas e saídas das máquinas de papel *tissue*, de modo a identificar o percentual de perda da matéria prima do processo. Também foram descritos os três principais resíduos de matéria prima provenientes do processo, sendo o material presente nas partes inferiores das máquinas de papel (abaixo das seções Tela e Feltro), da superfície de equipamentos próximos às máquinas papeleiras e do rejeito final das máquinas de papel, centrifugado no tratamento de água. O material celulósico analisado foi o material presente na superfície de equipamentos, que provém principalmente do processo de crepagem do papel. Para sua caracterização, foram feitas análises de TGA (análise termogravimétrica), FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e MEV (microscopia eletrônica de varredura). Essas investigações serviram para que fosse possível identificar aplicações desse material, dentro da indústria *tissue* ou em outros ramos industriais, apoiando estudos incentivados pela SEPAC Serrados e Pasta de Celulose.

Palavras-chave: Papel e celulose, fabricação de papel, papel *tissue*, análises, engenharia de processos.

ABSTRACT

The development and optimization of concepts related to the continuous improvement of processes linked to the reduction of environmental impact have become one of the pillars for the industrial sector. The pulp and paper industry, in which the raw material comes from reforestation of pine and eucalyptus wood, needs to seek innovations aimed at optimizing resources and processes. This is due to the value of the raw material, which is a commodity, and the environmental impact that its extraction and manufacturing process can cause. Thus, the objective of this work is to identify waste and its composition in a tissue paper production company, which is paper produced with low grammage from cellulose raw material, derived from eucalyptus pulp (short fiber) or recycled material (shavings). To this end, a macro mapping of the manufacturing process was carried out, considering the entire plant and equipment that supply items necessary for production, such as steam, air and water. Micro-mapping of production was also carried out, focusing on the paper machine area, from the preparation of the pulp that will be used in the process to the exit of the reel from the paper machine. With this, a mass balance was performed at the inputs and outputs of the tissue paper machines, in order to identify the percentage of loss of raw material in the process. The three main raw material residues from the process were also described, namely the material present in the lower parts of the paper machines (below the Screen and Felt sections), the surface of equipment close to the paper machines and the final reject from the paper machines, centrifuged in the water treatment. The cellulosic material analyzed was the material present on the surface of equipment, which comes mainly from the paper creping process. To characterize it, TGA (thermogravimetric analysis), FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) and SEM (scanning electron microscopy) analyses were performed. These investigations helped identify applications for this material in the tissue industry and beyond, supporting SEPAC Company-funded studies.

Keywords: Pulp and paper, paper manufacturing, tissue paper, analysis, process engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 representando a estrutura linear da celulose, onde as linhas pontilhadas mostram as localizações de possíveis ligações de hidrogênio. 16

Figura 02 representando a produção global de papel por segmento. 18

Figura 03 representando a produção do Brasil de papel por segmento e comparativo percentual relacionados aos anos de 2019 e 2020.....19

Figura 04 Consumo de matéria prima na produção de papel na Europa entre 1991 e 2020. 22

Figura 05 processo de refino da fibra. 28

Figura 06 mudanças que ocorrem na fibra durante o processo de refino.....29

Figura 07 máquina de papel tissue.....30

Figura 08 representando o processo de crepagem do papel. 31

Figura 09 esquema básico para análise do balanço de massas. 33

Figura 10 esquema do balanço de massas de uma indústria tissue. 35

Figura 11 representando a análise FTIR realizada na Fibra de Grewia ferruginea. 39

Figura 12 Fluxo produtivo para fabricação de papel tissue, sendo representada as entradas do processo, o processo produtivo principal, processos secundários e as saídas.....42

Figura 13 seção da produção *de Papel Tissue selecionada para realização do balanço de massas.* 43

Figura 14 representado a amostra 01 coletada após seu desprendimento das seções Tela e Feltro.....44

Figura 15 representado a amostra 02 coletada da superfície de estruturas e equipamentos próximos às máquinas de papel. 45

Figura 16 Representado a amostra 03 dos rejeitos provenientes das centrífugas.....46

Figura 17 representando as informações coletadas pela análise TGA.....50

Figura 18 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 20ºC e 150ºC.....51

Figura 19 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 151ºC e 255ºC.....52

Figura 20 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 256ºC e 400ºC.....53
Figura 21 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 401ºC e 710 ºC.....54
Figura 22 representando os dados obtidos através da análise FTIR.....55
Figura 23 representando os resultados obtidos através das análises MEV, com aproximação x500 (a), x1000 (b), x2500 (c) e x5000 (d). 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 representando o ranking dos maiores produtores de celulose do mundo. 16
Tabela 02 representando os maiores produtores de papel do mundo.....17
Tabela 03 representando os principais testes realizados para classificação do papel tissue durante sua produção. 23
Tabela 04 principais fontes de poeira e fiapos de papel no processo tissue. 26
Tabela 05 representando as informações contidas na figura 08. 31
Tabela 06 dados das entradas dos processos em análise. 48
Tabela 07 dados das saídas dos processos em análise. 48
Tabela 08 Estimativa de massa de papel e percentual de perdas. 49

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 estimativa da massa esperada no processo produtivo. 49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1 Justificativa 15

1.2 Objetivo geral 20

1.2.1 Objetivos específicos 20

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 Sustentabilidade e a indústria. 21

2.2 Processo *tissue* e formação de resíduos 22

2.3 Processo de refinação do papel *tissue* 27

2.4 Processamento na máquina de papel *tissue*. 29

2.5 Balanço de massas 33

2.6 Testes de identificação dos resíduos do processo. 35

2.6.1 *TGA* – Análise termogravimétrica para materiais celulósicos: ...37

2.6.2 *FTIR* - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier. 38

2.6.3 *Microscopia eletrônica* de varredura (MEV): aplicação em materiais celulósicos. 40

3. MATERIAIS E MÉTODOS 41

3.1 Materiais 43

3.1.1 Coleta de amostras: 43

3.2 Metodologia de pesquisa 46

3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV). 46

3.2.2 Análise termogravimétrica (TGA). 46

3.2.3 Espectroscopia na região de infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR). 47

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 47

4.1 Resultados das perdas na produção: 47

4.2 Resultados das análises:.....49
4.2.1 Resultados TGA:.....49
4.2.2 Resultados de FTIR: 54
4.2.3 Resultados MEV: 55
5. CONCLUSÕES.....57
6. ATIVIDADES FUTURAS.....60
7. PUBLICAÇÃO.....60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....60

1. INTRODUÇÃO

A manufatura do papel *tissue* tem como características a formação de um produto macio e volumoso, que por conta da capacidade hidrofílica ligada às fibras de celulose, proporcionam a produção de um papel com boa capacidade de absorção de líquidos (Perng, Teng, & Chang, 2021), uma das suas principais atribuições perante sua aplicação em processos de limpeza e finalidades higiênicas (Olejnik, Bloch, & Pelczynski, (2019). O papel tissue consiste de uma mistura de polpa de fibras, com características próprias que, quando processadas, determinam a estrutura do papel e suas propriedades (Ismail *et al*, 2020).

Com relação à escolha durante a compra do produto por parte do consumidor, Reitbauer *et al* (2023) destacam propriedades como a absorção de água, espessura, gramatura e maciez como de grande relevância na hora da escolha, sendo que estes fatores estão correlacionados com o preço do produto final por necessitarem de maior otimização de parâmetros produtivos.

As características finais do papel são definidas pela mistura das fibras utilizadas como matéria prima e pelos parâmetros utilizados no processo produtivo, onde para cada tipo de produto esperado, se faz necessárias modificações, resultando assim no papel higiênico, papel toalha, guardanapos, entre outros (Ismail *et al*, 2020).

Com relação à matéria prima, nas etapas iniciais do processo, podem ser utilizados materiais provenientes da fibra virgem da celulose ou então de papéis recicláveis, sendo que há diferentes etapas na preparação da massa para cada uma dessas fontes primárias. Para a formação da folha que utiliza a fibra virgem, o processamento inicial é simplificado com relação ao material reciclável que exige uma planta de produção de massa dedicada (Assis *et al*, 2018). Além das fibras, provenientes da madeira, outros recursos naturais são intensamente utilizados na fabricação do papel, como água e produtos químicos para uniformização e tratamentos da massa de papel durante a fase líquida (Avşar & Demirer, 2008).

Em ambos, há o processamento inicial de refino através da compressão das fibras por estatores e aplicação de forças de cisalhamento. Entre as mudanças nas propriedades do material nesta etapa, destacam-se os processos de fibrilação e geração de finos. O percentual de formação de finos, um dos responsáveis pelo

surgimento da poeira e fiapos de papel, varia de acordo com a maneira que o tratamento mecânico é executado (Debnath *et al*, 2021).

As propriedades finais dos produtos dessa indústria são muito dependentes dos métodos de manufatura provenientes das máquinas de papel *tissue*, onde ocorre a formação da folha, secagem e o crepe do papel. O processo de formação do crepe tem influência direta sobre o volume e absorção do papel, uma vez que causa o enfraquecimento e até mesmo o rompimento das fibras, infringindo um efeito de flambagem, distorção e quebra da sua estrutura. Também ocorre o surgimento de micro dobras, que acabam sendo empilhadas, criando o aspecto de maciez (Assis *et al*, 2018).

Durante o processo de formação do crepe, por conta da quebra das fibras, há o surgimento de poeira e fiapos de papel. Segundo Frazier e co-autores (2022), esses resíduos podem ficar em suspensão e até mesmo se acumular sobre estruturas e equipamentos do ambiente fabril, podendo causar problemas relacionados à segurança, custo e qualidade, tendo assim a necessidade de ser controlada.

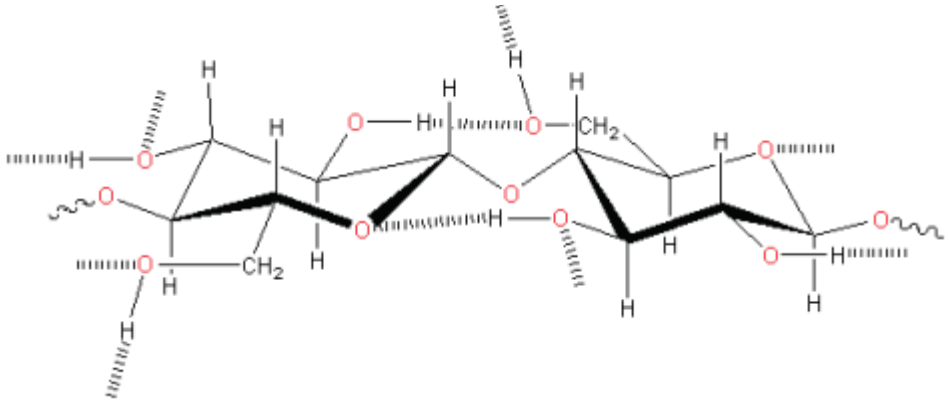
A formação da poeira e fiapos de papel, materiais que podem conter componentes inorgânicos provenientes do processo, tem ligação direta a uma série de fatores do setor produtivo, sendo que as fábricas de papel *tissue* tem uma grande exposição a esses resíduos. Como descrito por Andersson *et al* (2019), a sua concentração pode chegar a até 10 mg/m³.

Segundo Lodenius e co-autores (2009), o aproveitamento destes resíduos pode ser para redução do consumo de materiais virgens, utilizados em outros processos conforme previsto por Zhang e co-autores (2020) ou reaproveitados na geração energética na própria planta de papel (Ouadi *et al*, 2019).

1.1 Justificativa

A celulose é o biopolímero mais abundante no mundo, com sua estrutura molecular ($C_6H_{10}O_5$), pode ser encontrada nas mais diversas formas de vida, como plantas, fungos, protozoários e procariontes. Trata-se da principal constituinte da parede celular de plantas, onde contém impurezas como lignina, pectina e hemiceluloses. Donini *et al.*, (2010) apresentou em seu trabalho a estrutura linear da celulose, destacada na figura 01 abaixo.

Figura 01 representando a estrutura linear da celulose, onde as linhas pontilhadas mostram as localizações de possíveis ligações de hidrogênio.



Fonte: (Donini *et al.*, 2010)

Paulino (2022) destaca em seu trabalho a relevância do país dentro do cenário mundial na produção de celulose, onde o Brasil se apresenta em primeiro lugar no ranking dos maiores produtores e exportadores de celulose no mundo, seguido do Canadá e Estados Unidos, considerando dados do ano de 2021, como informado na tabela 01 abaixo.

Tabela 01 representando o ranking dos maiores produtores de celulose do mundo.

País	**Produção (em 10^6 toneladas)**	**% de produção para exportação mundial**
Brasil	15,60	22,8%
Canadá	9,00	13,2%
Estados Unidos	7,80	11,5%
Indonésia	5,40	7,9%

Fonte: Paulino (2022)

Porém, quando se refere a produção de papel, o Brasil se encontra na 8ª colocação perante o cenário mundial, onde os Estados Unidos e a China juntos

correspondem a 46% da produção mundial, conforme dados da IBA (Indústria Brasileira de Árvores), em pesquisa realizada com informações referentes ao ano de 2020. A tabela 02 apresentada abaixo representa os maiores produtos de papel do mundo.

Tabela 02 representando os maiores produtores de papel do mundo.

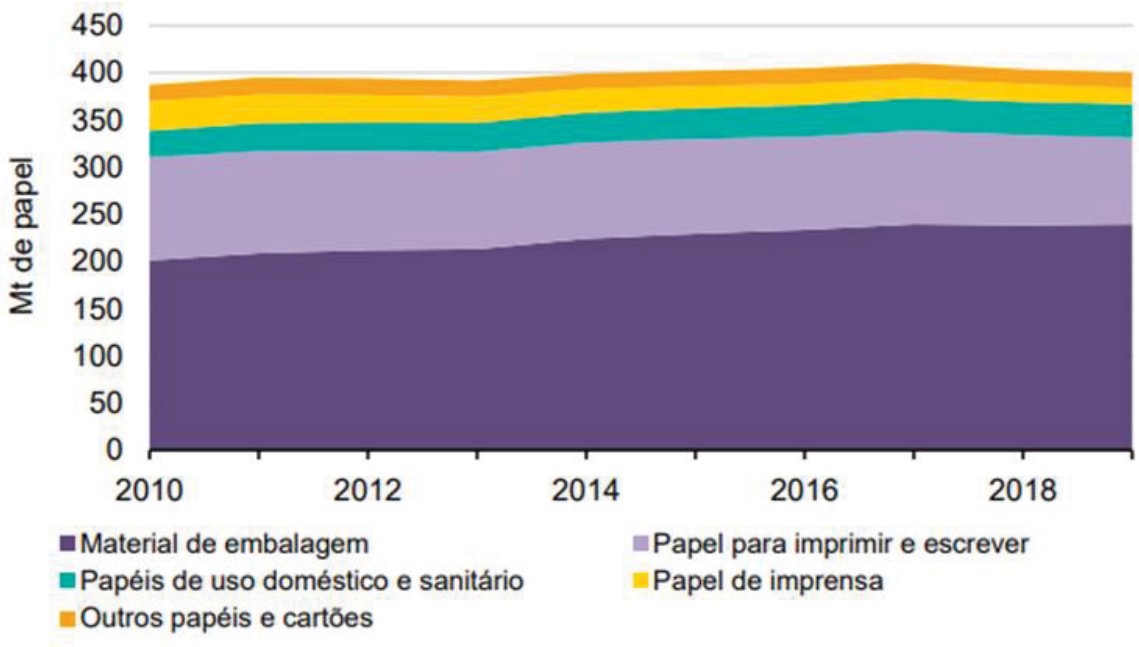
País	**Produção (10^6 toneladas)**	**% da produção mundial**
China	117,2	29,2%
Estados Unidos	66,2	16,5%
Japão	22,7	5,7%
Alemanha	21,3	5,3%
Índia	17,3	4,3%
Coréia do Sul	12,0	3,0%
Indonésia	12,0	3,0%
Brasil	10,2	2,5%
Rússia	9,5	2,4%
Suécia	9,3	2,3%

Fonte: IBA (2021).

Segundo IBA (2021), a produção de papel e papelão mundial sofreu um aumento de 6% desde 2010, sendo uma tendência que pode estar relacionada com o aumento da população global e do padrão de vida, onde os papéis para fins sanitários tiveram um aumento de 27% e material para empacotamento 23% para esse período. Já os papéis para escrever e imprimir tiveram uma queda de 16%, sendo um possível

efeito do avanço da era digital. A figura 02 abaixo representa o avanço da produção anual por tipo de papel considerando o cenário global.

