



AMANDA CASTILHO BUENO SILVA

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA POLPA DE CELULOSE
DESTINADA À MÁQUINA DE PAPEL**

**LAVRAS - MG
2021**

AMANDA CASTILHO BUENO SILVA

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA POLPA DE CELULOSE
DESTINADA À MÁQUINA DE PAPEL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof^a. Dra. Bruna de Souza Nascimento
Orientadora

Rebeca Soares Silva
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Bueno Silva, Amanda Castilho.

Variabilidade da polpa de celulose para a máquina de papel /

Amanda Castilho Bueno Silva. - 2021.

41 p. : il.

Orientador(a): Bruna de Souza Nascimento.

Coorientador(a): Rebeca Soares Silva.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. polpa de celulose. 2. máquina de papel. 3. variabilidade. I.
Nascimento, Bruna de Souza. II. Silva, Rebeca Soares. III. Título.

AMANDA CASTILHO BUENO SILVA

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA POLPA DE CELULOSE
DESTINADA À MÁQUINA DE PAPEL
STUDY OF THE VARIABILITY OF CELLULOSE PULP
INTENDED FOR PAPER MACHINE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 18 de novembro de 2021.

**Prof. Dra. Bruna de Souza Nascimento
DCA/UFLA**

**Prof. Dr. Gilson Campani Junior
DEG/UFLA**

**Rebeca Soares Silva
Suzano S/A**

**LAVRAS - MG
2021**

*Agradeço a mulher que fui
E a mulher que estou me tornando
Por nos amarmos em frequência imperfeita
Porém duradoura
Eu estou recuperando reinados
E buscando meus alicerces
E eu espero que vocês achem os seus
E que coisas bonitas topem com vocês facilmente*
Ryane Leão

AGRADECIMENTOS

Passei a adolescência escrevendo sobre pessoas e agora, finalizando mais uma etapa nessa jornada, escrevo sobre pesquisa, mas não sem antes agradecer todo apoio que tive durante esse caminho.

Agradeço à Deus que no meio da tempestade sempre me fala de amor e a Vovó Tina, que no meio das tempestades sempre me fala de Deus.

Aos meus pais, Sheila e Armando, por fazerem dos meus sonhos os deles, por impulsionarem meu voo, incentivarem minhas ideias e por terem me criado com afeto, respeito, força e gentileza.

Ao Raphael, meu irmão, por ter me incentivado a gostar de ler e por ser minha inspiração de dedicação, inteligência e sensatez.

Ao meu avô Cizo (in memoriam), de longe meu maior impulsionador ao estudo, a engenharia das coisas e aos entendimentos do mundo.

Ao vovô João por me mostrar que quando a gente se dedica, os planos dão certo. Fazer parte da primeira geração da família que teve acesso aos estudos me faz querer ser sempre mais. Sinto muito orgulho de você.

In memoriam a vovó Cida por me divertir, dar amor e se interessar pelos meus aprendizados na escola.

À minha família, aos meus tios, tias, primos e primas, pela melhor infância e boas memórias que eu poderia ter.

Ao Núcleo de Estudos em Qualidade de Alimentos, à ProcEQ Jr. Consultoria e Soluções em Engenharia Química, a AIESEC e a Cafeteria Escola Cafesal por terem contribuído com a minha formação profissional e por me ensinarem que sempre é sobre pessoas.

À Laura, minha primeira gestora, que deixou a salinha de reuniões do Núcleo de Estudos em Qualidade no Departamento de Ciência dos Alimentos aberta para a minha criatividade.

Aos amigos que fizeram da faculdade a melhor fase da minha vida. Wesllen, Raphael, Fabiana, Priscila e Luana, obrigada por terem feito parte desse ciclo tão bonito. Foi maravilhoso dividir histórias, estudos e sonhos nos corredores da UFLA com vocês.

À Professora Bruna que no terceiro período da graduação me abriu as portas da sala dela, quando a mesa ainda era posicionada de outra forma e me falou sobre os campos de pesquisa e me ensinou os primeiros passos. Obrigada por seguirmos juntas nessa jornada.

Aos professores da engenharia química que batalharam pelo desenvolvimento do curso e entregaram para os alunos uma visão teórica e profissional de fundamental importância para

o hoje e o amanhã. Em especial ao professor Gilson, por ser meu orientador de estágio, por representar a Engenharia Química na minha banca de TCC e pelo apoio no período de processo seletivo de estágio.

À Universidade federal de lavras por ter sido minha casa, minha escola, meu abrigo e por ter assistido todo esse desenvolvimento ao longo desses anos.

Aos professores que me formaram ao longo da vida.

À Rebeca por ser quem é, pela gestão de pessoas, qualidade e processos desenvolvida ao longo do último ano, pelo apoio nessa pesquisa e em outros projetos.

À Bianca que acelerou todas as coisas e sempre me mostra novos pontos de vista.

Ao time da Qualidade da Suzano S/A da Unidade de Mucuri, que apoiaram meu desenvolvimento, me questionaram contribuindo para o meu senso crítico, me ensinaram teoria, me levaram para a prática e me permitiram inspirar e transformar.

À Suzano S/A pelo desenvolvimento ao longo da jornada de estágio.

Aos amigos de Lambari que sempre vibraram comigo, obrigada por tudo.

À Adriana, Danilo e Iago que me ajudaram com a pesquisa, informações, conhecimento e intimidade nos últimos dias. Que boa a oportunidade de partilhar a vida com vocês.

Aos amigos da cidade de Mucuri. Essa jornada não foi fácil, mas é bem mais leve e divertida com vocês.

RESUMO

No cenário mundial de árvores plantadas, o Brasil é o maior exportador de celulose e segue em crescimento com as exportações e produção de papel, sendo o eucalipto a principal fonte de madeira no processo de produção de celulose. Pelo processo kraft, há a aplicação de energia química e mecânica para a extração de celulose, que é o principal componente das células vegetais. Após o processo, a polpa de celulose da linha de fibras alimenta a torre da máquina de papel. Na máquina há a remoção de água da folha, que operam nos setores de formação, prensas úmidas e secagem. O papel é composto por um conjunto de fibras entrelaçadas, com a maior parte constituída por celulose. Dentre as várias aplicações para o papel, ele pode ser utilizado para impressão e escrita. Quando falamos de um processo mensurado pelo comportamento temporal de cada variável, é possível visualizar as correlações diretas e indiretas dos parâmetros da produção da celulose com os parâmetros da polpa que alimenta a máquina de papel. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é estudar o processo produtivo de papel e celulose e as correlações entre o processo e as propriedades de alvura e viscosidade para a polpa final de celulose. Foram analisadas as especificações de viscosidade e alvura da polpa, a partir de análises realizadas em laboratório e dados online de monitoramento do processo. Os valores foram tratados, e mediu-se o grau de correlação a partir do coeficiente de Pearson. A partir dos resultados encontrados, pode-se perceber a importância da entrega de uma polpa com a alvura e viscosidade adequada às especificações, assim, geralmente ocorre uma degradação dos carboidratos, paralela à remoção e modificação da lignina. Dessa forma, é importante o estabelecimento de um ponto de equilíbrio entre todas as variáveis de controle do branqueamento. A partir dos resultados obtidos, pode-se perceber que conhecer o comportamento das propriedades finais de alvura e viscosidade da polpa e o comportamento de variáveis secundárias ao longo do processo é de fundamental importância para prever o processo e entender os impactos das variações da qualidade da polpa no processo de produção de papel.

Palavras chave: Alvura. Viscosidade. Processo kraft.

ABSTRACT

In the world scenario of planted trees, Brazil is the largest exporter of pulp and continues to grow with exports and paper production, with eucalyptus being the main source of wood in the pulp production process. Through the kraft process, chemical and mechanical energy is applied to extract cellulose, which is the main component of plant cells. After the process, the cellulose pulp from the fiberline is fed into the paper machine tower. The machine removes water from the sheet, which operate in the forming, wet presses and drying sectors. Paper is composed of a set of interwoven fibers, with the major part made up of cellulose. Among the various applications for paper, it can be used for printing and writing. When we talk about a process measured by the temporal behavior of each variable, it is possible to visualize the direct and indirect correlations of the pulp production parameters with the parameters of the pulp that feeds the paper machine. In this sense, the objective of this work is to study the production process of paper and cellulose and the correlations between the process and the properties of whiteness and viscosity for the final cellulose pulp. The pulp viscosity and whiteness specifications were analyzed, based on analyzes carried out in the laboratory and on-line process monitoring data. The values were treated, and the degree of correlation was measured using the Pearson coefficient. From the results found, it can be seen the importance of delivering a pulp with the appropriate whiteness and viscosity to the specifications, thus, there is usually a degradation of carbohydrates, parallel to the removal and modification of lignin. Thus, it is important to establish a balance point between all the whitening control variables. From the results obtained, it can be seen that knowing the behavior of the final properties of pulp whiteness and viscosity and the behavior of secondary variables throughout the process is of fundamental importance to predict the process and understand the impacts of variations in the quality of the pulp. pulp in the paper production process.

Keywords: Whiteness. Viscosity. Kraft process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Destino das exportações de papel e celulose.....	3
Figura 2 – Principais produções mundiais de celulose.....	4
Figura 3 – Esquema do processo kraft de celulose.....	6
Figura 4 – Fluxograma de operação do pátio de madeira.....	7
Figura 5 – Polpa após cozimento, polpa após deslignificação e polpa branqueada.	10
Figura 6 - Fluxograma do branqueamento.	10
Figura 7 - Fotomicrografia da superfície do papel.	11
Figura 8 - Esquema da máquina de papel.....	12
Figura 9 – Representação das fibras com e sem refilo.	13

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Correlação e Valor-p para viscosidade final (PO).....	21
Tabela 2 – Correlação e Valor-p para alvura final	22

LISTA DE SÍMBOLOS

ClO₂ - Dióxido de Cloro

H₂O₂ - Peróxido de Hidrogênio

NaOH - Hidróxido de Sódio

n - Número de observações

s_x - Desvio padrão da amostra para a primeira variável em Pearson

s_y - Desvio padrão da amostra para a segunda variável em Pearson

\bar{x} - Média da amostra para a primeira variável em Pearson

\bar{y} - Média da amostra para a segunda variável em Pearson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1	Cenário de mercado e produção de papel e celulose.....	3
2.2	A celulose.....	4
2.3	O processo de extração de celulose - kraft.....	5
2.3.1	Silvicultura.....	6
2.3.2	Pátio de madeira.....	6
2.3.3	Cozimento.....	7
2.3.4	Depuração.....	8
2.3.5	Lavagem.....	9
2.3.6	Pré-branqueamento.....	9
2.3.7	Branqueamento.....	9
2.4	O papel.....	11
2.5	Processo de produção do papel.....	12
2.6	Variabilidade.....	14
2.7	Propriedades.....	15
2.7.1	Kappa.....	15
2.7.2	Viscosidade.....	16
2.7.3	Alvura.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	Determinação da alvura em polpa de celulose.....	18
3.2	Determinação da viscosidade em polpa de celulose.....	18
3.3	Extração de dados de viscosidade, alvura e demais variáveis do processo.....	19
3.4	Tratamento estatístico.....	19
3.5	Correlação de Pearson.....	19
3.6	Valor-p.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21

4.1	Correlações para viscosidade.....	21
4.2	Correlações para alvura	22
5	CONCLUSÕES	25
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O setor de papel e celulose é um dos mais competitivos do país, sendo o Brasil o maior exportador de celulose no mercado mundial (IBA, 2020).

A celulose é um polímero de cadeia longa, classificado como polissacarídeo ou carboidrato, sendo em termos de massa, um dos principais componentes das paredes celulares da madeira. No Brasil, a principal fonte de madeira utilizadas para a obtenção da polpa celulose é o eucalipto. (BIAZUS, 2010).

Posterior ao cultivo e colheita, a madeira é descascada e picada em pedaços menores, denominados cavacos. Os cavacos, após passar por um processo de seleção, são submetidos a processos mecânicos e químicos para a produção da celulose. No cozimento, há a separação das fibras de celulose da lignina, substância que une essas fibras, aumentando a rigidez da parede celular vegetal. Posteriormente, as fibras celulósicas formam uma pasta marrom que, na próxima etapa, passa por uma série de processos e reações químicas, responsáveis por depurar, lavar e branquear essa polpa até a alvura desejada. Em fábricas integradas, a polpa de celulose é bombeada para a máquina de papel (IBA, 2021).

Segundo Foelkel (2007), na máquina de papel busca-se alta produtividade, eficiência operacional, baixo custo de produção e a qualidade uniforme no processo e nos produtos. Para isso, a matéria-prima deve ser a mais uniforme possível, com características em uma faixa estreita de variação.

A mínima variabilidade garante a uniformização da refinação, adições de produtos químicos, drenagem, consumo de vapor e de energia elétrica, consolidação da folha, propriedades físico-mecânicas e óticas do papel (FOELKEL, 2009). A variabilidade da polpa de celulose está relacionada a uma série de propriedades que estão diretamente relacionadas à performance de seu processo de conversão e produtos fabricados. No entanto, muitas vezes o portfólio de propriedades avaliadas não é suficiente para prever o comportamento das polpas (FOELKEL, 2007). Dessa forma, torna-se pertinente avaliar propriedades secundárias, que correlacionam com as propriedades finais da polpa, além das especificações da polpa que alimentam o papel em uma fábrica integrada.

Com o mercado cada vez mais exigente e competitivo, aplicações de controle de processo garantem o aumento da rentabilidade do processo e qualidade da produção industrial. Em 2020, uma pesquisa realizada pela empresa Suzano S/A com clientes mostrou a estabilidade da qualidade foi o parâmetro mais apontado como imprescindível para avaliação da qualidade

do produto. A pesquisa também destacou que uma vez conhecidos o controle das variáveis do produto, a estabilidade do seu processo de fabricação é garantida.

Conhecer a variabilidade das variáveis chaves de processo se apresenta como um dos principais caminhos para quantificar os benefícios potenciais de melhoria de controle de processo, como aumento da capacidade de produção da unidade, decréscimo de produtos fora de especificação, melhoria na operabilidade e melhoria na qualidade final do produto. A maior estabilidade do processo assegura que as especificações do produto sejam melhores atendidas

A variabilidade de polpa é de fundamental importância para garantir a estabilidade de processo da máquina de papel, além de possibilitar a visão das variáveis dentro das faixas de controle. Quando falamos de um processo mensurado pelo comportamento temporal de cada variável, é possível visualizar as correlações diretas e indiretas dos parâmetros da produção de celulose com os parâmetros da polpa utilizada para obter o produto papel.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar o processo produtivo de papel e celulose e as correlações entre o processo e as propriedades de alvura e viscosidade para a polpa final de celulose.

No intuito de atender o objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos são os listados a seguir:

- a) Estudar o processo de fabricação de celulose;
- b) Estudar o processo de fabricação de papel;
- c) Correlacionar as variáveis da linha de fibras com as variáveis da polpa final;
- d) Estudar a interferência da qualidade das variáveis da polpa de celulose que alimenta a máquina de papel.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentadas: a visão do papel e celulose no setor de árvores plantadas relacionada a exportação e produção, além da composição da madeira e importância da celulose. Também é abordado o processo produtivo de extração de celulose, desde a plantação até a entrega do produto. No intuito de complementar a cadeia de produção, também são apresentadas as definições e aplicabilidades do papel, processo produtivo, a importância da mínima variabilidade para o papel e as principais variáveis apresentadas no trabalho.