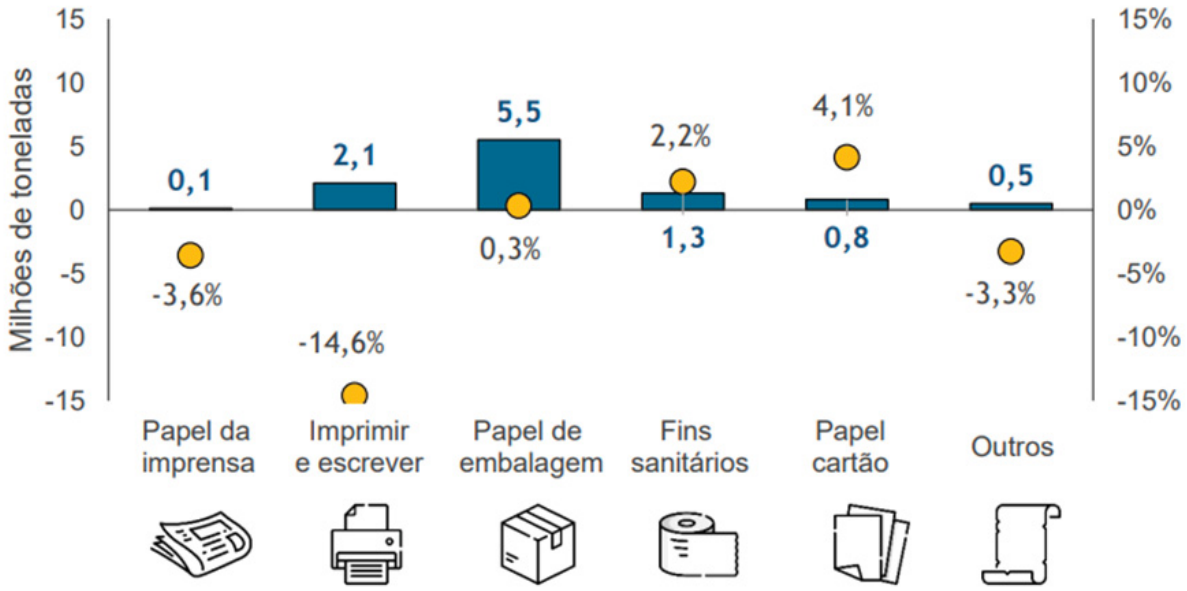
Figura 02 representando a produção global de papel por segmento.



Fonte: IBA (2021).

Considerando o cenário internacional, o Brasil é o 5º país do mundo em termos de capacidade de produção de papel *tissue*, onde a China e os Estados Unidos juntos representam 44% dessa produção. Considerando todos os tipos de papel produzidos em nosso país, o papel *tissue* ainda tem pouca representatividade quando comparado ao papel de embalagem. Porém, o crescimento médio anual do consumo se manteve em uma média de 3,2%, conforme descrito por Souza; Bastos (2018). A figura 03 representa a produção por segmento de papel no Brasil, considerando a diferença percentual entre os anos de 2019 e 2020, segundo relatório da IBA (2021).

Figura 03 representando a produção do Brasil de papel por segmento e comparativo percentual relacionados aos anos de 2019 e 2020.



Fonte: IBA (2021).

Segundo Giuntini e colaboradores (2022), o papel *tissue* é um dos principais em termos de utilização ao redor do mundo, tendo um consumo médio anual que atinge 55 kg por pessoa. Estimativas apontam que o mercado global desse tipo de papel pode sofrer com uma taxa de crescimento médio anual de produção de cerca de 6,45% entre os anos de 2021 e 2026. Além disso, a indústria *tissue* foi um dos setores impulsionados pelo aumento dos cuidados relacionados à pandemia Covid-19.

Paulino (2022) destaca que o crescimento do consumo do papel para fins sanitários no Brasil ocorre de maneira diferente quando comparado a outros segmentos, onde por exemplo, o consumo de papel para embalagens teve um aumento significativo devido ao aumento das demandas por entregas de produtos e maior globalização. Já o marketing relacionado ao segmento dos papeis para fins recicláveis foca em aumentar o consumo de papel por habitante e inovação em produtos que estimulem a compra de produtos.

Devido ao crescente aumento da concorrência nos mercados de produtos *tissue*, os fabricantes estão cada vez mais preocupados em criar marcas de alto desempenho e otimização da indústria como um todo com a finalidade de buscar vantagens competitivas. Sendo esse um setor com base florestal, sempre está sujeito a uma série de ameaças e desafios. Devido a esse aumento da concorrência, há a necessidade de indústrias baseadas em inovação e uso eficiente de todos os recursos utilizados no processo produtivo (Castro; Westerlund; Forssell, 2009).

Conforme citado por Dong *et al*, (2021), quando se tratam dos resíduos finais nas cadeias de consumo do papel tissue, novas abordagens têm sido pesquisadas e testadas com a finalidade de realizar a gestão adequada dos resíduos de papel com novas biotécnicas. Além disso, Dong *et al* (2021) relatam que resíduos de papel podem ser usados como matéria prima para produção de biocombustíveis, ácidos orgânicos e lipídios pela bioconversão devido à sua alta abundância de celulose.

Mesmo com o desenvolvimento de métodos de reutilização dos resíduos finais, ainda há poucas bibliografias referentes ao reaproveitamento de resíduos industriais da indústria *tissue*. O intuito desta pesquisa é levantar informações sobre a constituição e possíveis aplicações de materiais celulósicos presentes no processo de produção *tissue*, em especial os finos gerados na etapa de crepagem os quais, inclusive, podem representar riscos de explosão.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver um estudo junto à indústria de papel *tissue* com a finalidade de avaliar e quantificar resíduos do processo produtivo, com foco nas máquinas papeleiras (unidade de crepagem).

1.2.1 Objetivos específicos

- Elaborar um esquema representativo da planta de produção de papel *tissue,* com base em diagramas de blocos e fluxogramas de processos;
- Explanar sobre as principais etapas do processo produtivo *tissue* que causam o surgimento de resíduos de papel;
- Quantificar, através do balanço de massas, o quanto do material que entra para o processamento na máquina de papel se torna resíduo do processo;

- Coletar amostras de resíduos provenientes da produção de papel nas máquinas papeleiras.
- Realizar as análises TGA, FTIR e MEV da amostra 02, contendo resíduos de poeira de papel presentes nas máquinas papeleiras;
- Apontar possíveis maneiras de reduzir e/ou reaproveitar esses resíduos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade e a indústria.

O desenvolvimento sustentável endereça o atendimento das necessidades da geração atual sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Para que isso seja possível, a Organização das Nações Unidas (ONU) monitora os impactos através de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, compreendido por 169 metas em 248 indicadores (Nações Unidas, 2015).

Os principais métodos para o gerenciamento da sustentabilidade são baseados na redução de substâncias perigosas, redução da geração de resíduos, aumento da eficiência energética, aumento da eficiência logística e de custos, produtos projetados para reciclagem e utilização de materiais degradáveis. Em termos gerais, a quantificação da energia e do fluxo de materiais nos processos envolvidos deve ser gerenciada para o atingimento dos níveis estabelecidos pela ONU até 2030 (Rego & Corrêa, 2022).

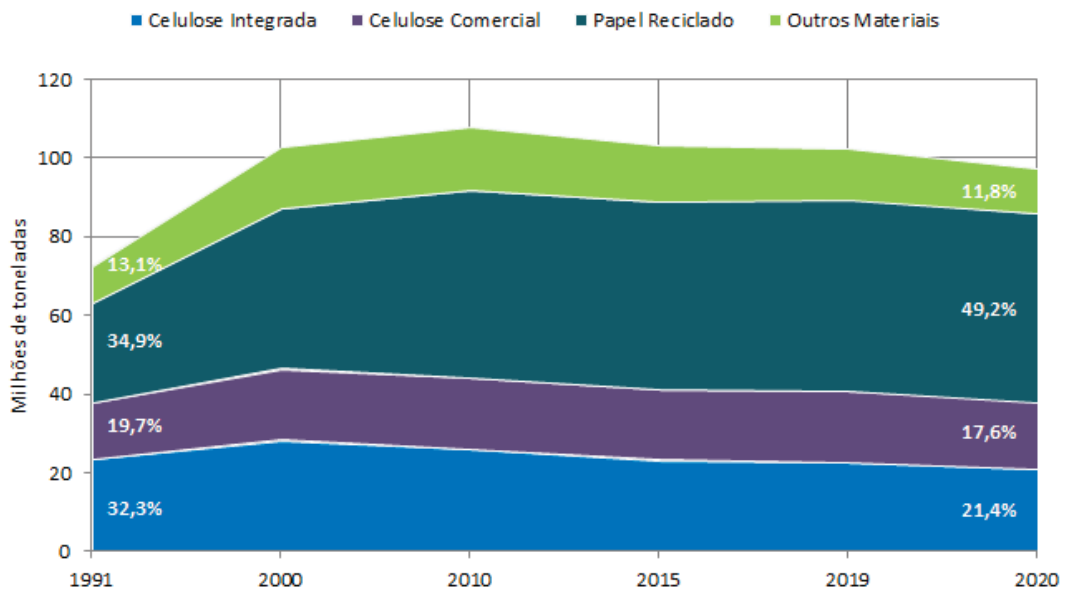
A reciclagem contribui em monta relevante neste processo, considerando que as fibras podem ser recicladas diversas vezes (Corcelli *et al*, 2018). Observa-se que a produção de polpa de material virgem cresceu entre 1993 e 2020 a uma taxa média anual de 0,56% ao ano, enquanto a produção de papel reciclado para o mesmo período cresceu 3,27% ao ano devido à evolução no processo de reciclagem permitindo que aproximadamente 50% das fibras disponíveis sejam provenientes de reciclagem (*Food and Agriculture Organization*, 2020).

Para a produção de papéis utilizando fibras recicladas, alguns fatores devem ser considerados, como a necessidade de controle rigoroso na coleta seletiva, no processo de triagem e durante a fabricação, a necessidade de retirada de componentes químicos que podem impactar no produto final (Suhr *et al*, 2015).

Apesar de o papel ter um apelo sustentável, as empresas devem estar atentas para todos os aspectos da cadeia para que possam contribuir com os pilares da

sustentabilidade, proteção ambiental, inclusão social e o crescimento econômico. O consumo de matérias primas, mostrado na figura 04, demonstra a evolução das classes de materiais da indústria de papel que vem ampliando a utilização do papel reciclado com relação aos materiais virgens de acordo com dados da *Confederation of European Paper Industries* [CEPI] (2021).

Figura 04 Consumo de matéria prima na produção de papel na Europa entre 1991 e 2020.



Fonte: Adaptado de CEPI (2021).

A utilização de materiais sustentáveis e seu gerenciamento devem estar presentes nas agendas atuais para evitar escassez de recursos, tendo em vista que a demanda de papéis para uso doméstico, sanitário e embalagens é crescente e constante devido ao aumento da população e renda (FAO, 2020).

Para isso, uma das técnicas utilizadas é o balanço de massas como metodologia para o planejamento e controle do fluxo de materiais, possibilitando a identificação e monitoramento dos processos que geram impactos ambientais para propor soluções de reciclagem, recuperação ou reuso dos resíduos (Corcelli *et al*, 2018).

2.2 Processo *tissue* e formação de resíduos

O mercado de produção de papel tissue é um segmento em constante crescimento na indústria global de papel, sendo impactado diretamente pelo constante crescimento da sensibilização com relação a saúde e higiene. Esse segmento engloba a produção

de lenços faciais, guardanapos e papéis toalha, porém a produção do papel higiênico é o mais relevante do ramo de produção tissue. As características dos papéis e a qualidade do produto dependem diretamente das tecnologias das máquinas de papel e da matéria prima utilizada (Reitbauer *et al*, 2023).

As características como suavidade do papel e resistência estão ligadas diretamente, onde quanto maior a suavidade mais facilmente a folha de papel poderá sofrer rupturas, bem como quanto maior a resistência do papel maior a rugosidade, afetando o conforto percebido pelo cliente. Quando não se faz necessária a produção de um produto mais macio se faz necessário o ajuste da resistência apenas nos refinadores, caso contrário, um controle maior de todas as etapas de produção bem como utilização de aditivos químicos do processo se faz necessários (Chao-Ben Gwo *et al*, 2023).

A normatização brasileira relacionada às caracterizações de papel *tissue* é a ABNT NBR 15134 de 12/2020: Produtos de papel para fins sanitários – Métodos de ensaio, que traz os parâmetros básicos relacionados a fatores como gramatura e resistência, conforme a tabela 03 representada abaixo:

Tabela 03 representando os principais testes realizados para classificação do papel tissue durante sua produção.

Teste	**Unidade de medida**	**Procedimento de realização do teste:**	**Finalidade:**
Gramatura	g/m²	Realizada a pesagem do papel, cortado em dimensões pré-estabelecidas em um ambiente com temperatura e umidade controladas utilizando uma balança calibrada.	Resultado utilizado para controle operacional e do produto. O valor encontrado também é utilizado para calcular o índice de maciez do produto.

Resistência a tração a seco	N/m	Realizar o tracionamento do papel seco, cortado em dimensões pré-definidas, utilizando um dinamômetro em um ambiente com umidade e temperatura controladas.	Definir as medidas de tração do papel após a produção. O valor encontrado também é utilizado para calcular o índice de maciez do produto.
Resistência a tração a úmido	N/m	Realizar o tracionamento do papel úmido, cortado em dimensões pré definidas, utilizando um dinamômetro em um ambiente com umidade e temperatura controladas.	Definir as medidas de tração do papel após a produção considerando que o mesmo esteja úmido.
Índice de maciez	N.g/m	Resulta do cálculo da divisão da resistência à tração ponderada pela gramatura.	Utilizada para mensurar através de cálculo a maciez do papel.
Capacidade de absorção de água	g água / g de papel	Necessário imergir um cesto cilíndrico calibrado contendo determinada massa de papel e água deionizada. Retirar o cesto da água e pesar com o papel molhado em uma balança calibrada. Ao final, determinar a quantidade de água absorvida por diferença de massa em ambiente controlado.	Determinar quantitativamente a capacidade do papel em absorver água. Usado na classificação de papéis como papel toalha e guardanapo.

Tempo de absorção de água	s	Necessário imergir um cesto cilíndrico calibrado contendo determinada massa de papel e água deionizada. Acompanhar em um cronômetro calibrado o tempo para que a amostra fique completamente molhada.	Determinar uma medida direta quanto a capacidade do papel de absorver água. Usado na classificação de todos os tipos de papéis.
Pintas	mm²/m²	Inspeção realizada em uma determinada área de papel para verificar a presença e tamanho de sujidades.	Determinar quantitativamente a quantidade de sujidades em uma área amostral do papel produzido.
Furos	mm²/m²	Inspeção realizada em uma determinada área de papel para verificar a presença e tamanho de furos.	Determinar quantitativamente a quantidade de furos em uma área amostral do papel produzido.
Alvura	%	Medição da alvura (brancura) do papel com auxílio de instrumento ótico calibrado.	Medição de aspecto visual do papel produzido.

Fonte: ABNT NBR 15134 (2020).

O processo de produção do papel *tissue,* responsável por fornecer as características do papel acabado, deriva de uma série de etapas em que as características como tração e maciez do produto final são definidas. Tais processos se iniciam com a matéria prima, que pode ser a fibra virgem de celulose de eucalipto ou o papel branco reciclável. A matéria prima passa pela preparação de massa, onde ocorre a desagregação, refino e estocagem das fibras (Mendes *et al*, 2020).

Em seguida, esse material, com uma grande concentração de água, é bombeado até a máquina de papel, onde a folha de papel *tissue* é formada. Na sequência, passa pelo processo de secagem, sendo formadas então as bobinas de papel. Logo após

esse estágio, as bobinas são levadas para a conversão, onde são realizadas as conformações finais do produto, como a preparação dos rolos e embalagem, e então se iniciam os processos logísticos de entrega do produto (Wang *et al*, 2019).

Coutinho *et al* (2023) destacam em seu trabalho as etapas posteriores a produção na máquina de papel onde, após a conversão, ocorrerá a etapa de embalagem do produto, sendo divididos em embalagem dos rolos individuais, embalagens ou agrupamento em pacotes e paletização, onde por existir um portfólio variado de produtos as configurações das máquinas de conversão ocorrem de maneira manual. Já a embalagem do produto ocorre de forma automática.

A formação de resíduos como a poeira e fiapos de papel durante o processo de produção está relacionada à tendência para a liberação de particulados e finos não ligados ou com pouca adesão à folha durante o processo de fabricação ou no produto acabado da indústria *tissue*. Segundo Frazier e coautores (2022) uma série de processos pode resultar na produção desses resíduos. A tabela 04 apresenta as principais fontes emissoras de partículas em unidades de papel *tissue*.

Tabela 04 principais fontes de poeira e fiapos de papel no processo tissue**.**

Processo	**Causa**
Processamento das fibras	*Pulper* Termomecânico
	Conteúdo de finos
	Fibras
	Material Reciclável
	Conteúdo de cinzas
Integridade mecânica da folha	Densidade da folha
	União das fibras
	Resistência da folha
	Redução da umidade final da folha

Secagem	Processo de formação do crepe
	Acumulação no Cilindro *Yankee*
Operações de conversão	Cargas eletrostáticas
	Impressões na folha
	Processo de enrolar e rebobinar

Fonte: Adaptado de Frazier *et al* (2022).

Com a finalidade de analisar o processo de formação da folha do papel *tissue* na máquina, este trabalho pretende analisar o processo de refino, fonte de resíduos pela formação de finos que se desprendem da tela e do feltro na etapa de formação do papel e no processo de crepe, que propicia o surgimento de resíduos.

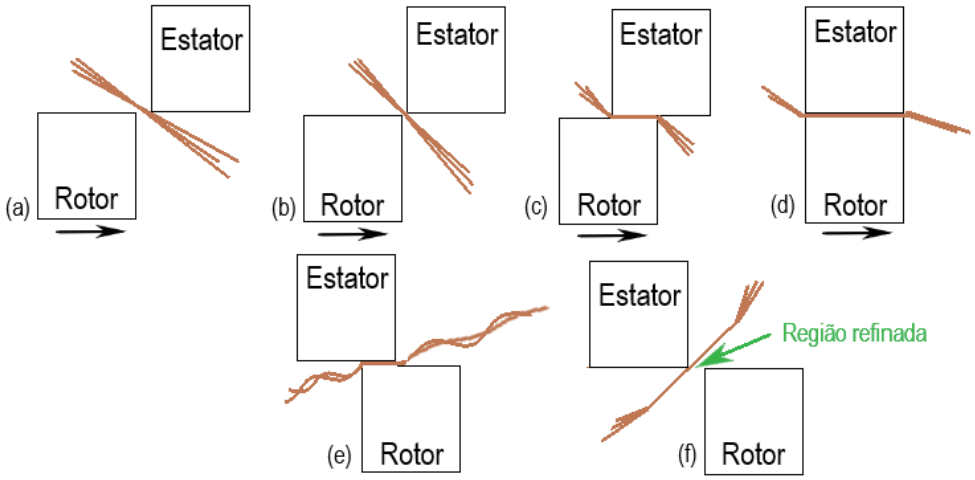
2.3 Processo de refinação do papel *tissue*

O processo produtivo de papel *tissue* é responsável por aplicar as características que são relevantes para o produto final, uma vez que tem influência direta sobre suas propriedades estruturais e funcionais. A fibra de celulose virgem, matéria prima desse estudo, sofre modificações durante a refinação que é responsável pela adição da resistência ao material, mas que podem resultar na perda de maciez e capacidade de absorção, que são essenciais para o produto (Morais *et al,* 2021).

Para esse estudo, será considerado o refinador de duplo disco, composto por um disco estator, que não se move durante o processo e o rotor, que realiza o movimento de rotação. A fibra será processada entre esses dois discos, de maneira a sofrer ação mecânica, conforme a figura 05 (Kumar Jain *et al*, 2021).

O grau de refino é medido através da classificação Grau Schopper Riegler, sendo uma informação relevante para o processo produtivo (Serra-Parareda *et al*, 2022).

Figura 05 processo de refino da fibra.



Fonte: Adaptado de Kumar Jain *et al*(2021).

A medição do Grau Schopper Riegler nas indústrias de papel, está relacionada a classificação do refino da massa, onde são avaliadas as capacidades das fibras de executarem a drenagem de água, sendo que quanto mais alto for o valor do Grau Schopper Riegler, menor será a capacidade de drenagem de água através da fibra, uma vez que por efeito mecânico do refino, as fibras terão menos espaçamentos por onde a água poderá escoar (Nader *et al*, 2022).

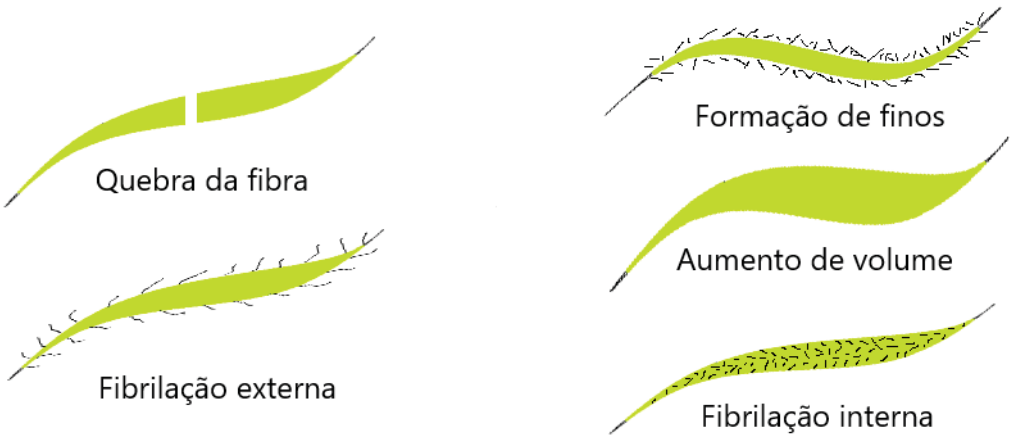
Banvillet *et al* (2023) destacam em seu artigo as diferenças encontradas no processo de refinação de acordo com as condições dos discos dos refinadores e o processo empregado, sendo que diferentes métodos resultaram em diversas diferenças de morfologia da fibra, propriedades ópticas e mecânicas. Além disso, o consumo de energia dos refinadores durante o processamento provoca diferenças na fibrilação, sendo que com o esse aumento o torque gerado sobre as fibras também sofre um aumento.

Diante do cenário de competitividade cada vez maior no segmento de produção de papel, Tanveer *et al* (2023) comentam que a utilização de enzimas na preparação de massa, nos processos de branqueamento, polpação e refinação, tem se mostrado viável tanto para fibras virgens quanto para papéis recicláveis, proporcionando uma

abordagem sustentável e ecológica, além de ter causa efeito sobre o consumo de energia para atingir as condições necessárias de fibrilação exigidas pelo processo de fabricação de papel.

As maiores modificações que ocorrem na fibra incluem fibrilação interna e externa, encurtamento do tamanho da fibra pela sua quebra, criação de finos e deformação da fibra, sendo que tais mudanças afetam as propriedades finais do papel (Debnath *et al*, 2021). A figura 06 representa o que ocorre com a fibra durante o processo de refino.

Figura 06 mudanças que ocorrem na fibra durante o processo de refino.



Fonte: Adaptado de Debnath *et al.* (2021).

A definição de finos pode ser deduzida com o percentual da polpa celulósica que ultrapassa uma abertura de 76 µm em um processo de separação sólido-líquido. Em análises de imagens das fibras por meio de microscopia ótica, os finos podem ser definidos como estruturas com comprimento do seu particulado inferiores a 0,2 mm (Bjork *et al*, 2021).

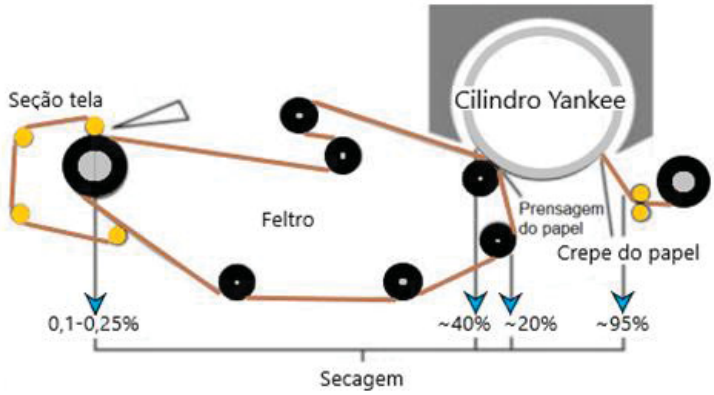
Segundo Mayeli (2018), a presença de finos na composição do papel tem influência sobre as propriedades do produto, afetando diretamente a densidade e resistência à tração, uma vez que efetua uma melhor ligação entre as fibras, formando assim uma folha mais resistente.

2.4 Processamento na máquina de papel *tissue*.

No que difere a máquina de produção de *tissue* das que produzem outros tipos de papel, destaca-se a presença da fibra curta de celulose e a baixa gramatura do papel

produzido, tendo valores entre 15 e 50 g/m². Para a formação da folha de papel em máquina, a fibra após o refino entrará na máquina de maneira uniforme por meio da caixa de entrada, sendo que o formato e tipo de papel produzindo (papel higiênico, toalha, guardanapo, entre outros) serão ajustados por meio da relação jato de massa e velocidade da seção tela. Após a formação, a folha passa para a seção feltro, pela prensagem e, na sequência, secagem pela ação do Cilindro *Yankee* (vaso de pressão aquecido e pressurizado por vapor de água) e das capotas, seguindo então para o processo de crepe, conforme a figura 07 (Assis *et al*, 2018). Durante esses processos, aspectos como a suavidade e maciez da folha serão adicionados ao produto (Pawlak *et al*, 2022).

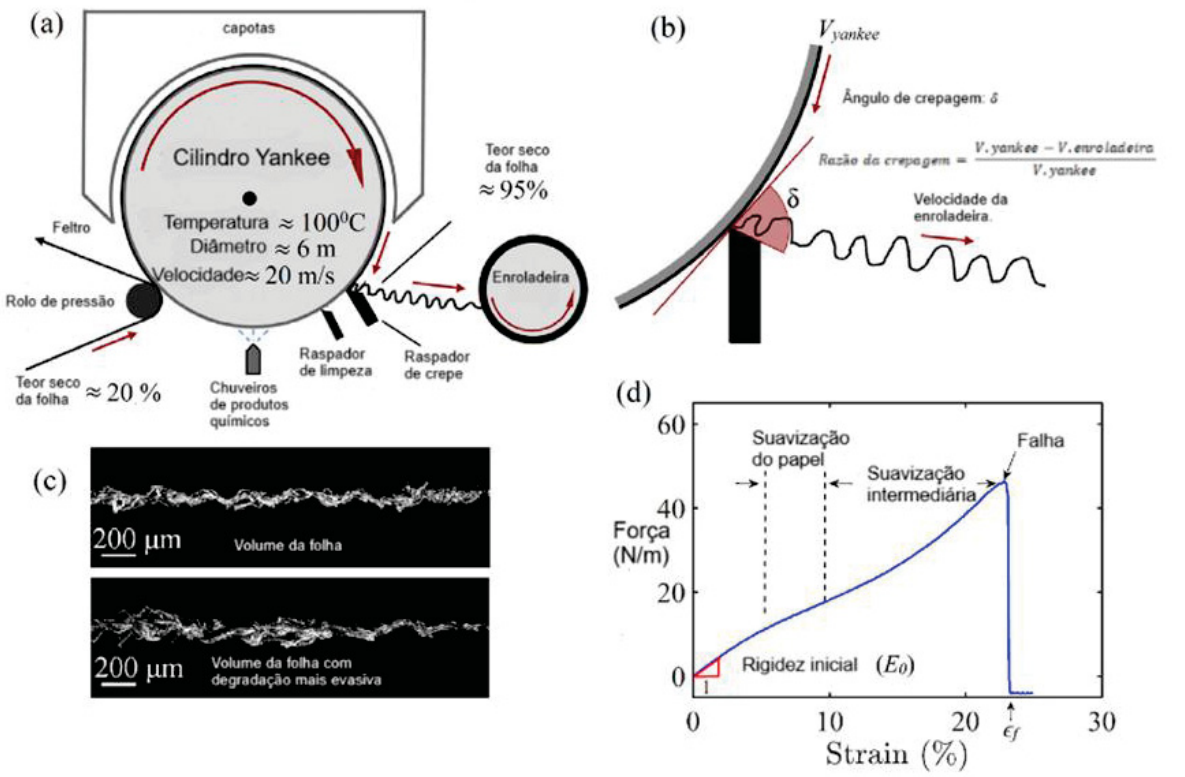
Figura 07 máquina de papel tissue.



Fonte: Assis *et al* (2018).

Devido ao baixo custo e a alta performance produtiva das máquinas papeleiras, adota-se a crepagem a seco para a produção do papel tissue. O processo ocorre com o teor de umidade da folha em torno de 5%, sendo que o papel é destacado do Cilindro *Yankee* por uma lâmina de crepagem. Essa interação violenta gera a deformação e ruptura da ligação entre as fibras, causando a formação de micro-dobras e o aumento do volume da folha devido a separação das camadas das fibras da folha de papel. A figura 08 e tabela 05 abaixo, adaptadas de Agarwal *et al* (2023) representam o processo de formação do crepe no papel tissue.

Figura 08 representando o processo de crepagem do papel.



Adaptado de: AGARWAL *et al* (2023).

Tabela 05 representando as informações contidas na figura 08.

Figura	Representação	Processo
a	Esquema do processo de secagem do papel no Cilindro *Yankee*	O papel, após formado, passa pelo feltro e é prensado contra o Cilindro *Yankee* com um teor seco aproximado de 20%. O Cilindro *Yankee*, juntamente com as capotas, será responsável pela secagem do papel, resultando em um teor seco aproximado de 95%. Durante o processo, o cilindro estará coberto por uma camada de proteção química, responsável pela proteção e por soltar a folha

		no processo de crepagem. A crepagem é realizada pelo raspador de crepe, onde na sequência o papel será enrolado pela enroladeira.
b	Esquema do processo de crepagem do papel	Visão ampliada da região de contato entre a lâmina crepadora, o Cilindro *Yankee* e a folha de papel. O ângulo δ é definido como o ângulo entre a tangente à superfície do Cilindro *Yankee* e o ângulo da lâmina crepadora.
c	Visualização do efeito da crepagem na folha de papel	Imagens da folha de papel tissue não convertidas demonstrando os volumes obtidos com a crepagem menos e mais agressiva.
d	Tração do papel	Gráfico de resposta a tração em uma amostra de papel tissue não convertido, onde $E0$ é a rigidez inicial do papel em N/m, e ϵf é a tração de ruptura.

Adaptado de: AGARWAL *et al* (2023).

Junto disso, como destacado por Tong *et al* (2023), a proteção química do Cilindro *Yankee*, denominada *coating*, aplicado anteriormente ao rolo de pressão, tem efeito direto sobre o cisalhamento causado pelas lâminas crepadora sobre a superfície da folha durante o seu destacamento da superfície do Cilindro *Yankee*. Uma formação eficiente do *coating* se dá quando a superfície do Cilindro *Yankee* é protegida de corrosão e desgastes, causado por efeitos mecânicos ou químicos, quando há uma adesão uniforme da folha à superfície do cilindro e quando se encontra suficientemente macio ao ponto de permitir que a lâmina raspadora penetra abaixo da folha, realizando seu destaque do cilindro, durante toda a vida útil da lâmina raspadora.

Tong *et al* (2023) também destacam em seu trabalho os diferentes tipos de lâminas raspadoras que podem ser utilizadas no processo de produção do papel tissue, podendo ser de aço, utilizado na produção de papéis com qualidade inferior,

ou a cerâmica, material que promove um maior ganho de qualidade ao produto. Suas médias podem variar de 0,89 a 1,25 mm de espessura, com uma altura de 100 mm. Uma lâmina em operação durante um período grande de tempo e com desgaste acentuado pode promover a formação de um crepe irregular, o que acarreta a perda da qualidade do produto final.