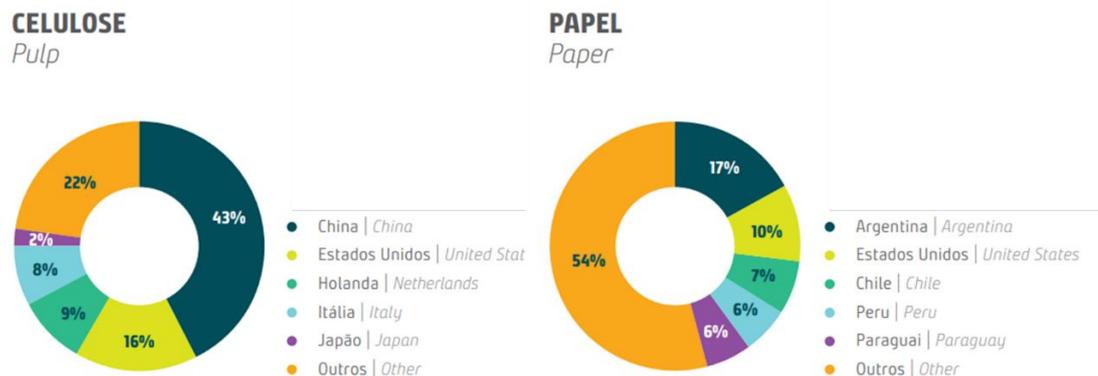
2.1 Cenário de mercado e produção de papel e celulose

O setor de papel e celulose é um dos mais competitivos do país, uma vez que possui padrão de qualidade equivalente aos melhores do mundo e atua em um mercado globalizado extremamente ativo (SOUZA, 2008).

A celulose é uma matéria-prima aplicada na produção de materiais como papel para imprimir e escrever, embalagens, livros e revistas, papel higiênico e papéis especiais (SUZANO, 2020).

Segundo o relatório anual do Instituto Brasileiro de Árvores (2020), o Brasil continua sendo o maior exportador de celulose no mercado mundial. No último ano os principais destinos foram a China (43%) e Estados Unidos (16%). No setor de árvores plantadas, a celulose representa 66% dos produtos exportados, enquanto o papel, segundo produto desta lista, representa 18%. Entre os destinos internacionais das vendas de papel destaque para a América do Sul com 49%, sendo a Argentina responsável por 17%, conforme apresentado na Figura 1.

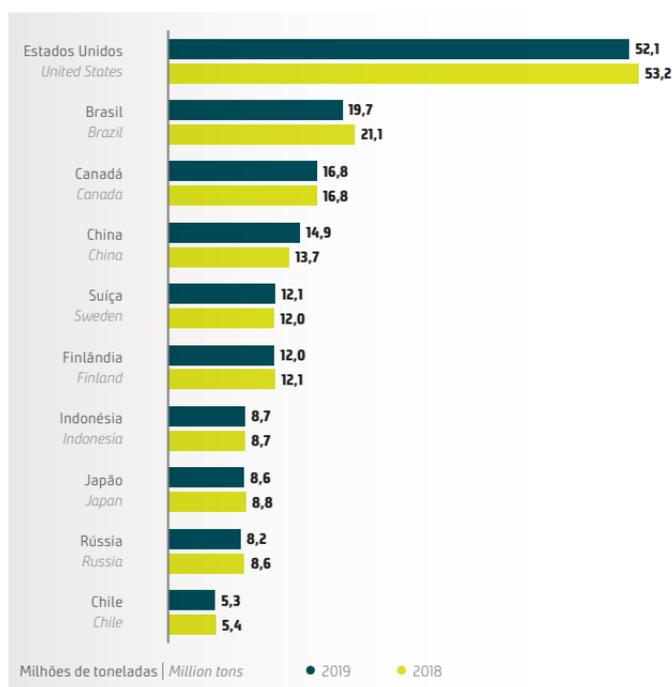
Figura 1 – Destino das exportações de papel e celulose.



Fonte: IBA (2020).

De toda a produção de celulose do Brasil, 75% foi destinada para exportação, totalizando 14,7 milhões de toneladas. O mercado interno foi responsável pelo consumo de 5,2 milhões de toneladas. Em 2019, o País se manteve como segundo maior produtor, atingindo 19,7 milhões de toneladas fabricadas, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Principais produções mundiais de celulose.



Fonte: IBA (2020).

A produção de papel no Brasil subiu 1,0% em 2019, somando 10,5 milhões de toneladas. As exportações cresceram 7,2% em relação ao ano anterior, registrando um total de 2,2 milhões de toneladas (IBA, 2020).

2.2 A celulose

A madeira, matéria utilizada para a extração de celulose, é composta por múltiplas camadas ligadas por fibras e tem a lignina como agente ligante (Campos, 2011).

A celulose é uma das principais componentes das células vegetais e aparece, principalmente, sob a forma de fibras (TRUGILHO et al., 1996). O conjunto de moléculas de celulose agregadas forma microfibrilas em que regiões organizadas (cristalinas) se alternam com regiões desorganizadas (amorfas). As microfibrilas se agrupam formando as fibrilas e essas

constituem as fibras, que garantem resistência à tração e a insolubilidade da celulose a maioria dos solventes (D' ALMEIDA, 1998).

O eucalipto é a árvore mais plantada no mundo, com mais de 17,8 milhões de hectares. O Brasil é o segundo maior país em área plantada, com cerca de três milhões de hectares, ultrapassado apenas pela Índia (CAMPOS, 2011).

As coníferas, chamadas também de madeiras macias (*softwoods*), são as fontes principais de fibras longas, que possuem tamanhos típicos que variam de 3 a 5 mm. As angiospermas ou folhosas, também chamadas de madeiras duras (*hardwoods*), são as fontes principais de fibras curtas que possuem tamanhos típicos que variam de 1 a 2 mm (CAMPOS, 2011).

A madeira é colhida de florestas plantadas com a qualidade necessária para o processo, com um padrão de qualidade que engloba o crescimento, homogeneidade, produtividade, sempre com pesquisas de melhoria de plantações, em função do produto (REIS,2014).

As fibras provenientes de folhosas, tem principal utilização para papéis que não exijam altos valores de resistência físico-mecânica, mas que possam ter boa formação, superfície bastante homogênea, boa opacidade, como é o caso dos papéis para imprimir e escrever (CAMPOS, 2011).

A celulose pode ser aplicada na produção As indústrias de produção de celulose são fabricantes exclusivas de celulose, as indústrias integradas são fábricas de papel e celulose e as indústrias produtoras de papel são fabricantes exclusivos de papel. Nesse trabalho, trata-se de um caso de uma fábrica de produção integrada.

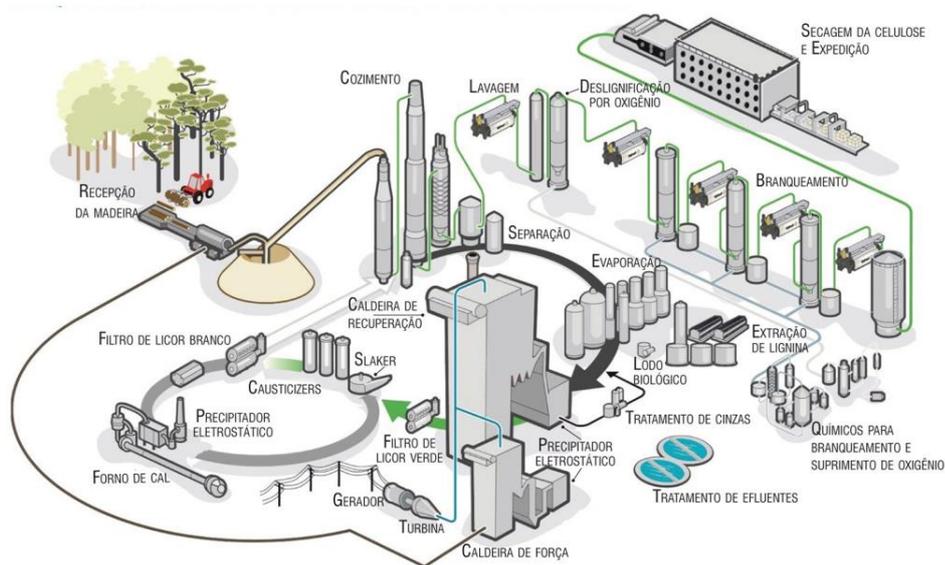
2.3 O processo de extração de celulose - kraft

O processo de polpação de celulose se resulta da aplicação de energia química e/ou mecânica, sendo o processo kraft um dos principais processos alcalinos na produção de pastas químicas. Este foi utilizado comercialmente pela primeira vez em 1885 na Suécia, com o objetivo de separar a lignina da celulose e hemicelulose com o mínimo de degradação das fibras. (CAMPOS, 2011).

Entre as vantagens do processo kraft, pode-se citar a flexibilidade de espécies de madeira, tempo de cozimento mais curto, recuperação do licor do cozimento e obtenção da polpa com alto nível de alvura e resistência mecânica. Em contrapartida, há um alto investimento e no branqueamento da pasta de celulose, odor de gases produzidos no processo, baixa alvura da pasta não branqueada e baixo rendimento de polpação.

O esquema de um processo de produção de celulose kraft é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema do processo kraft de celulose.



Fonte: Valmet (2019).

O processo de extração de celulose inicia na silvicultura, com o melhoramento das plantas. Após o cultivo e colheita, a madeira é recebida na indústria, cortada em cavacos que são cozidos no processo de extração de celulose. Posterior ao cozimento, a polpa é lavada, depurada e branqueada. Em fábricas integradas, a polpa de celulose alimenta a torre da máquina de papel para produção. Abaixo, os tópicos mencionados são descritos.

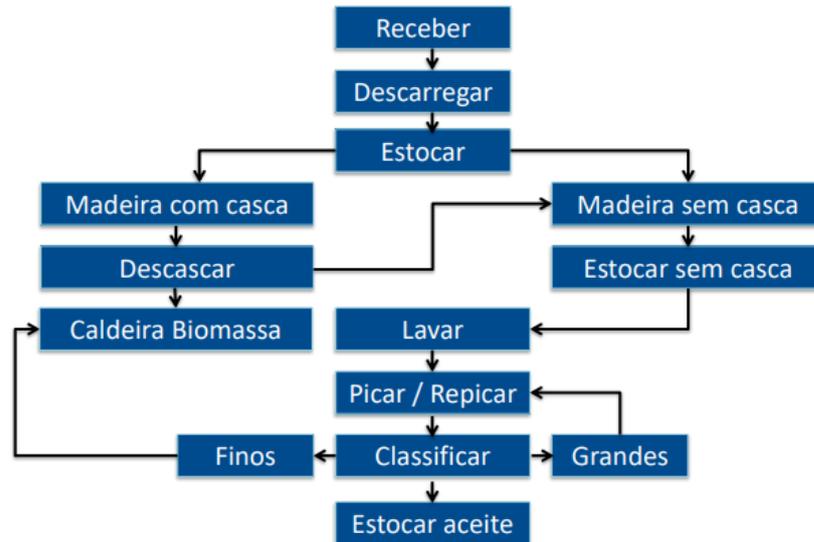
2.3.1 Silvicultura

Na silvicultura, há a seleção de populações, famílias e indivíduos mais adeptos, considerando as características das árvores para determinada região, tipo de solo e clima. A partir de clones de eucalipto, originam-se árvores com maior rendimento, densidade, teor de celulose e menor tempo de colheita, aumentando assim a eficiência do processo produtivo. Até que alcancem a idade de serem plantados na floresta, os clones são plantados e cultivados em viveiro (REIS, 2014).

2.3.2 Pátio de madeira

Após o cultivo, crescimento e colheita das árvores plantadas, a madeira é preparada no pátio de madeira, onde ocorre as operações até a obtenção de cavacos, na quantidade e qualidade no intuito de alcançar o melhor desempenho no processo. Na Figura 4, o fluxograma de operações do pátio de madeira.

Figura 4 – Fluxograma de operação do pátio de madeira.



Fonte: Reis (2014).

As cascas, quando vão para o processo prejudicam a qualidade da polpa, danificando faca dos picadores e aumentando o consumo de produtos químicos nos digestores e branqueamento. As madeiras descascadas são descarregadas por grua e transportada pelas chamadas esteiras transportadoras. As toras são lavadas e enviadas aos picadores, onde as toras são fragmentadas em cavacos, buscando facilitar a penetração do licor branco no cozimento. Os cavacos são classificados em um conjunto de peneiras vibratórias, em grandes, médios pequenos e finos. A dimensão do cavaco é muito importante no processo de cozimento, uma vez que cavacos com comprimentos maiores podem prejudicar a impregnação e gerar maior teor de rejeitos, enquanto medidas reduzidas ocasionam perda de resistência da polpa e rendimento. Em caso de altas espessuras, é necessário aumentar a carga de álcali, a temperatura e o tempo de cozimento para chegar no mesmo grau de deslignificação (REIS, 2014).

2.3.3 Cozimento

O cozimento consiste na separação das fibras de celulose compactadas a partir da dissolução da lamela média composta por lignina, a partir da combinação de produtos químicos, pressão e temperatura.

Neste processo há a impregnação dos cavacos, que consiste na expulsão de todo ar do interior, permitindo um tratamento químico e térmico idêntico a todas as fibras e a obtenção de um desfibramento uniforme.

Os cavacos são cozidos no digestor, vasos de pressão, na combinação de dois reagentes químicos, hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), denominada licor branco. (CAMPOS, 2011).

Eles são impregnados com o licor, conferindo uniformidade do cozimento, qualidade do produto e redução de rejeito. A temperatura é elevada pelo sistema de circulação forçado, através de trocadores de calor, até atingir a temperatura de cozimento. Na lavagem, introduz-se o licor de lavagem para parar a reação de deslignificação, reduzindo temperatura e carga alcalina. Os cavacos cozidos são resfriados e passam nas lâminas do fundo cônico para o *blow tank*, o qual recebe os cavacos cozidos pelo digestor, e tem características de um ciclone para efetuar a separação entre massa e lavagem (REIS, 2014).

Posteriormente, forma-se a massa marrom e um sub-produto, denominado “licor negro”. O licor negro é composto pela lignina, parte da madeira dissolvida, combinada com reagentes químicos utilizados no início do processo. No processo de recuperação, o sulfato de sódio é reduzido a sulfeto de sódio. Como resultado da queima obtém-se o calor, que gera os vapores e reagentes químicos fundidos. Os fundidos, após a dissolução e um tratamento adequado, transformam-se em licor branco, contendo reagentes químicos idênticos aos utilizados no início do processo de cozimento dos cavacos (CAMPOS, 2011). A polpa obtida é diluída para ser enviada para depuração e lavagem.

2.3.4 Depuração

No intuito de remover seletivamente os constituintes indesejáveis, como materiais superdimensionados e contaminantes, do fluxo de polpa marrom, buscando não danificar equipamentos ou comprometer a qualidade dos produtos, há o processo de depuração, onde as impurezas são separadas mecanicamente em sistemas de limpeza da polpa. As impurezas encontradas podem ser de origem fibrosa e não fibrosa. Os de origem fibrosa podem se caracterizar como cavacos não cozidos, feixes de fibras (*fiber bundles*), palitos (*shives*) e nós, a base de galho que está encaixado no tronco maior, enquanto os de características não fibrosas

são os metálicos (porcas, parafusos, grampos, pedaços de chapas, ferrugem de encanamentos, etc.) e os não metálicos (pedras, areia, abrasivos, vidros, plásticos, cascas, argamassa dos tanques, azulejos, etc.) (REIS, 2014).