Para esse trabalho, foram analisadas a produção de máquinas de produção de papel tissue com velocidade média de operação entre 1650 m/min e 1850 m/min e relação de crepe entre 22% e 24%, utilizando lâminas de aço.

2.5 Balanço de massas

Na indústria de fabricação de papel, uma melhor eficiência do processo produtivo pode significar uma redução do consumo de insumos, uma vez que variação em processos e matérias primas pode significar um aumento na sua utilização. Com isso, Xia e co-autores (2020) destacaram a relevância do balanço de massas na indústria por dois motivos: o primeiro, a relevância para comparar e analisar parâmetros de desempenho baseados na massa e, o segundo, a possível utilização para avaliar parâmetros como o consumo de energia, água, emissões e até mesmo impactos ambientais.

O esquema básico para o balanço de massas é composto pela análise da quantidade em massa das matérias primas e produtos consumidos ou gerados nas entradas, durante o processamento e nas saídas do processo produtivo, conforme ilustrado na figura 09. Esta avaliação permite, por exemplo, identificar as variações do processo produtivo, quantificar perdas de materiais e qualidade dos produtos acabados e semiacabados através do monitoramento e controle da massa de entrada proporcionalmente à massa de saída (Brasil, 2004).

Figura 09 esquema básico para análise do balanço de massas.

Fonte: Adaptado de Brasil (2004).

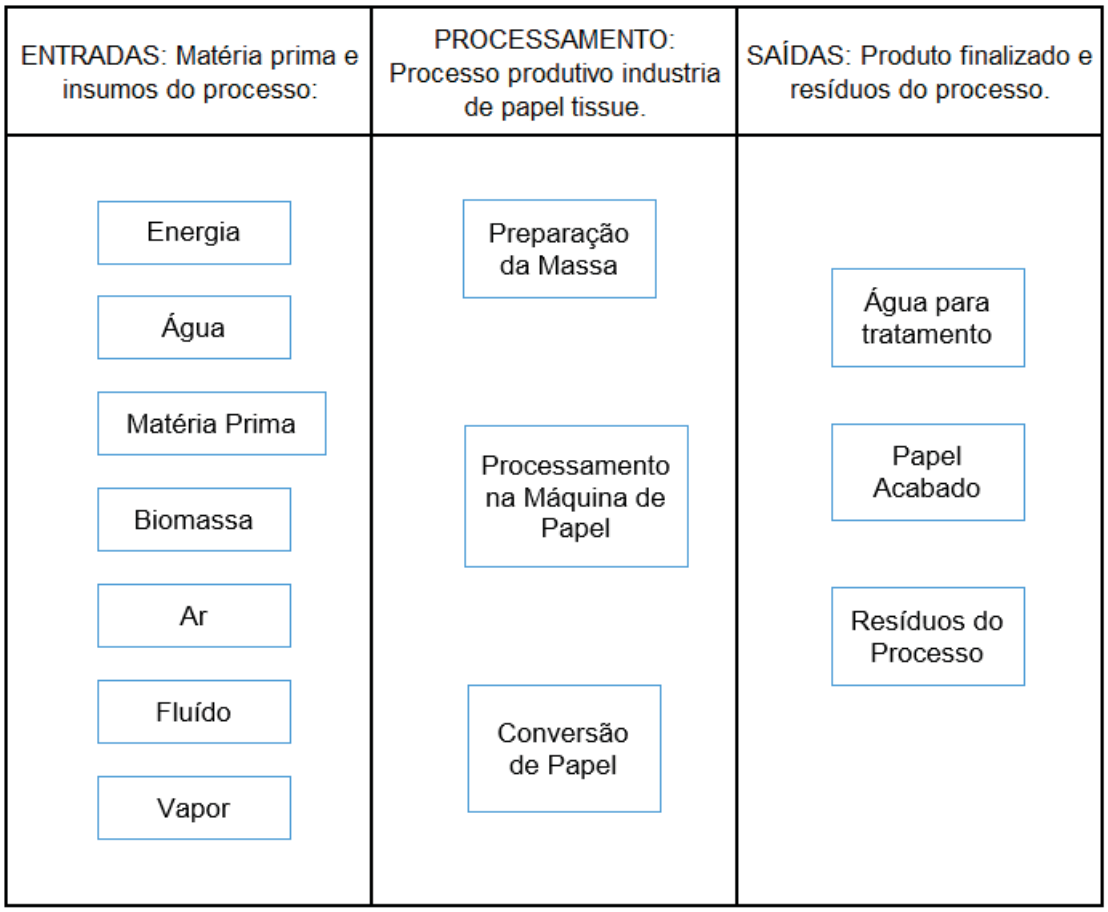
Donmezoglu Olmez e Aksoy (2021) desenvolveram em seu artigo um modelo de balanço de massas para a fabricação de refrigeradores, onde as entradas foram os materiais e insumos usados no processo fabril e as saídas foram os resíduos do processamento e o produto final. As principais informações necessárias para a realização do balanço material foram retiradas de softwares de produção. Porém, algumas estimativas relacionadas à massa dos produtos finais tiveram de ser realizadas. Como resultados, o presente capítulo demonstrou diversos meios de realizar a diminuição de resíduos, partindo desde a qualificação das matérias primas até algumas melhorias possíveis no processo.

Outros exemplos de aplicações de modelos de balanço de massas estão na agricultura, como descrito por Gustafsson *et al* (2023). Eles desenvolveram um novo modelo utilizando programação que, quando devidamente ajustada, pode ser capaz de prever a necessidade da utilização de fertilizantes a longo prazo ou até mesmo modelos capazes de analisar os efeitos das mudanças climáticas nos ciclos hidrológicos de uma região. (Yang *et al*, 2024).

Mählkvist & Pontus (2018) desenvolveram uma aplicação do balanço de massas para uma planta de processamento da celulose, onde foram avaliados os silos de cavaco, caldeiras de vapor, alimentadores de alta pressão e biodigestor, tendo um foco para o processamento das lascas de madeira. Para a realização do trabalho, foram avaliados os dados da indústria por meio dos sensores, estabelecendo as métricas físicas do processo, avaliando com essas informações, o balanço de massas e o balanço de energia.

Neste trabalho, também será abordado o balanço de massas do processo de fabricação de papel *tissue* na máquina de produção de papel, onde serão considerados os dados de entradas de matéria prima, celulose de fibra curta após o processo de refino e saídas de bobinas de papel, estimando a perda durante o processamento. Seguindo o esquema ensinado por do Brasil (2004), abaixo está representada a figura 10 das entradas, processamento e saídas de uma indústria de papel *tissue*.

Figura 10 esquema do balanço de massas de uma indústria tissue.



Fonte: O Autor (2024).

2.6 Testes de identificação dos resíduos do processo.

Para a caracterização dos resíduos presentes da indústria *tissue* e utilizados neste estudo, três testes foram selecionados, sendo eles: o TGA (análise termogravimétrica), FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e o MEV (microscopia eletrônica de varredura). Das três amostras coletadas, o material celulósico analisado foi o encontrado na superfície de equipamentos, que provém principalmente do processo de crepagem do papel.

Segundo Sorolla-Rosario e co-autores (2022), análises térmicas como o TGA são usadas frequentemente, e oferecem informações de maneira rápida sobre as propriedades de materiais poliméricos, não havendo necessidade de pré tratamento das amostras. Miranda e co-autores (2013) realizaram estudo comparativo entre as degradações de diferentes materiais celulósicos utilizando a técnica TGA. Essa técnica mostrou-se suficiente para revelar as diferenças entre as características das

celuloses provenientes da casca da soja, da palha de milho, da casca de arroz e da celulose cristalina comercial.

TGA é uma análise térmica que funciona em função do tempo ou da temperatura, onde a massa da amostra analisada é acompanhada em um ambiente com temperatura e atmosfera controladas. O processo ocorre em um aparelho denominado analisador termogravimétrico. Nele, a amostra é colocada sobre uma balança de precisão dentro de um forno, que será responsável pela variação da temperatura durante o experimento. A experimentação pode ocorrer de forma isotérmica ou não isotérmica, sendo que um gás de purga flui sobre as amostras para controlar o ambiente (Brown, 2004; Earnest, 1988; Escalante *et al*, 2022).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é reconhecida por sua sensibilidade, não destrutividade e custo-benefício, sendo que fornece dados espectrais que servem de modo a ilustrar a frequência de vibração, refletindo mudanças em grupos funcionais. Rosalina *et al* (2024) utilizaram o FTIR em seus trabalhos para identificar bandas de absorção específicas de componentes de emulsões, validar propriedades e investigar limites de estabilidade da emulsão sob vários processos e condições. No entanto, destacaram os desafios em interpretar os espectros de FTIR, devido às múltiplas transições vibracionais, picos de sobreposição e alongamento dos picos.

Segundo Abidi *et al* (2014) e Xu *et al* (2024), o FTIR tem sido utilizado em diversas aplicações, como para a síntese verde de cetais e glicerol, análise de biodiesel e misturas, determinação da qualidade dos óleos durante o processamento, entre outras. Também destacam a aplicabilidade sobre plantas, para a identificação da composição e organização de suas paredes celulares, sendo um ensaio poderoso e rápido para a identificação de polímeros e grupos funcionais, de forma não destrutiva.

Já a microscopia eletrônica de varredura, que já é utilizada há bastante tempo para analisar polímeros, se destaca nesse ramo por superar desafios ligados às técnicas típicas de visualização de materiais macios (Kyoichi Oshida *et al*, 2022).

Abel e co-autores (2023) descrevem que a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem por finalidade estudar a superfície de amostras com as mais variadas dimensões, apresentando imagens com ampliação de detalhes, sem a perda da nitidez e com alta resolução. Por sua grande versatilidade, propicia a análise morfológica detalhada de amostras.

2.6.1 *TGA* – Análise termogravimétrica para materiais celulósicos:

A aplicação do TGA para materiais celulósicos concentra-se na decomposição de três componentes sendo eles, respectivamente: A celulose, que tem energia de ativação em torno de 175 a 279 $kJ.mol^{-1}$ com baixo desvio padrão (reação ocorre uniformemente); a hemicelulose, com energia de ativação que varia entre 132 e 186 $kJ.mol^{-1}$, com um desvio padrão maior que da celulose; e a lignina, que oscila entre 62 e 271 $kJ.mol^{-1}$, tendo o maior desvio padrão entre os três componentes citados, sendo que a maior energia de ativação desse componente deriva da sua complexidade estrutural (Kristanto *et al*, 2021).

Aniza *et al* (2024) relataram em seu estudo sobre as propriedades da lignocelulose como biocombustível a relevância dos métodos de análise por TGA, onde comumente é utilizado para analisar as propriedades e qualidade dos biocombustíveis, como por exemplo utilizando a análise centesimal, gradação térmica, capacidade de ignição e reatividade. Também destacaram que o TGA tem sido amplamente utilizado para análises de processos termoquímicos, tais como torrefação, pirólise, gaseificação e combustão.

Segundo Burhenne e co-autores (2013), materiais celulósicos lenhosos, quando passam pelo TGA, por conterem mais lignina, apresentam menor formação de produtos gasosos. Porém, necessitam de mais energia para sua queima quando comparados a materiais que apresentam maior teor de celulose e hemicelulose, que se decompõe mais rapidamente (como, por exemplo, a palha de trigo).

Piazza *et al* (2024) utilizaram o TGA em seu trabalho para a coleta de dados cineticamente relevantes relacionados à pirólise da celulose. Como resultados de seus trabalhos, destacaram que com a metodologia experimental desenvolvida com o TGA se mostrou altamente eficaz para a coleta de dados cinéticos essenciais para a compreensão da química da pirólise da celulose e para a melhoria de ferramentas de modelagens de análises.

Já Mohammed *et al* (2024) desenvolveram em seu estudo um filme biodegradável a partir de uma mistura de hidroxipropilcelulose (polímero hidrofílico) e quitosana. Eles também investigaram como a viscosidade da celulose afetou a propriedade do filme. Para isso, utilizaram análises como microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X, espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier e TGA, utilizado para avaliar a estabilidade térmica dos filmes. Devido à perda

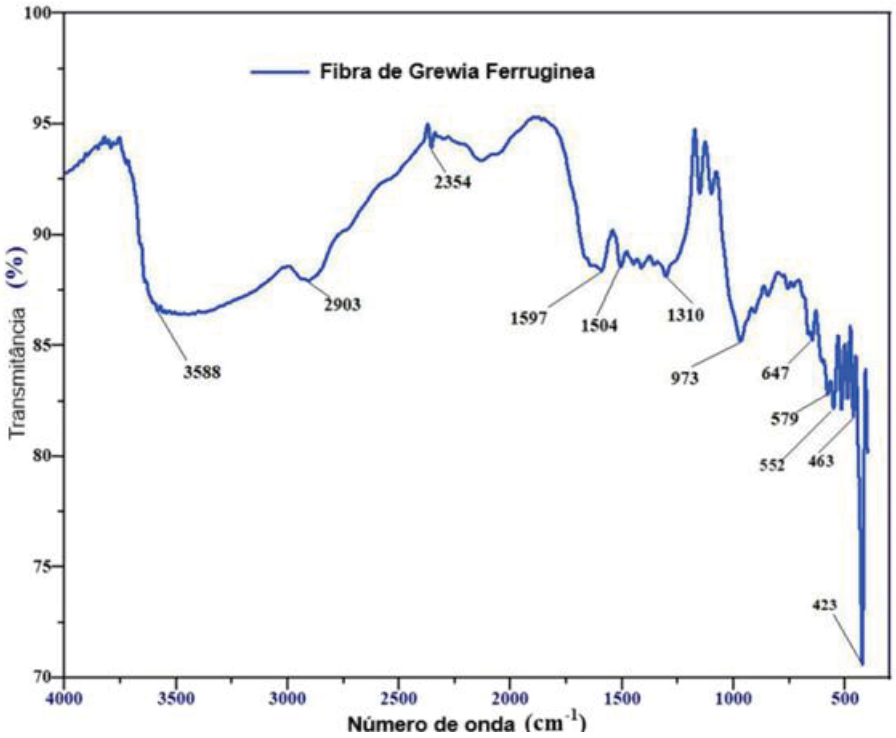
de massa menor que 5% a 100 ºC, os resultados do estudo indicaram um potencial dos filmes para utilização em produtos alimentícios que passam por processos de pasteurização e esterilização.

2.6.2 *FTIR* - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier.

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier é uma técnica fundamental para o estudo de estruturas e sobre a conformação de macromoléculas, além de ser útil para confirmar a identidade de compósitos (A. Pielesz; W. Binias, 2010). Xiong *et al* (2017), em seu estudo sobre interações entre amido de trigo com diferentes níveis de carboximetilcelulose ou celulose microcristalina, definiram o FTIR como uma técnica amplamente utilizada para estudar interações intermoleculares, funcionando de maneira a detectar as bandas características de determinados grupos químicos.

Bantamlak Birlie e Tekalgn Mamay (2024) determinaram, analisando fibras de *Grewia ferruginea* por meio do FTIR, os picos associados à celulose, hemicelulose, lignina e umidade, sendo que esses picos se apresentaram de maneira distintas dentro do range analisado. Entre os valores obtidos no FTIR, a banda em 3588 cm^{-1} representa a vibração de estiramento O-H, bem como as ligações de hidrogênio dos grupos hidroxila, sendo um indicador da presença de celulose na amostra. O pico presente em 2903 cm^{-1} também confirma a presença de componentes de celulose e hemicelulose na fibra. A presença de lignina pode ser comprovada a partir da banda associada ao estiramento C-OH, em 1024 cm^{-1}. A figura 11 apresentada abaixo representa os dados obtidos em sua pesquisa.

Figura 11 representando a análise FTIR realizada na Fibra de Grewia ferruginea.



Fonte: Bantamlak Birlie e Tekalgn Mamay (2024)

Vega-Hernández *et al* (2024) utilizaram o FTIR e diversos outros testes para identificar características em 03 amostras celulósicas obtidas através da serragem de madeira de teca (*Tectona grandis)* com diferentes pré tratamentos, sendo que nas amostras iniciais foi possível identificar que diferenciam-se entre si na presença ou ausência dos picos relacionados à hemicelulose e lignina, sendo que apenas na amostra retirada da serragem de madeira de teca apresentou bandas com picos entre 1597 cm^{-1}, que se sobrepôs com a banda entre 1637 cm^{-1}, relacionada à hemicelulose.