A separação é feita em peneiras ou cestos, com diferentes tipos de malhas e a alta taxa de rejeito antes da lavagem pode indicar baixa uniformidade no processo de cozimento, má circulação do licor de cozimento e impregnação ineficiente dos cavacos.

2.3.5 Lavagem

Posterior a depuração, a polpa é lavada, no intuito de remover o licor residual que poderia contaminar a pasta, recuperar o máximo os reagentes químicos com uma diluição mínima e recuperar os constituintes da madeira dissolvidos no licor para utilizá-los como combustível. (KLOCK, 2005)

2.3.6 Pré-branqueamento

No pré-branqueamento é removido mais uma parte da lignina residual do cozimento, o que ocasiona uma grande redução da carga de poluentes na fase de branqueamento, reduzindo os custos de outros reagentes químicos usados no branqueamento (CAMPOS, 2011).

2.3.7 Branqueamento

A polpação química promove uma deslignificação da madeira, no entanto não é conduzido até o ponto de remoção total da lignina, uma vez que pode ocorrer a degradação da celulose e hemicelulose. Dessa forma, há na polpa a lignina residual, removida pelo processo de branqueamento que consiste em um tratamento físico-químico que tem por objetivo melhorar a pureza e as propriedades ópticas da polpa. (REIS, 2014). Algumas propriedades relacionadas com este processo são: alvura, limpeza e pureza química (CAMPOS, 2011). O branqueamento é realizado em múltiplos estágios, utilizando reagentes químicos para preservar ao máximo as propriedades, como resistência e alvura.

No branqueamento há o aumento da alvura da polpa, perda de rendimento, degradação dos carboidratos (queda de viscosidade) redução de *shives* e aumento da capacidade de absorção da polpa. As torres e reatores são projetadas no intuito de favorecer o contato das fibras com o

reagente, permitindo que a reação ocorra sob condições adequadas. No branqueamento os estágios iniciam-se com a adição dos produtos químicos à polpa e termina com a remoção dos produtos solubilizados (REIS, 2014). Na Figura 5 é apresentada a diferença do aspecto da polpa antes e após o processo de branqueamento.

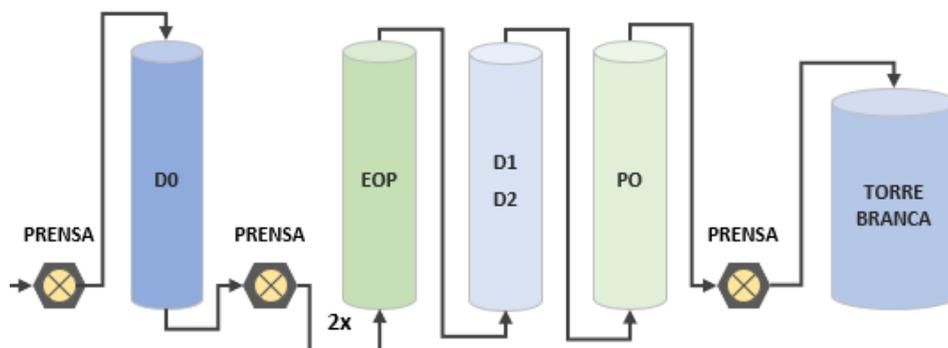
Figura 5 – Polpa após cozimento, polpa após deslignificação e polpa branqueada.



Fonte: Andritz (2012).

O processo de branqueamento é observado com o intuito de minimizar os custos operacionais, como otimização de custos de químicos, energia e custos com tratamento de fluentes e redução de perdas de rendimento. O Branqueamento do estudo inicia-se no DO e ocorre até a alimentação da torre de massa branqueada, conforme Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do branqueamento.



Fonte: SUZANO (2020).

Os estágios representados pela letra D referem-se a parte do processo que utilizam ClO_2 , enquanto nos tanques representados pela letra P, há a utilização de H_2O_2 . No estágio D0, ele reage rapidamente com a lignina e apenas em menor proporção com os carboidratos. É uma

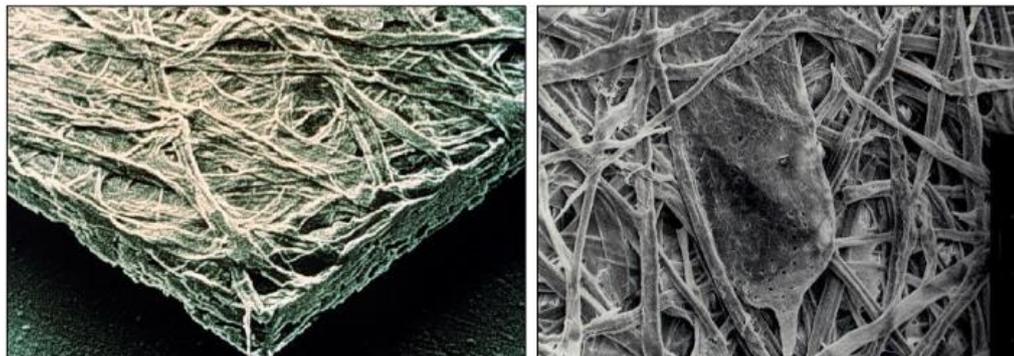
substância química de base clorada, utilizada geralmente em mais de uma posição na sequência do branqueamento. Em casa posição de utilização, o objetivo é diferente, portanto condições diferenciadas irão favorecer as reações desejadas. No estágio inicial, o ClO_2 é utilizado para remoção de lignina residual, enquanto nos estágios finais, é usado para remover compostos cromóforos, aumentando alvura da polpa e diminuindo a reversão de alvura. No estágio EOP, o NaOH neutraliza os fragmentos ácidos da lignina residual, removendo assim a lignina reagida da superfície das fibras, expondo mais lignina para os próximos estágios com agentes oxidantes. O H_2O_2 reage com os compostos cromóforos, aumentando a alvura da polpa. Os estágios D1 e D2, são instalados em posições após a redução do teor de lignina a valores bastantes reduzidos. Esse estágio do branqueamento é responsável por elevar a alvura pela oxidação de agentes cromóforos, utilizando ClO_2 . Quando a polpa chega no estágio PO, não há muita lignina restante, dessa forma, esse estágio não possui função de deslignificação, no entanto, ocorrem reações com os grupos cromóforos da lignina (ANDRITZ, 2012).

2.4 O papel

O papel pode ser definido por fibras vegetais unidas fisicamente entrelaçadas a modo de malha e quimicamente, por pontes de hidrogênio, com características para imprimir e escrever. (CAMPOS, 2011)

A maior parte da composição do papel é constituída a partir da celulose, que é o insumo mais importante no processo. Além desta, também são utilizadas matérias-primas não fibrosas, como cargas minerais, agentes de colagem, amidos e corantes (PIOTTO, 2003). As fibras entrelaçadas que formam a superfície do papel podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7 - Fotomicrografia da superfície do papel.



Fonte: CAMPOS, 2011.

Os papéis são classificados em função de sua aplicação final, tais como: impressão, escrita, embalagens leves e pesadas e sanitários (FOELKEL, 2009). Há uma variedade enorme de aplicações que, pela sua extensão, são consideradas como especiais.

O papel para imprimir e escrever é aquele cujo destino é serem escritos ou impressos por qualquer um dos processos existentes.

O papel offset, papel de impressão, com ou sem revestimento, fabricado com pasta química branqueada, possui como principais atributos a elevada resistência superficial no intuito de suportar a aplicação de tintas, força de ligação interna para resistir à delaminação, resistência ao arrancamento, resistência à água, estabilidade dimensional, planicidade, umidade relativa controlada, boa rigidez e tendência ao encanoamento reduzida. No caso de impressoras rotativas, além destas, o papel deve ter elevada resistência à dobra, à bolha, à tração e ao calor, seu conteúdo de umidade deve ser menor e as bobinas devem ter poucas emendas e ausência de ovalizações e defeitos (FOELKEL, 2009).

2.5 Processo de produção do papel

A função da máquina de papel é remover água da folha, e funciona em três setores que operam baseados na formação, prensas úmidas e seção de secagem. Na formação há o desaguamento utilizando as características hidrodinâmicas do líquido, nas prensas úmidas o desaguamento ocorre por compressão mecânica enquanto na seção de secagem acontece por evaporação, por meio do fornecimento de calor nos cilindros secadores. (Campos, 2011). O esquema da máquina de papel é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema da máquina de papel.



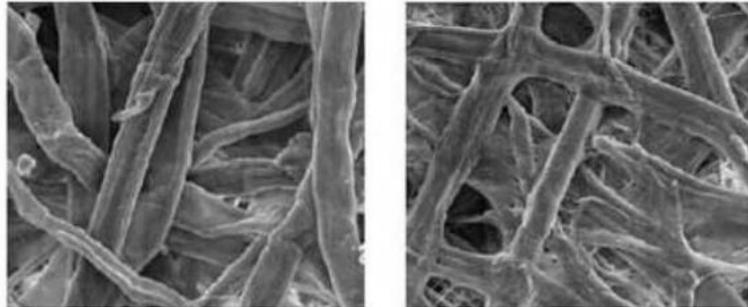
Fonte: Suzano (2020).

Em fábricas de papel integradas ao processo de produção de celulose, a chegada da fibra ocorre por tubulações como suspensão.

A depuração destina-se a retirar sujeiras e outros corpos estranhos, que são indesejáveis para a aparência e finalidade da folha de papel (Suzano, 2020).

Na refinação da pasta de celulose há o tratamento mecânico das fibras, no intuito de melhorar a capacidade das fibras unirem-se umas às outras, a fim de que seja possível a obtenção de uma folha de papel homogênea e resistente aos esforços mecânicos. Na Figura 9 são apresentadas as fibras sem refino e refinadas.

Figura 9 – Representação das fibras com e sem refino.



Fonte: FOEKEL (2009).

A preparação de massa e a unidade de formação da máquina de papel é unida pelo circuito de aproximação, cuja principal funcionalidade é o transporte da suspensão até a máquina, proporcionando um fluxo estável, homogêneo e limpo. Um bom circuito de aproximação possui estabilidade de fluxo e controle satisfatório, boa mistura e dispersão de fibras e sistema de limpeza e facilidade para lavagem (CAMPOS, 2011).

A alimentação da suspensão fibrosa para a máquina de papel deve ser realizada de maneira uniforme, fluxo regular e homogêneo e velocidade constante e compatível com a velocidade da tela. A caixa de entrada é alimentada por um conjunto de tubos múltiplos que recebem a massa, sob pressão dos depuradores (CAMPOS, 2011).

A massa é distribuída em uma tela formadora, obtendo uma folha de papel uniforme, com gramatura e espessura pré-estabelecidas. Posterior a formação, a folha é transportada pela tela após deixar o rolo de sucção, e a caixa de vácuo desse rolo está colocada de tal maneira para que não haja respingos de água na tela, havendo a transferência da folha da etapa de formação para a prensagem.

A prensagem é feita com rolos de sucção ou rolos ventilados que possuem capacidade de remoção de água muito maior que as prensas de rolos lisos. A remoção da água é efetuada pela ação combinada da compressão mecânica e da sucção, aplicada através da estrutura porosa do rolo inferior (SUZANO, 2020).

Na pré-secagem, a folha de papel passa por cilindros secadores superiores e inferiores, com temperatura controlada para maior uniformidade. Na secagem a folha é exposta à aplicação intermitente de calor e taxas variáveis de remoção de vapor.

A secagem de folhas em cilindros aquecidos subdivide-se em quatro etapas. A primeira tem duração curta e compreende o período quando a folha entra em contato com o cilindro secador sem estar envolvido pela tela secadora. Devido à duração curta deste período, quase não há evaporação, ocorrendo apenas aquecimento. Na segunda etapa, a folha está entre a superfície quente do secador e a tela secadora; nesta etapa há um rápido aquecimento e o processo de vaporização se inicia. A folha se aquece, estabelecendo uma diferença de temperatura entre seus dois lados (REIS, 2014).

A aplicação de produtos químicos como amido, colas de dextrina, parafina, é chamada de colagem superficial do papel. Após a aplicação no papel parcialmente seco, com a prensagem da folha em temperaturas adequadas, obtém-se um revestimento que proporciona uma redução nos diâmetros dos poros (espaço entre as fibras) preenchendo estes espaços na folha, dificultando assim a penetração de líquidos, gases ou vapores por esses poros.

A calandragem é constituída por um conjunto de rolos metálicos, montados uns sobre os outros num cavalete que os sustenta. Consta também, com um dispositivo que permite controlar a pressão de encosto entre os rolos, de forma independente para o lado do acionamento (LA) e o lado do comando (LC), além do centro, através do dispositivo de abaulamento. A função da calandra é basicamente intensificar as características de lisura e brilho do papel que será fabricado. Estes efeitos são conseguidos reorientando-se as fibras superficiais, ou o recobrimento aplicado à superfície do papel, por meio de pressão e fricção entre os rolos de grande dureza e lisura superficial (polidez), com a intenção que a fibra adquira a aparência de lisura dos rolos da calandra (CAMPOS, 2011).

A seção de enrolamento ou de corte é a última seção da máquina de papel. Na enroladeira o processo deixa de ser contínuo e passa a ser constituído por unidades finitas, no intuito de facilitar a sua manipulação e utilização posterior. O enrolamento tem por função a formação de rolos Jumbo, os quais, posteriormente, seguem para as seções de acabamento (SUZANO, 2020).

2.6 Variabilidade

Conhecer as variáveis importantes na produção do papel torna possível medir, gerenciar e otimizar melhor o desempenho do processo e das polpas celulósicas utilizadas. Alterações da

qualidade da polpa, mesmo que pareçam vantajosas, tendem a desestabilizar o processo de fabricação. Mudanças serão estabilizadas quando houver ajustes de máquina e processo (FOELKEL, 2009).

Na fabricação do papel busca-se atrelar produtividade, eficiência operacional, qualidade, segurança e custos de produção. Para uma elevada produtividade exige velocidade de máquina, rápida drenagem na mesa plana, alta consistência pós prensas úmidas e mínimo número de quebra de folhas. A eficiência operacional consiste em um número reduzido de quebras, poucos problemas, pouco refugo e poucas paradas. O quesito qualidade representa a máxima porcentagem de papel dentro das especificações e geração mínima de perdas e refugos.

Para alcançar essas metas, a matéria-prima deve ser a mais uniforme possível, com características em uma faixa estreita de variação, a fim de não causar fortes impactos e indesejáveis surpresas no processo de produção do papel (FOELKEL, 2007).

As propriedades da polpa de celulose podem ser relacionadas a performance operacional. Essas relações são resultado das propriedades da madeira, processo de conversão da madeira em celulose e outras da interação madeira e processo, como a viscosidade, degradação das cadeias de carboidratos, resistência das fibras, teor de hemiceluloses, teor de finos (FOELKEL, 2007).

A alimentação de uma polpa de celulose com mínima variabilidade, resulta na uniformização da refinação, adições de produtos químicos, drenagem, consumo de vapor e de energia elétrica, consolidação da folha, propriedades físico-mecânicas e óticas na máquina de papel.