Análises também foram realizadas por Halder *et al* (2019) durante a pirólise de materiais reaproveitados ricos em celulose tratados ou não com 1-etil-3-metil acetato de midazolam. Neste estudo foi possível identificar que ocorreu menor produção de gases CO e CO_2 e maior concentração de CH_4 quando comparada à amostra não tratada com a tratada. Também foi possível inferir que maiores concentrações de hidrocarbonetos e compostos como furanos foram encontrados nos líquidos da pirólise dos materiais reaproveitados ricos em celulose devido à desidratação associada à presença de celulose amorfa.

A análise por FTIR também pode ser utilizada quando se deseja avaliar interações químicas entre compósitos, como Daza-Orsini *et al* (2024) destacaram em seu trabalho. No estudo, os autores avaliaram interações entre as cadeias de amido e filmes de nanofibras de celulose, sendo possível aferir que esses provavelmente interagem por meio de ligações de hidrogênio. Destacaram, também, que os filmes celulósicos acrescentaram aumento ao módulo de Young nas amostras e menor permeabilidade ao vapor de água.

2.6.3 *Microscopia eletrônica* de varredura (MEV): aplicação em materiais celulósicos.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas análises de materiais celulósicos tem como objetivo a identificação e verificação da morfologia, estrutura e topologia, podendo ser utilizado também para acompanhar modificações dessas características durante ensaios e tratamentos com outros componentes (He *et al*, 2023), (Badi *et al*, 2024). Esse tipo de análise pode exigir mais tempo do que outras técnicas para ser realizada. Porém, a identificação de partículas que se apresentam em menor número nas amostras têm maiores chances de serem encontradas, identificadas e caracterizadas devido a uma triagem cuidadosa da amostra proporcionada pelo MEV (Krishnamachari *et al*, 2011).

Luz e co-autores (2006) utilizaram em seu trabalho o MEV para analisar a distribuição homogênea de fibras em compósitos de polipropileno reforçados com celulose proveniente de bagaço e palha de cana. No trabalho foi possível verificar que o material apresentou propriedades mecânicas e morfológicas semelhantes entre si, fornecendo maior rigidez à matriz. Evidenciaram, também, que a distribuição das fibras era aleatória e com tamanhos distintos.

Em seu trabalho, Paniz (2021) utilizou o MEV para identificar a morfologia das fibras celulósicas extraídas do linho neozelandês, sendo que para essa análise, as amostras foram desidratadas. Com isso, foi identificado que o material celulósico obtido do linho neozelandês tinha morfologia de fibras longas, com diâmetro de cerca de 12 μm, sendo um material com elevado teor de solúveis (56%) e baixo percentual de material celulósico (menos de 5%).

Mohammed *et al* (2024) examinaram as características morfológicas de filmes poliméricos de hidroxipropilcelulose (polímero hidrofílico) e quitosana. Foi possível inferir que o filme apresentou uma superfície lisa, sem rugosidade ou irregularidades, o que evita a presença de contaminantes e garante uma aparência visualmente

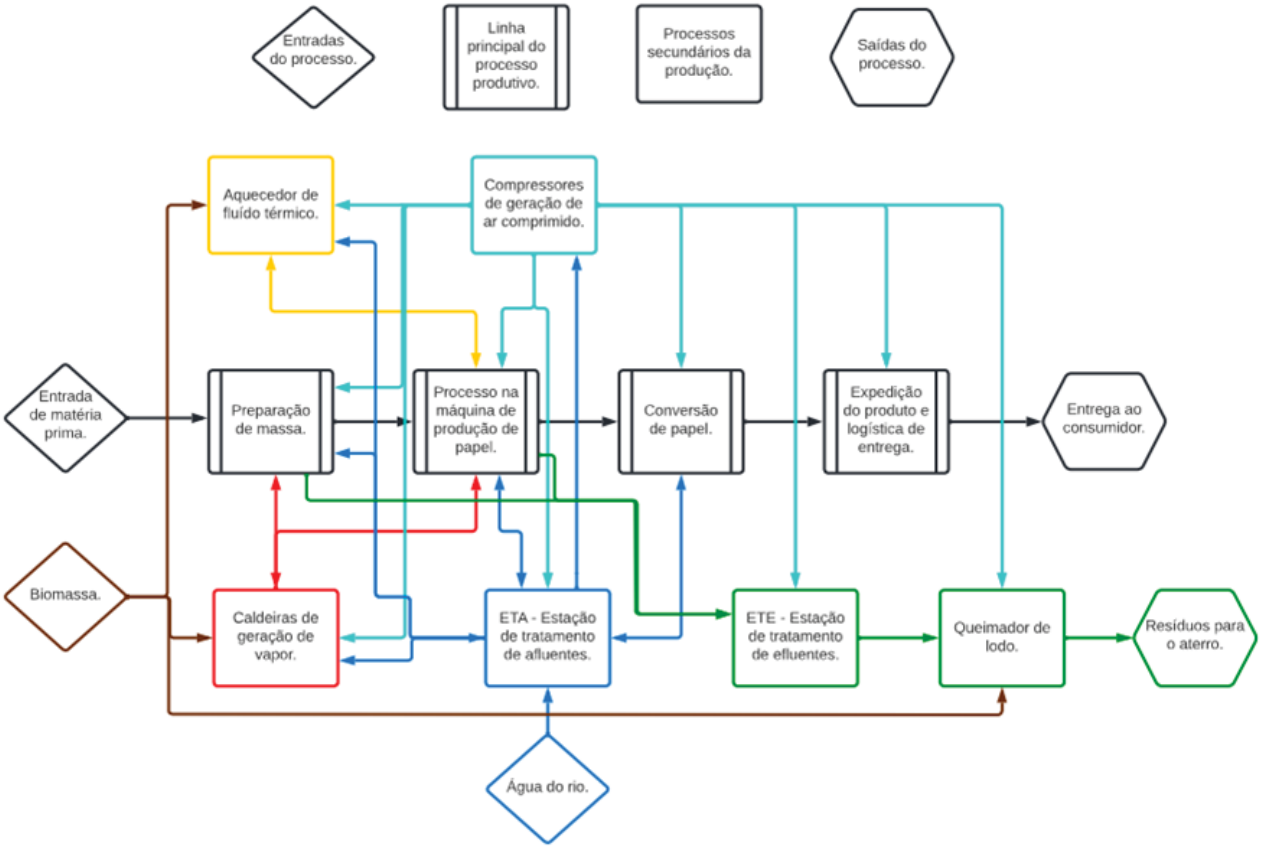
atraente ao produto alimentício. Sua estrutura também se apresentou compacta e densa, potencializando as propriedades de barreira do filme, característica importante para a aplicação na indústria alimentícia.

Chamathka *et al* (2024), em seu artigo sobre extração e caracterização de nanopartículas do farelo de palmiste, utilizaram o MEV para examinar as características morfológicas superficiais, composição e orientação das fibras após passarem por tratamento alcalino, branqueamento e hidrólise ácida. Esses tratamentos alteraram sua forma e expuseram sua superfície, removendo componentes macromoleculares como hemicelulose, lignina, pectina, óleos e outras impurezas que causam fibrilação. Pelo MEV foi possível encontrar evidências sobre o tamanho preciso das nanoestruturas extraídas, confirmando o sucesso na extração de nanopartículas de celulose.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desse trabalho, em um primeiro momento foi desenvolvido um esquema macro do processo produtivo, separando as etapas ligadas direta ou indiretamente à produção, conforme a Figura 12. A linha central que se inicia na entrada de matéria prima e se encerra na entrega ao consumidor trata-se do caminho principal do processo produtivo, sendo que os itens laterais se trata dos consumíveis, como vapor e ar comprimido.

Figura 12 Fluxo produtivo para fabricação de papel tissue, sendo representada as entradas do processo, o processo produtivo principal, processos secundários e as saídas.



Fonte: O Autor (2022).

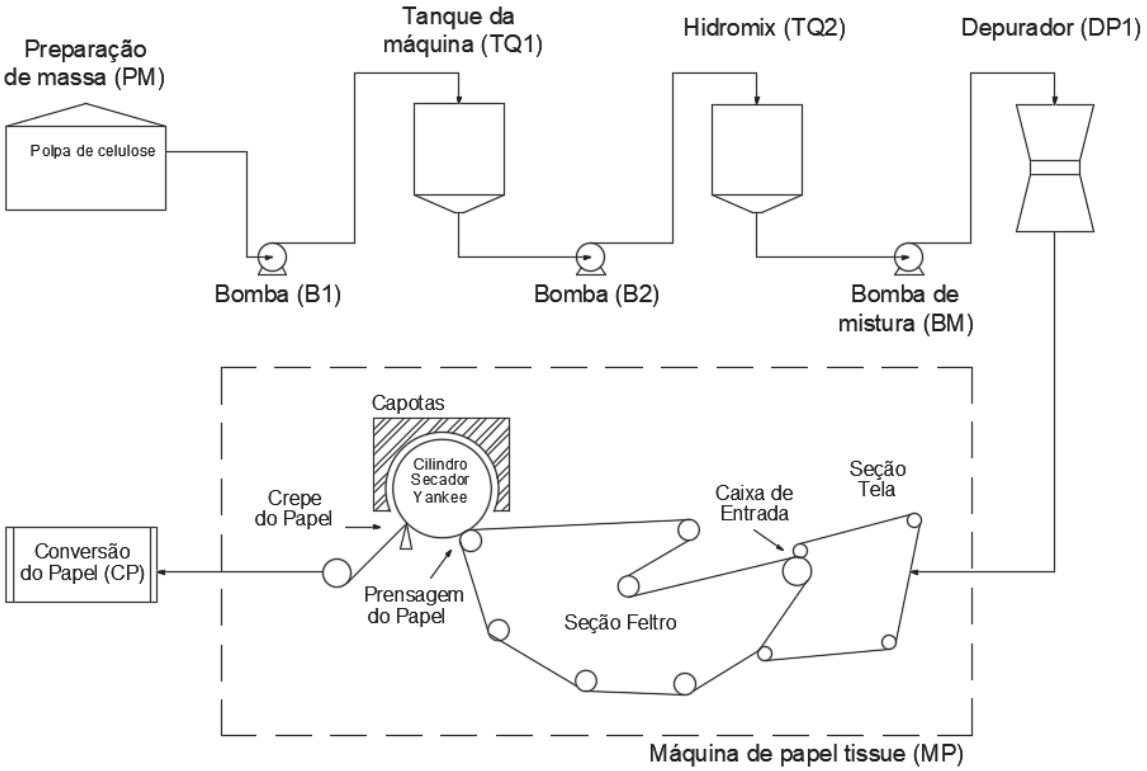
Na linha principal de produção, entre a entrada de matéria-prima, preparação de massa e processamento na máquina de produção de papel, o transporte da matéria-prima é realizado pela água. Após a formação da bobina, o papel é transportado mecanicamente, por empilhadeiras ou correias transportadoras.

Para esse estudo, a matéria-prima estudada será especificamente a celulose de eucalipto de fibra curta. Os pontos geradores de resíduos levantados do processo foram os provenientes dos processos de refino, geração de finos, localizado na etapa de preparação de papel, e o processamento na máquina. Como ambos os processos representaram perdas na etapa de processamento na máquina de papel, esse estudo realizou o balanço de massas nesse ponto.

Na sequência, o modelo de processo produtivo *tissue* utilizado foi representado na figura 13, onde a matéria prima celulose de fibra virgem inicia o ciclo produtivo na preparação de massa, sendo levada por bombas até o tanque da máquina e em seguida para o *hidromix*, local em que a bomba de mistura fará seu transporte até um

depurador, sendo realizada uma última separação das impurezas da massa de papel antes da sua entrada na máquina de papel, onde ocorrerá o processo de formatação do papel na seção tela, o deságue na seção feltro, sua prensagem e secagem através do Cilindro *Yankee*, sendo então destacado do mesmo através das lâminas crepadoras, resultado nas bobinas de papel que posteriormente serão convertidas no papel acabado.

Figura 13 seção da produção *de Papel Tissue selecionada para realização do balanço de massas.*



Fonte: O Autor (2022).

3.1 Materiais

3.1.1 Coleta de amostras:

Para a realização do estudo dos resíduos provenientes do processo de produção do papel *tissue*, no contexto das máquinas de produção de papel, três amostras foram coletadas, sendo provenientes das partes inferiores das máquinas de papel (abaixo das seções Tela e Feltro), da superfície de equipamentos próximos às máquinas papeleiras e do rejeito final das máquinas de papel centrifugado no tratamento de água.

3.1.1.1 Amostra 01 – Coletada abaixo das Máquinas de Papel:

Essa amostra 01 foi coletada abaixo das seções tela e feltro, uma vez que sofreram seu desprendimento durante a formação da folha, logo após entrarem no processo através da caixa de entrada na máquina de papel. Entre suas características, podem ser citados o alto teor de umidade e a presença de finos.

O material provém diretamente da preparação de massa, onde passou pelo processo de desagregação e posteriormente pelo refino, para então ser levado até a Máquina de Papel onde ocorre o seu desprendimento por conta da ação mecânica e força centrífuga da máquina. A figura 14 abaixo representa essa amostra.

Figura 14 representado a amostra 01 coletada após seu desprendimento das seções Tela e Feltro.

Fonte: O autor (2023)

3.1.1.2 Amostra 02 – Poeira de papel.

A amostra 02 foi coletada da superfície de equipamentos e estruturas próximas às máquinas de papel. Entre suas características podem ser citadas que o material tem baixo teor de umidade, presença de finos e sua fácil suspensão quando perturbado.

Após a formação do papel na Máquina Papeleira, ocorre o processo de crepagem do papel, por meio de lâminas de aço carbono ou cerâmica que causam

micro quebras para adicionar a maciez no papel. Esse processo ocasiona o surgimento de partículas que ficam em suspensão no ar e posteriormente se acumulam por sobre equipamentos e estruturas. A figura 15 abaixo representa esse particulado coletado.

Figura 15 representado a amostra 02 coletada da superfície de estruturas e equipamentos próximos às máquinas de papel.

Fonte: O autor (2023)

3.1.1.3 Amostra 03 – Rejeito final do processo em Máquinas de Papel.

Amostra retirada da etapa de centrifugação de resíduos da água proveniente do processo das Máquinas de Papel. Esse material apresenta umidade, tem coloração escura e por estar presente na água que sai do processo das máquinas *tissue* apresenta resíduos químicos.

A água utilizada para transportar a massa de papel para a Máquina de Papel, após utilizada, passará por tratamento, onde a água recuperada retornará para o processo e os resíduos são processados e passam pela centrifugação, por meio do qual é possível chegar ao material da amostra 03. A figura 16 representa essa amostra.

Figura 16 Representado a amostra 03 dos rejeitos provenientes das centrífugas.

Fonte: O autor (2023)

3.2 Metodologia de pesquisa.

3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para o estudo microestrutural dos resíduos celulósicos coletados na unidade de fabricação, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JCM6510LV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (IQ/UERJ). As amostras, antes de serem analisadas, foram previamente metalizadas com ouro em uma câmara à vácuo.

3.2.2 Análise termogravimétrica (TGA).

Os estudos termogravimétricos foram conduzidos para avaliar a estabilidade térmica dos resíduos celulósicos gerados na unidade de produção de papel tissue. As análises foram realizadas em equipamento DTG-60 (Shimadzu), com range de temperatura de 30°C a 800°C sob atmosfera de ar sintético a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

3.2.3 Espectroscopia na região de infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR).

Os principais grupos químicos presentes nas amostras celulósicas coletadas na unidade industrial de crepagem foram determinados através de espectroscopia por infravermelho com transformada de Fourier. Para tanto, empregou-se um espectrômetro Perkin Elmer, na região de 650 a 4000 cm^{-1}.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados das perdas na produção:

Utilizando o modelo da máquina de papel representado pela Figura 13, foram retiradas as informações quanto às entradas de matéria prima (massa de papel de fibra celulósica virgem), para realizar as comparações quanto às perdas. Foram realizadas, também, coletas de parâmetros na saída da Bomba B1 e, posteriormente, nas bobinas formadas na saída do processo nas Máquinas de Papel. Os dados foram coletados durante três dias de produção e, através da média aritmética, desses parâmetros foram realizados os cálculos para três máquinas de papel com o mesmo processo descrito anteriormente.