As dificuldades mais comumente encontradas no setor papelero é a capacidade de refinação, drenagem e retenção na mesa plana, velocidade da máquina de papel, disponibilidade de vapor, consolidação da folha úmida, resistências a úmido ou a seco, uniformidade do produto final.

Dessa forma, o tipo de gargalo fabril que o papelero possui ajudará a ele a definir de uma forma ou de outra as especificações de sua celulose que será consumida para fabricar o seu papel (FOELKEL, 2009).

2.7 Propriedades

2.7.1 Kappa

O grau ou efeito do cozimento no processo de extração de celulose depende de fatores como a qualidade da madeira, a quantidade de reagentes químicos aplicados e tempo de cozimento. O grau de cozimento interfere na lignina residual remanescente nas paredes das fibras é determinado pelo número kappa. O teor de lignina residual é usado para avaliar a intensidade da deslignificação nos estágios ao longo do processo, indicando a quantidade de reagentes de branqueamento que será necessária nos estágios posteriores para que a polpa final esteja dentro das especificações de qualidade. O kappa é calculado a partir da oxidação da lignina, contida em uma amostra de polpa pelo permanganato de potássio em meio ácido. Acompanhar o kappa é a forma mais importante de se acompanhar o comportamento do processo (CAMPOS, 2011).

2.7.2 Viscosidade

A viscosidade, grau de polimerização, indica a degradação da fibra é o comprimento das cadeias de celulose existentes na polpa. A viscosidade é uma das propriedades mais discutidas como referência da qualidade de polpas de celulose. Os métodos de determinação da viscosidade são tradicionalmente adotados como referência para o grau de degradação química da celulose causada pelos processos de cozimento e de branqueamento. A definição de limites para viscosidade continua sendo alvo de fabricantes de papéis na busca de melhorias de qualidade e desempenho de máquinas. (FOELKEL, 2007).

A celulose é uma cadeia longa de moléculas, formada por unidades de glicose. As ligações por ponte de hidrogênio fazem a estrutura da celulose estável, conferindo resistência a polpa. Quanto maior a cadeia, maior a viscosidade da polpa e sua resistência. Durante o processo da linha de fibras, o objetivo é remover componentes indesejáveis da madeira, preservando a cadeia e dessa forma preservando a resistência (ANDRITZ, 2012).

2.7.3 Alvura

A alvura é um indicativo de qualidade tanto para polpa de celulose quanto para o papel, sendo de fundamental importância para determinar quão branco é o papel. Alvura é a refletância da amostra quando comparada com a refletância de uma superfície padrão de óxido de magnésio, no comprimento de onda específico de 457 nm. Quanto maior a refletância na luz azul, mais branco aparenta ser o papel. O resultado é expresso em porcentagem. A alvura

exigida depende da finalidade da polpa celulósica. (FOELKEL, 2007). A alvura é a combinação de absorção e dispersão de luz, dessa forma, a polpa passa pelo processo de branqueamento no intuito de remover as moléculas que contém cor, o que reduz a absorção da luz da polpa branqueada consideravelmente em relação a polpa na entrada do branqueamento. Alvura é melhorada pela dissolução de grupos que possuem alta absorção da luz, como por exemplo, a lignina. Quanto menor o teor de lignina, mais seletiva a substância precisa ser. A alvura final da polpa branqueada é resultado de vários estágios, uma vez que diferentes substâncias químicas reagirão com diferentes grupos (ANDRITZ, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste tópico são descritos os padrões observados de monitoramento das variáveis respostas da polpa feito em laboratório na frequência de 8h em 8h no laboratório de processos da Unidade de Mucuri da Suzano, as variáveis do processo de produção de celulose, a forma de extração de dados e as análises estatísticas aplicadas e utilizadas.

3.1 Determinação da alvura em polpa de celulose

Inicialmente, foi confeccionada uma folha de cerca de 2 g, usando o formador de folhas e água desmineralizada. As folhas foram prensadas, retiradas e colocadas para secar em cabine de recirculação de ar durante 1 hora. Posteriormente, a leitura da alvura foi feita usando o Elrepho 3000, espectrofotômetro confiado para a indústria de papel. A folha foi dobrada e foi feita a leitura do outro lado. Anotou-se a média entre ambas as leituras (Suzano, 2020). Os valores foram inseridos no PI System, portfólio integrado de software para coletar, armazenar, visualizar, analisar e compartilhar dados operacionais com usuários dentro e fora da empresa (OSISOFT, 2021).

3.2 Determinação da viscosidade em polpa de celulose

Conforme descrito no procedimento de viscosidade intrínseca da celulose disponibilizado pela Suzano (2021), a partir das amostras para análises de rotina, foi separado um corpo de prova para a determinação da viscosidade. Parte do corpo de prova foi cortado manualmente em pedaços menores e foi pesado, enquanto o restante da amostra foi pesado e levado para a estufa por 30 minutos, no intuito de obter o teor de seco da amostra teste.

A parte da amostra cortada manualmente foi colocada no frasco de dissolução, com 25 mL de água, contendo de 5 a 10 peças de fio de cobre. O frasco foi fechado e agitado, usando um dispositivo de agitação até a polpa estar completamente desagregada. Posteriormente, adicionou-se 25 mL de solução de etilenodiamina cúprica (CED), expelindo todo o ar residual e agitando o frasco.

O frasco contendo CED e polpa devidamente fechado foi colocado no banho termostático para condicionar a solução à temperatura de $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. O frasco da amostra foi suspenso embaixo do tubo do viscosímetro de modo que o final do tubo estivesse abaixo da superfície da solução. A primeira amostra foi realizada para ambientar o capilar. As duas outras

amostras foram computadas como o valor médio entre os resultados. Os valores foram inseridos no PI System.

3.3 Extração de dados de viscosidade, alvura e demais variáveis do processo

O PI DataLink é um suplemento do Microsoft Excel que permite recuperar informações do seu PI Server diretamente para uma planilha, oferecendo ferramentas para coletar, monitorar, analisar e relatar dados e pontos do PI System. Um ponto do PI é um fluxo de dados reais de uma fonte definida e é descrito por um nome de tag correspondente, além de outros atributos. Os dados medidos de forma online no processo e os lançados pelo laboratório foram extraídos em intervalo de 8 em 8 horas, durante um período de 3 meses de produção.

3.4 Tratamento estatístico

Para a análise estatística utilizou-se o Minitab 2020. Para garantir a validação dos resultados das correlações, considerou-se as diretrizes dos dados incluírem no mínimo 2 colunas de dados, todas as colunas terem o mesmo número de linhas, dados contínuos ou ordinais, amostragem com $n \geq 25$ e relação linear entre as variáveis. A normalidade dos dados foi verificada a partir do teste Shapiro-Wilk, a 5% de significância. Uma vez que valores incomuns podem exercer forte impacto sobre os resultados, foram desconsiderados ritmos reduzidos de cozimento e branqueamento. Foi utilizada a correlação linear simples (Pearson) para verificar a correlação entre atributos de processo e as variáveis alvura e viscosidade da polpa de celulose após o branqueamento.

3.5 Correlação de Pearson

O Coeficiente de correlação de Pearson mede o grau de relação linear entre duas variáveis. O coeficiente de correlação assume um valor entre -1 e +1. Se uma variável tende a aumentar à medida que as outras diminuem, o coeficiente é negativo. Por outro lado, se as duas variáveis tendem a aumentar em conjunto, o coeficiente de correlação é positivo (Minitab, 2021). A correlação de Pearson é demonstrada na Equação 1.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (1)$$

Onde: \bar{x} é a média da amostra para a primeira variável, s_x o desvio padrão da amostra para a primeira variável, \bar{y} a média da amostra para a segunda variável, s_y o desvio padrão da amostra para a segunda variável e n o número de observações.