Os dados utilizados para os cálculos foram coletados após a Bomba B1, pelo balanço de massas, que se tratam dos dados de entrada do processo. As variáveis do processo utilizadas para realização das estimativas foram: passagem média de massa de papel e água medidos pelo medidor de vazão, em litros por minuto (L/min), informação coletada pelos medidores de vazão presentes na máquina de papel e o percentual médio (%) de massa que está sendo levado pela água até a máquina, valor retirado de medidores de consistência presentes no processo. Para esse ponto, foram coletadas informações sobre a velocidade média da máquina nos dias das coletas de parâmetros, em metros por minuto (m/min). A tabela 06 representa os valores médios obtidos nos três processos analisados durante três dias de coleta de dados.

Tabela 06 dados das entradas dos processos em análise.

Processos	Vazão Média (L/min)	Proporção média de massa de papel (%)	Velocidade média (m/min)
Processo 1	1333,03	3,61	1640,00
Processo 2	1511,33	3,53	1733,33
Processo 3	1581,82	3,54	1860,00

Fonte: O Autor (2022).

Na saída do processo, foram levantadas informações de massa das bobinas de papel que saem da máquina, em quilos (kg), o teor de umidade do papel, em porcentual (%) e a gramatura do papel, em gramas por centímetro quadrado (g/cm²). A tabela 07 apresenta os valores médios obtidos em cada um dos três processos durante os três dias de análise dos dados.

Tabela 07 dados das saídas dos processos em análise.

Processo	Média das massas (kg)	Média da umidade do papel (%)	Média das gramaturas (g/cm²)
Processo 1	2776,67	6	14,85
Processo 2	2696,67	5	15,21
Processo 3	2724,40	6	14,74

Fonte: O Autor (2022).

A estimativa da massa de papel idealmente desconsiderando as perdas de processo, ou seja, a quantidade de material acabado planejado relacionado com as massas de matérias primas nas entradas pode ser obtida pela Equação (1). A massa esperada (M_e), em kg, é igual ao tempo de produção (T_p), em minutos, com uma média de 50 minutos para os processos analisados, multiplicado pela vazão mássica (V_m), em L/min, e pelo percentual de massa de papel (P_p), expresso em %, presente neste fluido transportado.

Equação 01 estimativa da massa esperada no processo produtivo.

$$Me = TpxVmxPp \quad (1)$$

Fonte: O Autor (2022)

Os resultados dessa análise são apresentados na tabela 08, onde estão os valores calculados das massas, bem como o percentual aproximado de perdas de massa para os valores médios utilizados para os cálculos.

Tabela 08 Estimativa de massa de papel e percentual de perdas.

Processo	**Massa média calculada (kg)**	**Perdas entre o valor calculado e valor real (%)**
Processo 1	2855,46	4,34%
Processo 2	2934,02	7,95%
Processo 3	2724,40	4,83%

Fonte: O Autor (2022).

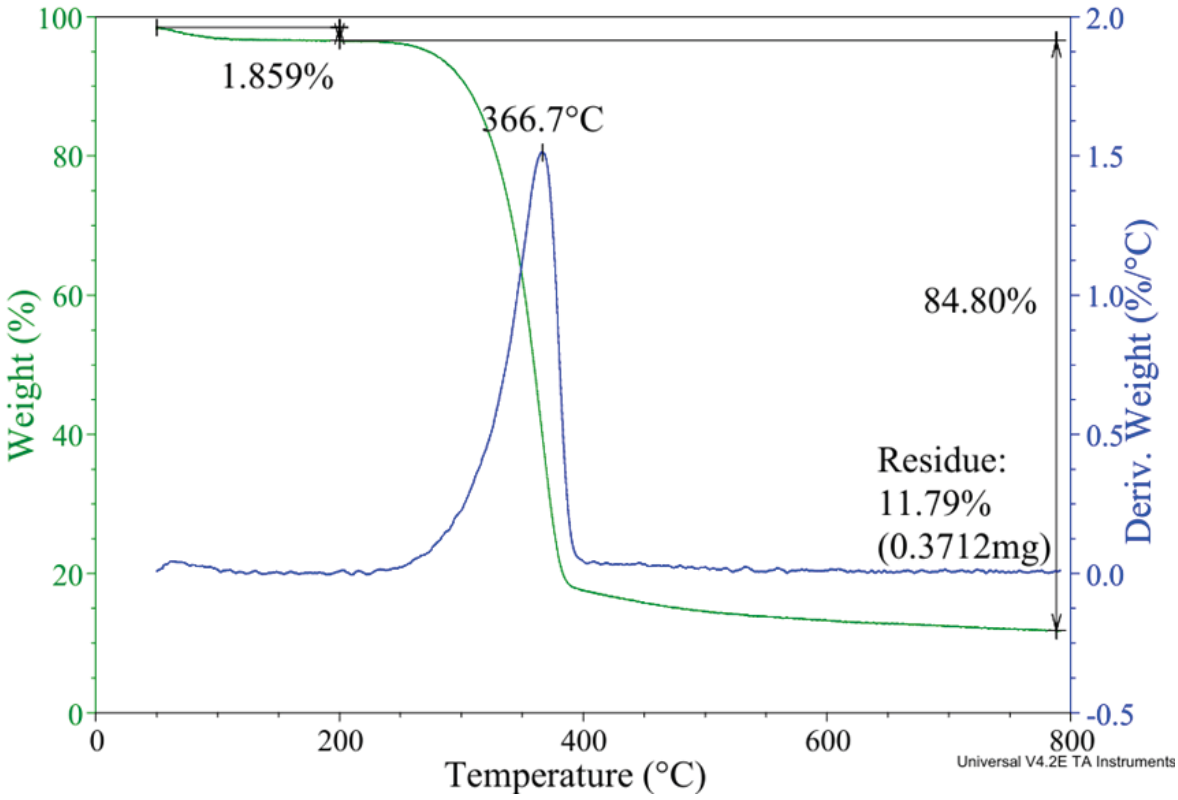
A partir dessas informações, considerando o método utilizado para calcular as perdas teóricas do processo, estima-se que podem variar entre 4,34% e 7,95%, sendo que as variáveis de máquina, como a refinação de cada um dos processos analisados, condicionamento da crepagem do papel ou o tipo de vestimenta utilizados podem interferir diretamente nessa perda.

4.2 Resultados das análises:

4.2.1 Resultados TGA:

Para os resultados obtidos com o TGA, foi elaborado um gráfico considerando a massa perdida percentualmente da amostra conforme a temperatura aumentou até 800 ºC, conforme a figura 17 representada abaixo.

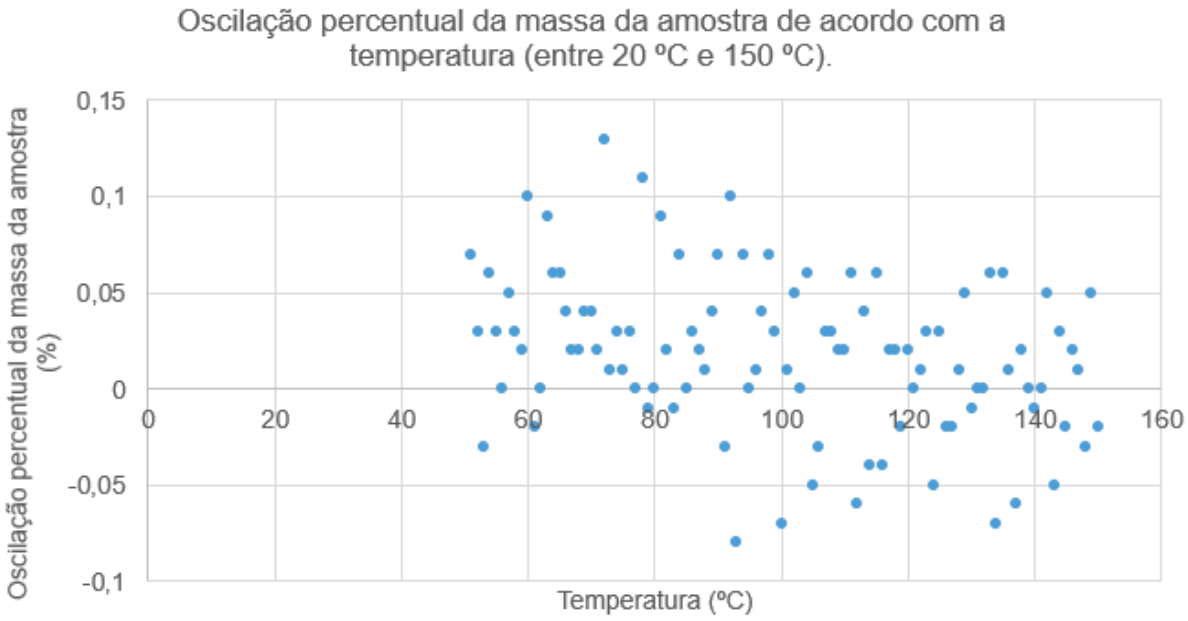
Figura 17 representando as informações coletadas pela análise TGA.



Fonte: O autor (2024)

Pela análise dos dados, verificou-se que entre 50 º C e 150 ºC ocorreu uma queda de 1,81% de massa, onde foi possível identificar uma oscilação média de 0,03% da massa por cada grau que oscilou da temperatura. Essa perda está associada à umidade presente nas fibras (resíduos gerados na unidade de crepagem). No processo produtivo, porém, o teor de umidade da folha pode oscilar entre 4% e 6%. O gráfico 01 de dispersão representado abaixo demonstra como essa oscilação ocorreu de acordo com o aumento da temperatura.

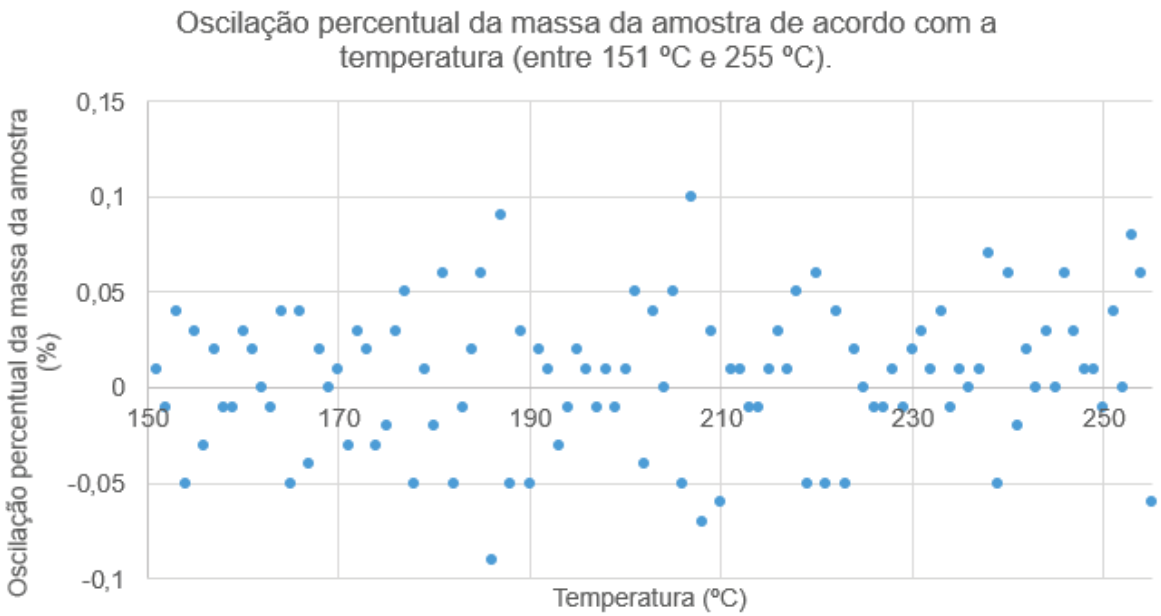
Figura 18 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 20ºC e 150ºC.



Fonte: O autor (2024)

Entre 151 ºC e 255 ºC, a amostra teve um comportamento térmico estável, onde a oscilação percentual da massa da amostra foi de apenas 0,61%, com uma média de oscilação por grau de 0,005%, conforme o gráfico 02 abaixo. Nessa faixa de temperatura foi reportada a depolimerização da hemicelulose (estrutura amorfa e mais facilmente hidrolisada), com início em 180°C (Poletto *et al*, 2014).

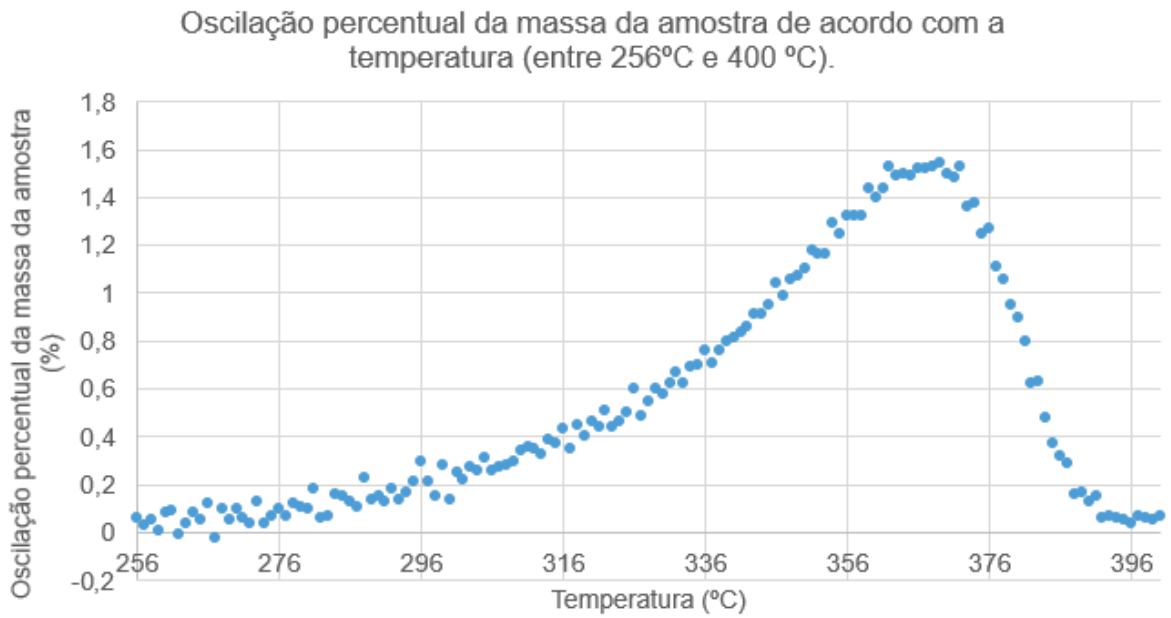
Figura 19 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 151ºC e 255ºC.



Fonte: O autor (2024)

Entre 256 ºC e 400 ºC a amostra sofreu grandes alterações de massa, com oscilação média de 0,54%, tendo uma diminuição em sua massa de 78,49%. O gráfico 03 abaixo representa a variação de percentual de massa para a faixa de temperatura analisada. As maiores reduções no percentual da massa da amostra ocorreram entre as temperaturas de 346 ºC e 378 ºC, tendo uma média de 1,32% de diminuição para cada grau adicional. Nessa faixa de temperatura, mais precisamente em torno de 350°C, ocorre a maior degradação da celulose (estrutura cristalina capaz de melhorar a estabilidade térmica da fibra) (Poletto *et al*, 2014).

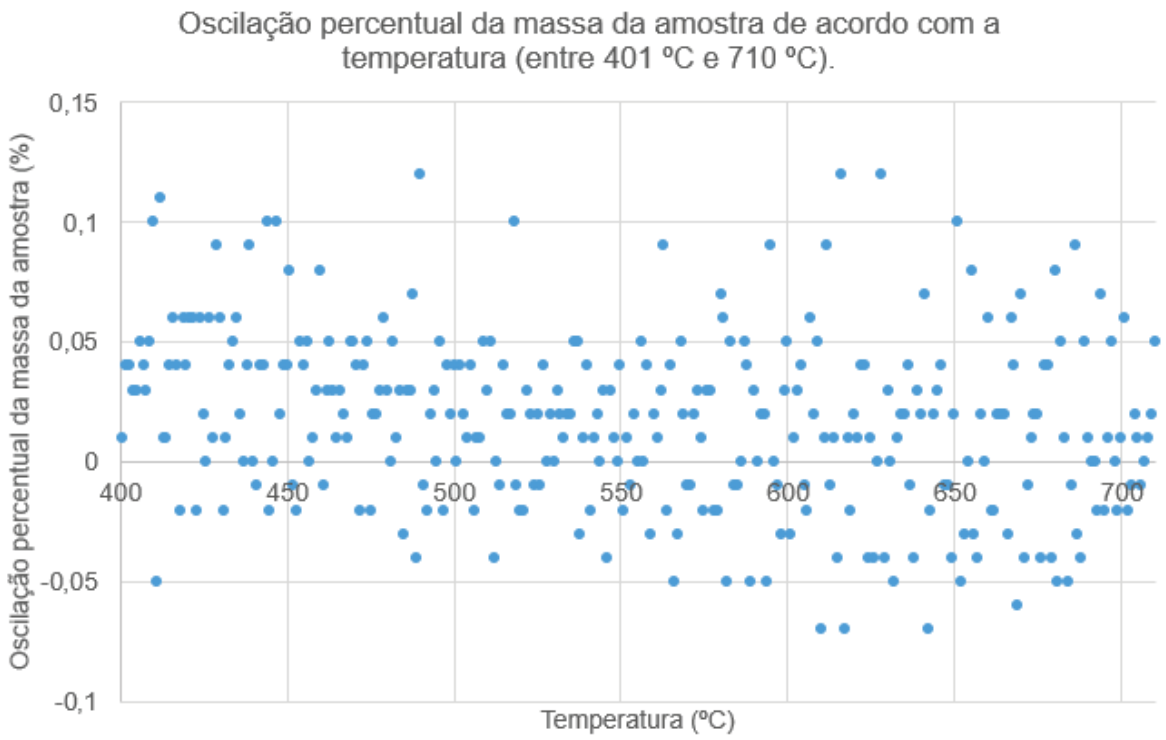
Figura 20 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 256ºC e 400ºC.



Fonte: O autor (2024)

Para as temperaturas entre 401 ºC e 710 ºC, a amostra não teve grandes variações na temperatura. Houve uma oscilação média da massa por grau de 0,014% e uma diminuição em sua massa de 5,76%, informações contidas no gráfico 04 representado abaixo. Os resíduos gerados são, provavelmente, devido à presença de materiais inorgânicos (González *et al*, 2012; Poletto *et al*, 2014).

Figura 21 representando as informações coletadas pela análise TGA entre 401ºC e 710 ºC.



Fonte: O autor (2024)

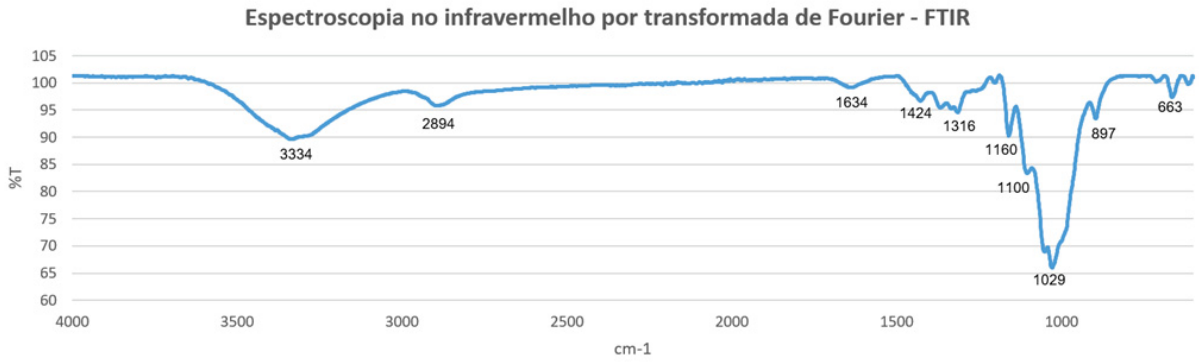
4.2.2 Resultados de FTIR:

Analisando a Figura 18, construída com dados retirados da análise FTIR, foi possível verificar a primeira banda, de grande vibração localizada em 3334 cm^{-1}. Esse sinal está relacionado às vibrações de estiramento do grupo -OH (hidroxila) (Portella, 2018). Também foi possível identificar, em 2894 cm^{-1} uma banda de menor intensidade que a primeira, que se relaciona aos estiramentos assimétricos e simétricos, presentes quando a amostra contém componentes de celulose e hemicelulose na fibra (Bantamlak Birlie e Tekalgn Mamay, 2024).

Já a banda de vibração de menor intensidade, localizada em 1634 cm^{-1}, está relacionada à vibração de deformação angular de água adsorvida. Os picos 1160 cm^{-1}, 1100 cm^{-1} e 897 cm^{-1} têm por características serem vibrações que se apresentam em amostras contendo celulose. O pico presente em 1029 cm^{-1} representa o estiramento das ligações C – O (Portella, 2018). A região destacada em 663 cm^{-1} está

relacionada às ligações OH do grupo da celulose (Bantamlak Birlie e Tekalgn Mamay, 2024).

Figura 22 representando os dados obtidos através da análise FTIR.



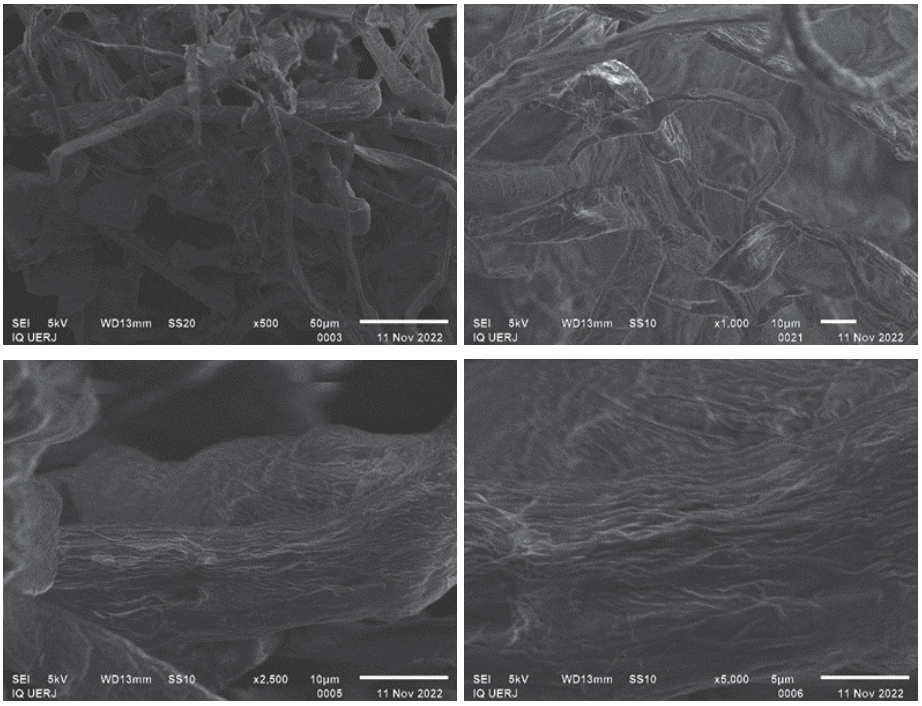
Fonte: O Autor (2024)

Diferentemente do que se observa em espectros de fibras não-tratadas, o resíduo celulósico caracterizado não apresenta bandas a 1595, 1510 e 1270 cm^{-1}, características de vibrações de estiramento de ligações C=C e C-O presentes em grupos químicos lignínicos (Poletto *et al*, 2014). Essa ausência é justificada pelo fato de o resíduo celulósico ter sofrido um tratamento químico preliminar, visando à remoção de lignina.

4.2.3 Resultados MEV:

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi utilizada nesse trabalho para identificar as características morfológicas superficiais dos resíduos celulósicos coletados na unidade de crepagem, para a fabricação de papel *tissue*.

Figura 23 representando os resultados obtidos através das análises MEV, com aproximação x500 (a), x1000 (b), x2500 (c) e x5000 (d).



Fonte: O Autor (2022).

A figura 19 mostra as fotomicrografias obtidas por meio do MEV, realizadas com aproximações de x500 (a), x1000 (b), x2500 (c) e x5000 (d), para os resíduos celulósicos gerados na unidade de crepagem. As fotomicrografias (a) e (b) evidenciam uma estrutura aleatória, não uniforme, que sugere uma forma enovelada, provavelmente favorecida pelo processo de usinagem por que sofreu o papel. Foi possível identificar a presença de fibras finas e curtas (típicas de eucalipto) (Pego e Bianchi, 2021) de celulose. Nas figuras (a) e (b) é possível identificar o formato típico da celulose de eucalipto, com seu formato cilíndrico tubular, além de apresentar o aspecto de aspereza e rugosidade, mas sem porosidades (Luz *et al*, 2006). Também é possível identificar a distribuição desigual das fibras nessas duas figuras, que pode estar relacionado ao processo de refino da matéria prima e posteriormente à crepagem do papel, já na máquina papeleira. Não foi possível identificar a presença de corpos estranhos nas duas primeiras imagens, o que pode demonstrar a pureza deste material. Essa consideração é razoável, considerando que o resíduo obtido é gerado numa unidade em que já tinha ocorrido o branqueamento e refino do papel.

É possível identificar também nas figuras (a) e (b) o achatamento das fibras e o seu emaranhamento, sendo esses efeitos causados pelo processo de refino. Esse efeito causa o aumento de sua área de aderência e da quantidade de fibras.

Nas figuras com aproximação de x2500 (c) e x5000 (d) é possível identificar a presença de fibrilações externas, confirmando que as fibras foram refinadas. Essa condição proporcionará ao papel o aumento das características relacionadas à resistência, sendo que, por ocorrer externamente ao material, facilitará a ligação entre as fibras. Não foi possível identificar os efeitos de uma refinação mais severa, onde ocorre o corte da fibra. Desta maneira, as características morfológicas apresentadas na amostra demonstram que o material analisado não difere do utilizado na produção de papel *tissue*.

Com a avaliação visual das fibras através do MEV, é possível identificar que as fibras analisadas têm aspectos visuais parecidos com a fibra após o processo de refinação, assim, esses resíduos podem ser novamente inseridos no processo. Outras aplicações poderiam ser possíveis como, por exemplo, o uso desses resíduos celulósicos como carga (de preenchimento ou de reforço) em matriz polimérica. Considerando que o rejeito é um material nobre, já que passou por etapas de refino (químico e mecânico) dentro da unidade industrial, os particulados poderiam garantir boas propriedades mecânicas a um polímero.

5. CONCLUSÕES

Nos cursos de engenharias, principalmente aqueles que abordam desenvolvimento de projetos na área de processos industriais, é imprescindível que a temática ambiental seja discutida. Nesses cursos, a aplicação de conceitos relacionados ao balanço de massas pode auxiliar na discussão de um projeto sustentável, à medida que permite ao engenheiro identificar as principais unidades, dentro de uma planta industrial, responsáveis por emissões e geração de rejeitos.

A coleta de dados realizada, no período e nos processos em questão, possibilitou que o balanço de massas pudesse quantificar o fluxo das matérias primas nas entradas e a eficiência do processo pela identificação das perdas. As estimativas das massas foram realizadas utilizando a média aritmética dos valores do processo, possibilitando estimar o percentual de matéria prima que se perde durante a formação das bobinas de papel.

Foi possível estimar que as perdas das entradas em máquina com relação às saídas variaram entre 4,34% e 7,95%, sendo que para os três processos analisados, o “Processo 2” foi o que apresentou maior percentual de perdas. Esse material se desprende das seções de tela, seção feltro e durante o processo de formação de crepe do papel, sendo processos provenientes da formação da folha na máquina de papel.

Algumas análises podem exigir maiores detalhamentos e aumento do período de amostragem. Para suprir estas necessidades, sugere-se a ampliação do monitoramento em várias etapas do processo produtivo, por exemplo, na seção tela, feltro e processo de crepe. Eventualmente, técnicas para medição das perdas nestas etapas devem ser implementadas, considerando a dificuldade de monitoramento e a relevância de material perdido. Maiores tempos de observação também são recomendados, possibilitando a identificação de desvios no processo e redução da variância.

Outro fator de impacto nessa avaliação de balanço de massas é a característica do produto final, que pode variar de acordo com a matéria prima utilizada, como o papel branco reciclável.

Diante disso, maneiras para realizar o reaproveitamento dessas perdas podem ser utilizadas, uma vez que considerando um período de produção de um mês, esses percentuais encontrados acabam se tornando valores consideráveis para o processo produtivo. Sistemas para separar e reaproveitar a massa de papel que cai do feltro e tela e sistemas de exaustão para coletar a poeira em suspensão poderiam ser utilizados como melhoria dos processos, sendo que esse último também evitaria o acúmulo da poeira de papel no ambiente fabril, reduzindo os riscos de explosão.

Assim, além da melhoria da eficiência da indústria analisada, há também a introdução de práticas relacionadas à sustentabilidade, uma vez que as perdas se transformam em resíduos no processo gerando impactos negativos ao ambiente, incluindo a saúde ocupacional do trabalhador.

O modelo de aplicação demonstrou resultados aceitáveis para os parâmetros estudados, sendo que a sistemática se torna mais precisa analisando com a coleta de dados em períodos maiores de tempo.

Os testes TGA, FTIR e MEV foram utilizados neste trabalho para realizar a identificação das amostras de poeira de papel, sendo um dos resíduos identificados e coletados no processo produtivo. Em trabalhos futuros, essas análises também podem ser utilizadas para realizar a identificação dos outros dois resíduos identificados neste trabalho (resíduos encontrados abaixo da tela formadora e do feltro e resíduo pós processo de centrifugação da estação de tratamento de efluentes).

Por meio da análise Termogravimétrica (TGA) foi possível identificar que a maior diminuição da massa da amostra ocorreu entre 256ºC e 400ºC, sendo o ponto de degradação da celulose, onde a amostra teve uma diminuição de 78,49% de sua massa, o que pode ser indicativo da pureza do material.

Já a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) apresentou bandas de vibração características da presença de hemicelulose e celulose (os picos 1160 cm^{-1}, 1100 cm^{-1} e 897 cm^{-1}), além da presença de hemicelulose (2894 cm^{-1}) e umidade (1634 cm^{-1}). Não foi possível identificar bandas que representassem a presença de impurezas na amostra, como a lignina, o que já era de se esperar, uma vez que o resíduo particulado provém da crepagem de um papel já tratado quimicamente.

Na análise por microscopia eletrônica por varredura (MEV) foi possível identificar que se tratam de fibras curtas de celulose, devido ao seu tamanho, bem como o formato cilíndrico tubular, característico da celulose proveniente da madeira de eucalipto. Também foi possível identificar que as fibras passaram pelo processo de refinação, uma vez que apresentam aspectos de fibrilação. Não foi possível identificar de forma visual impurezas nas amostras.

Desse modo, por meio das análises foi possível aferir que a amostra coletada poderia ser reutilizada no processo, onde uma vez que já apresenta aspectos de uma fibra já refinada, poderia ser inserida no tanque da máquina ou no tanque de mistura, desde que mantendo a consistência requerida para o processo produtivo, diminuindo assim o grau de perda do processo produtivo. Para isso, um equipamento de coleta dessa poeira poderia ser adicionado, logo após o processo de crepagem do papel (entre o Cilindro *Yankee* e a enroladeira da máquina de papel), sendo o local onde se origina esse resíduo.

Para isso, deveria ser realizado um estudo para identificação de quanto seria a quantidade desse resíduo gerado, uma vez que nesse estudo foi identificado o valor referente aos três resíduos gerados. Com isso, poderia ser realizada uma estimativa de *payback* de um exaustor de coleta, com a finalidade de estabelecer reaproveitamento e ganhos na produção.

Além dessa aplicação, sua utilização em matrizes poliméricas também poderia ser uma alternativa, sendo que as amostras apresentam um bom grau de pureza, demonstrado através das análises. Sua aplicação na indústria agrícola como insumo também pode se tornar uma alternativa.

Para estudos futuros, a análise das outras duas amostras apresentadas nesse trabalho podem ser uma alternativa, uma vez que não foram realizadas em um primeiro momento suas caracterizações, podendo ter aplicabilidade nesse processo ou em outros setores, sendo assim uma alternativa da diminuição e/ou otimização da geração de resíduos do processo produtivo.

6. ATIVIDADES FUTURAS

- Análise de possíveis alternativas para diminuir a geração desses resíduos ou de reaproveitá-los dentro da indústria *tissue* ou de outros ramos industriais.
- Avaliação do potencial dos resíduos como cargas de reforço em matrizes poliméricas.
- Publicação dos resultados referentes às análises térmicas e fotomicrográficas.

7. PUBLICAÇÃO

Até o presente momento, parte do trabalho realizado foi publicado em revista indexada (Revista Gestão & Sustentabilidade), com o título “Waste management in a tissue paper mill: a practical approach in a Brazilian industrial process” (https://doi.org/10.36661/2596-142X.2023v5n1.14186).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15134 de 12/2020: Produtos de papel para fins sanitários – Métodos de ensaio.

Abel; Dimas José Lasmar; Jamal. An analysis of the chemical and morphological properties of brazilian jute plant fiber (Corchorus capsularis): the Amazon fiber. **Concilium**, v. 23, n. 3, p. 1049–1063, 13 mar. 2023

Abidi, Noureddine; Cabrales, Luis; Haigler, Candace H. Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 100, p. 9–16, 2014.

Andersson, E., Sällsten, G., Lohman, S., Neitzel, R., & Torén, K. (2019). Lung function and paper dust exposure among workers in a soft tissue paper mill. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, 93(1), 105–110.

Agarwal, Shubham; Srivastava, Prabhat; Green, Sheldon I.; et al. The influence of microstructure on the tensile properties of a creped tissue paper: Modeling and experiments. **Mechanics of Materials**, v. 176, p. 104505, 2023.

Amirah Badi, Nurul Shafiqah; Zul Hilmey Makmud, Mohamad; Se Mun, Chin; et al. Synthesis and characterization of cellulose nanocrystal derived from paper as nanofiller for polymer insulation materials. **Materials Today: Proceedings,** p. S2214785323053476, 2024.

Aniza, Ria; Chen, Wei-Hsin; Kwon, Eilhann E.; et al. Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme: A critical review. **Energy Conversion and Management: X**, v. 22, p. 100538, 2024.

Assis, T., Reisinger, L. W., Pal, L., Pawlak, J., Jameel, H., & Gonzalez, R. W. (2018). Understanding the Effect of Machine Technology and Cellulosic Fibers on Tissue Properties – A Review. **BioResources**, 13(2).

Avşar, E., & Demirer, G. N. (2008). Cleaner production opportunity assessment study in SEKA Balikesir pulp and paper mill. **Journal of Cleaner Production**, 16(4), 422–431.

Banvillet, G. et al. Cellulose nanofibril production by the combined use of four mechanical fibrillation processes with different destructuration effects. **Cellulose**, v. 30, n. 4, p. 2123–2146, 6 jan. 2023.

Birlie, Bantamlak; Mamay, Tekalgn. Characterization of natural cellulosic fiber extracted from Grewia ferruginea plant stem. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 271, p. 132858, 2024.

Björk, E., Bouveng, M., Vomhoff, H., & Engstrand, P. (2021). Use of fines-enriched chemical pulp to increase CTMP strength. **TAPPI Journal**, 20(4), 255–263.

Brown, Michael. Introduction to thermal analysis. Kluwer Academic Publishers 2004. Nova Iorque.

Burhenne, L. et al. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 177–184, 1 maio 2013.

Castro, P. M.; Westerlund, J.; Forssell, S. Scheduling of a continuous plant with recycling of byproducts: A case study from a tissue paper mill. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 1, p. 347–358, 13 jan. 2009.

CEPI.: Key Statistics 2021—European pulp & paper industry (2021). Available at https://www.cepi.org/key-statistics-2021/

Chao-Ben Gwo et al. Quantification of the degree of preference for different tissue products based on a hand-felt tissue test panel. **Tappi Journal**, v. 22, n. 5, p. 305–320, 1 jun. 2023.

Chamathka, Warakagoda Widanalage Don Rumali; CHAI, Tsun-Thai; PHUAH, Eng Tong; et al. Extraction and characterization of cellulose nanoparticles from palm kernel meal for potential application in active food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 260, p. 129637, 2024.

Confederation of European Paper Industries. (2021). Key Statistics 2020. **European Pulp and Paper Industry**, CEPI, 2021.

Corcelli, F., Fiorentino, G., Vehmas, J., & Ulgiati, S. (2018). Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp - A Finland case study. **Journal of Cleaner Production**, 198, 96–111.

Coutinho, João P.L.; Reis, Marco S.; Neves, Diogo Filipe Martins Gonçalves; et al. Robust optimization and data-driven modeling of tissue paper packing considering cargo deformation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 175, p. 108898, 2023.

Daza-Orsini, Sandra Milena; Medina-Jaramillo, Carolina; Caicedo-Chacon, Wilson Daniel; et al. Isolation of taro peel cellulose nanofibers and its application in improving functional properties of taro starch nanocomposites films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 273, p. 132951, 2024.

Debnath, M., Salem, K. S., Naithani, V., Musten, E., Hubbe, M. A., & Pal, L. (2021). Soft mechanical treatments of recycled fibers using a high-shear homogenizer for tissue and hygiene products. **Cellulose**, 28(12), 7981–7994.

Dong, M. et al. Efficient utilization of waste paper as an inductive feedstock for simultaneous production of cellulase and xylanase by Trichoderma longiflorum. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, p. 127287, jul. 2021.

Donini, Í. A. N. et al. Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. **Eclética Química**, v. 35, n. 4, p. 165–178, 2010.

Donmezoglu Olmez, C., & Aksoy, A. (2021). Qualitative and quantitative assessment of waste generation in a refrigerator-manufacturing plant based on a waste tree and mass balance. **Environmental Science and Pollution Research**, 29(5), 6977–6989.

Earnest, Cm. **Compositional Analysis by Thermogravimetry**. [s.l.]: ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1988.

Escalante, J. et al. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, p. 112914, 1 nov. 2022.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). **FAOSTAT Forestry Trade Statistics Database**. http://www.fao.org/faostat/en/#home (acessado em June 2022).

Frazier, R., Zambrano, F., Pawlak, J. J., & Gonzalez, R. (2022). Methods to assess and control dusting and linting in the paper industry: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 119(9-10), 5511–5528.

Freire, F.; Maria Lucia Bianchi. Blended paper: physical, optical, structural, and interfiber bonding analysis. **Cerne**, v. 27, 1 jan. 2021.

Giutini, L. et al. Decarbonization of a tissue paper plant: Advanced numerical simulations to assess the replacement of fossil fuels with a biomass-derived syngas. **Renewable Energy**, v. 198, p. 884–893, 1 ago. 2022.

Gonzáles, I. et al. NANOFIBRILLATED CELLULOSE AS PAPER ADDITIVE IN EUCALYPTUS PULPS. **BioResources**, v. 7, n. 4, 6 set. 2012.

Gustafsson, Jon Petter; Barbi, Florian; Braun, Sabina; et al. Where does all the phosphorus go? Mass balance modelling of phosphorus in the Swedish long-term soil fertility experiments. **Geoderma**, v. 440, p. 116727, 2023.

Halder, Pobitra; Kundu, Sazal; Patel, Savankumar; et al. TGA-FTIR study on the slow pyrolysis of lignin and cellulose-rich fractions derived from imidazolium-based ionic liquid pre-treatment of sugarcane straw. **Energy Conversion and Management**, v. 200, p. 112067, 2019.

He, Tingxiang; Yang, Zhen; Lv, Shenghua; et al. Low-concentration octadecylamine based nano cellulose prepared by acid hydrolysis method improving the toughness and thermal stability of epoxy resin. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, p. S1226086X23008730, 2023.

IBA e FAO: EPE (Empresa de Pesquisa Energética); IEA (International Energy Agency); IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). A indústria de papel e celulose no brasil e no mundo: panorama geral, 2022.

Ismail, M. Y., Patanen, M., Kauppinen, S., Kosonen, H., Ristolainen, M., Hall, S. A., & Liimatainen, H. (2020). Surface analysis of tissue paper using laser scanning confocal microscopy and micro-computed topography. **Cellulose**, 27(15), 8989–9003.

Krishnamachari, Parakalan; Hashaikeh, Raed; Tiner, Mike. Modified cellulose morphologies and its composites; SEM and TEM analysis. **Micron**, v. 42, n. 8, p. 751–761, 2011.

Kristanto, J.; Muhammad Mufti Azis; Suryo Purwono. Multi-distribution activation energy model on slow pyrolysis of cellulose and lignin in TGA/DSC. **Heliyon**, v. 7, n. 7, p. e07669–e07669, 1 jul. 2021.

Kumar Jain, S., Dutt, D., & Jain, R. K. (2021). Application of additives to manufacture quality towel grade tissue paper with accelerated productivity. **Materials Today: Proceedings**.

Kyoichi Oshida, Murata, M.; Takizawa, Y. Analysis of the dispersion state of pitch particles in polymers for nanofiber fabrication by optical microscopy and image processing. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 163, p. 110585–110585, 1 jan. 2022.

Lodenius, M., Heino, E., & Viljakainen, S. (2009). Introducing a new model for material savings in the Finnish paper industry. **Resources, Conservation and Recycling**, 53(5), 255–261.

Luz, S. M.; Gonçalves, A. R.; Jr, D. Microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçado com celulose de bagaço e palha de cana. Materia-rio De Janeiro, v. 11, n. 2, p. 101–110, 1 jan. 2006.

Mählkvist, S., & Pontus, N. (2018). Pulp mill heat and mass balance model: Exploring the benefits and possibilities of process modelling as an applied method in a case study (Dissertation). **Mälardalen University**, Sweden.

Mayeli, N. (2018). Factors affecting the free shrinkage of handsheets: apparent density, fines content, water retention value, and grammage. **TAPPI Journal.** June 2018, 17(06), 317–325.

Mendes, A. O., Vieira, J. C., Carta, A. M., Galli, E., Simões, R., Silva, M. J. dos S., Costa, A. P., & Fiadeiro, P. T. (2020). Influence of tissue paper converting conditions on finished product softness. **BioResources**, 15(3), 7178–7190.

Miranda, M. I. G. et al. Kinetical thermal degradation study of maize straw and soybean hull celluloses by simultaneous DSC–TGA and MDSC techniques. **Thermochimica Acta**, v. 565, p. 65–71, ago. 2013.

Mohammed, Khalid; Yu, Dawei; Mahdi, Amer Ali; et al. Influence of cellulose viscosity on the physical, mechanical, and barrier properties of the chitosan-based films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 259, p. 129383, 2024.

Morais, F. P., Carta, A. M. M. S., Amaral, M. E., & Curto, J. M. R. (2021). Micro/nano-fibrillated cellulose (MFC/NFC) fibers as an additive to maximize eucalyptus fibers on tissue paper production. **Cellulose**.

Nader, S., Brosse, N., Daas, T., & Mauret, E. (2022). Lignin containing micro and nano-fibrillated cellulose obtained by steam explosion: Comparative study between different processes. **Carbohydrate Polymers**, 290, 119460.

Nilo. (2004). Introdução à engenharia química. **Interciência**. Rio de Janeiro.

Olejnik, K., Bloch, J.F., & Pelczynski, P. (2019). Measurement of the dynamics of fluid sorption for tissue papers. **TAPPI Journal**. July 2019, 18(7), 417–426.

Ouadi, M., Fivga, A., Jahangiri, H., Saghir, M., & Hornung, A. (2019). A Review of the Valorization of Paper Industry Wastes by Thermochemical Conversion. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 58(35), 15914–15929.

Paniz, O. G. Obtenção de celulose e nanocelulose a partir de biomassas marinhas e linho neozelandês. **Ufpel.edu.br**, 2021

Paulino, Mariana Shiraishi. Avaliação técnica de diferentes configurações para o tratamento de efluentes da fabricação integrada de papel Tissue e papelão. 2022.

Pawlak, J. J., Frazier, R., Vera, R. E., Wang, Y., & Gonzalez, R. (2022). Review: The softness of hygiene tissue. **BioResources**, 17(2), 3509–3550.

Perng, Y.S., Teng, T.Y., & Chang, C.H. (2021). An evaluation of household tissue softness. **TAPPI Journal.** February 2021, 20(2), 91–106.

Piazza, Veronica; Da Silva Junior, Roberto Batista; Frassoldati, Alessio; et al. Detailed speciation of biomass pyrolysis products with a novel TGA-based methodology: the case-study of cellulose. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 178, p. 106413, 2024.

Pielesz, A.; Biniaś, W. Cellulose acetate membrane electrophoresis and FTIR spectroscopy as methods of identifying a fucoidan in Fucus vesiculosus Linnaeus. **Carbohydrate Research**, v. 345, n. 18, p. 2676–2682, 2010.

Portella, Emanoel Henrique. **NANOPAPEL DE CELULOSE: PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E MODIFICAÇÃO COM CRISTAL**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais. Porto Alegre, 2018.

Poletto, M.; Ornaghi, H.; Zattera, A. **Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties**. Materials, v. 7, n. 9, p. 6105–6119, 25 ago. 2014

Rego, D., & Corrêa, H. L. (2022). Biopolymers applied to packaging: A brief literature review on their impact on sustainability. **Non-Metallic Material Science, 4(2)**.

Reitbauer, J.; Eckhart, R.; Bauer, W. An analytical approach to assess the interrelation of surface properties and softness of tissue paper. **TAPPI Journa**l, v. 22, n. 2, p. 87–95, 2023.

Rosalina, Reny; Kamwilaisak, Khanita; Sutthanut, Khaetthareeya; et al. Probing the stability and quality of the cellulose-based Pickering emulsion containing sesamolin-enriched sesame oil by chemometrics-assisted ATR-FTIR spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 452, p. 139555, 2024.

Serra-Parareda, F., Aguado, R., Arfelis, S., Xifré, R., Fullana-i-Palmer, P., & Delgado-Aguilar, M. (2022). Techno-economic and environmental evaluation of a market pulp reinforced with micro-/nanofibers as a strengthening agent in packaging paper. **Journal of Cleaner Production**, 347, 131265.

Souza, S. D. C. De; Bastos, S. L. Análise de mercado e nível de concentração da indústria de papel tissue no Brasil. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 1, p. 165–188, 15 mar. 2018.

Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M.R., Santonja, G.G., Roudier, S., Sancho, L.D. (2015). Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. **European Commission**, Seville, Spain, 2015.

Tanveer, A. et al. Innovations in papermaking using enzymatic intervention: an ecofriendly approach. **Cellulose**, v. 30, n. 12, p. 7393–7425, 29 jun. 2023.

Tong, Q. et al. Creping technology and its factors for tissue paper production: a review. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 81, n. 5, p. 1075–1091, 25 mar. 2023.

United Nations. (2015). Global Sustainable Development Report. **Global Sustainable Development Report: 2015 edition**. pp. 202.

Vega-Hernández, Miguel Ángel; Munguía-Quintero, María Fernanda; Rosas-Aburto, Alberto; Et Al. Effect of teak wood lignocellulose pretreatment on the performance of cellulose-graft-(net-poly(acrylamide-co-acrylic acid)) for water absorption and dye removal. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, p. 133482, 2024.

Wang, Y., Zambrano, F., Venditti, R., Dasmohapatra, S., De Assis, T., Reisinger, L., Pawlak, J., & Gonzalez, R. (2019). "Effect of pulp properties, drying technology, and sustainability on bath tissue performance and shelf price," **BioResources**, 14(4), 9410-9428.

Xia, K., Cao, R., Gao, Y., Li, Y., Ni, Y., Wang, S., … Zhang, H. (2020). Mass balance and elimination mechanism of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) during the kraft pulping process. **Journal of Hazardous Materials**, 398, 122819.

Xiong, J. et al. Interactions between wheat starch and cellulose derivatives in short-term retrogradation: Rheology and FTIR study. **Food Research International**, v. 100, p. 858–863, 1 out. 2017.

Xu, Hongyu; Balea, Ana; Merayo, Noemí; et al. Improving sustainability of cellulose nanofibrils production: FTIR spectroscopy for online control of the synthesis of

recyclable magnetic TEMPO catalyst. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 7, p. 100417, 2024.

Yang, Linshan; Feng, Qi; Ning, Tingting; et al. Attributing the streamflow variation by incorporating glacier mass balance and frozen ground into the Budyko framework in alpine rivers. **Journal of Hydrology**, v. 628, p. 130438,

Zhang, T., Yang, Y.L., & Liu, S.Y. (2020). Application of biomass by-product lignin stabilized soils as sustainable Geomaterials: A review. **Science of the Total Environment**, 728, 138830.