3.6 Valor-p

O valor-p é utilizado para determinar se o coeficiente de correlação é estatisticamente significativo. No presente trabalho, utilizou-se um nível de significância de 0,05. Uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

Se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, a correlação é estatisticamente significativa. Se o valor-p for maior do que o nível de significância, não se rejeita a hipótese nula, ou seja, a correlação não é estatisticamente significativa (Minitab, 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das correlações obtidas nas análises estatísticas de correlação de Pearson para viscosidade e alvura ao longo do processo.

4.1 Correlações para viscosidade

Abaixo, na Tabela 1 são apresentadas as correlações de Pearson e o valor-p para a viscosidade da polpa final e as variáveis do processo de produção.

Tabela 1 – Correlação e Valor-p para viscosidade final (PO).

Variável 1	Variável 2	Correlação	Valor-p
Kappa entrada branqueamento	Kappa saída cozimento	0,537	0,000
Viscosidade no digestor	Kappa saída cozimento	0,567	0,000
Viscosidade saída do pré	Kappa saída cozimento	0,305	0,000
Viscosidade saída EOP	Kappa saída cozimento	0,111	0,093
Viscosidade PO	Kappa saída cozimento	0,096	0,150
Viscosidade no digestor	Kappa entrada branqueamento	0,562	0,000
Viscosidade saída do pré	Kappa entrada branqueamento	0,633	0,000
Viscosidade saída EOP	Kappa entrada branqueamento	0,307	0,000
Viscosidade PO	Kappa entrada branqueamento	0,223	0,001
Viscosidade saída do pré	Viscosidade no digestor	0,58	0,000
Viscosidade saída EOP	Viscosidade no digestor	0,438	0,000
Viscosidade PO	Viscosidade no digestor	0,385	0,000
Viscosidade saída EOP	Viscosidade saída do pré	0,688	0,000
Viscosidade PO	Viscosidade saída do pré	0,588	0,000
Viscosidade PO	Viscosidade saída EOP	0,854	0,000

Fonte: Do autor (2020).

A viscosidade é tradicionalmente utilizada para monitorar a degradação da polpa de celulose ao longo do processo devido a sua relação com o grau de polimerização.

A partir do Valor-p, mostrado na Tabela 1, pode-se perceber que a correlação não é estatisticamente significativa entre o kappa de saída do cozimento e viscosidade da saída de EOP e viscosidade PO, uma vez que o valor-p é maior que 0,05.

No entanto, ao comparar o kappa da entrada do branqueamento do processo com os valores de viscosidades em diferentes pontos, encontra-se uma correlação positiva e estatisticamente significativa, ou seja quanto maior o kappa, maior a viscosidade, indicando

que a polpa está mais preservada. Além disso, como reflexo do processo, quanto maior a viscosidade em outras etapas do processo, maior a viscosidade na saída do branqueamento.

Almeida (2003) cita que o aumento da carga de álcali efetivo influencia de maneira expressiva a viscosidade da polpa, estando esse comportamento de acordo com estudos conduzidos anteriormente.

Vasconcelos Dias & Cláudio-da-Silva Jr. (1985) descreve que a viscosidade e o teor de sólidos apresentaram valores significativamente mais altos quando obtidos a partir da polpação de madeiras mais densas, com consequentes sobrecargas no sistema de recuperação, o que poderia limitar a capacidade de produção de polpa.

4.2 Correlações para alvura

Na Tabela 2 são apresentadas as correlações de Pearson e o valor-p para a alvura da polpa final e as variáveis do processo de produção.

Tabela 2 – Correlação e Valor-p para alvura final

Variável 1	Variável 2	Correlação	Valor-p
Alvura entrada branqueamento	Kappa saída cozimento	0,017	0,800
Kappa entrada branqueamento	Kappa saída cozimento	0,537	0,000
Carga de ClO ₂ na DO	Kappa saída cozimento	0,247	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na EOP	Kappa saída cozimento	-0,015	0,821
Carga de ClO ₂ na D1	Kappa saída cozimento	-0,165	0,012
Carga de ClO ₂ na D2	Kappa saída cozimento	-0,199	0,003
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Kappa saída cozimento	-0,276	0,000
Alvura na PO	Kappa saída cozimento	-0,164	0,013
Kappa entrada branqueamento	Alvura entrada branqueamento	-0,475	0,000
Carga de ClO ₂ na DO	Alvura entrada branqueamento	-0,587	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na EOP	Alvura entrada branqueamento	-0,687	0,000
Carga de ClO ₂ na D1	Alvura entrada branqueamento	-0,363	0,000
Carga de ClO ₂ na D2	Alvura entrada branqueamento	-0,36	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Alvura entrada branqueamento	-0,147	0,027
Alvura na PO	Alvura entrada branqueamento	0,098	0,138
Carga de ClO ₂ na DO	Kappa entrada branqueamento	0,713	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na EOP	Kappa entrada branqueamento	0,337	0,000
Carga de ClO ₂ na D1	Kappa entrada branqueamento	0,147	0,026
Carga de ClO ₂ na D2	Kappa entrada branqueamento	0,135	0,042
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Kappa entrada branqueamento	-0,069	0,298
Alvura na PO	Kappa entrada branqueamento	-0,005	0,937

(continua)

Carga de H ₂ O ₂ na EOP	Carga de ClO ₂ na DO	0,487	0,000
Carga de ClO ₂ na D1	Carga de ClO ₂ na DO	0,383	0,000
Carga de ClO ₂ na D2	Carga de ClO ₂ na DO	0,379	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Carga de ClO ₂ na DO	0,108	0,105
Alvura na PO	Carga de ClO ₂ na DO	0,101	0,129
Carga de ClO ₂ na D1	Carga de H ₂ O ₂ na EOP	0,201	0,002
Carga de ClO ₂ na D2	Carga de H ₂ O ₂ na EOP	0,188	0,004
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Carga de H ₂ O ₂ na EOP	0,137	0,038
Alvura na PO	Carga de H ₂ O ₂ na EOP	-0,156	0,019
Carga de ClO ₂ na D2	Carga de ClO ₂ na D1	0,959	0,000
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Carga de ClO ₂ na D1	0,253	0,000
Alvura na PO	Carga de ClO ₂ na D1	0,185	0,005
Carga de H ₂ O ₂ na PO	Carga de ClO ₂ na D2	0,304	0,000
Alvura na PO	Carga de ClO ₂ na D2	0,234	0,000
Alvura na PO	Carga de H ₂ O ₂ na PO	0,306	0,000

Fonte: Do autor (2020).

Na entrada do branqueamento, pode ocorrer da alvura possuir valores baixos, no entanto, para atender às especificações de qualidade do produto final celulose, não é possível que o produto saia do processo com alvura reduzida, uma vez que isso ocasiona a desclassificação do produto.

A partir das correlações obtidas e valor-p estatisticamente significativo, a alvura na entrada do branqueamento é inversamente proporcional as cargas de químicos, carga de ClO₂ na DO, carga de ClO₂ na D1, carga de ClO₂ na D2 e carga de H₂O₂ na PO, ou seja, uma alvura mais baixa na entrada do branqueamento, representa maior consumo de químico no processo de branqueamento, buscando entregar as especificações de alvura do produto final de celulose.

A alvura na entrada do branqueamento é inversamente proporcional ao kappa na entrada do branqueamento, uma vez que, quanto maior o kappa, mais preservada está a polpa, ou seja, menor a alvura na entrada do branqueamento.

A partir do acompanhamento ao longo do processo, quanto maior o kappa no cozimento, maior o kappa no branqueamento. Quanto maior o kappa no branqueamento, menor a alvura e maior a viscosidade no processo, ou seja, a polpa mais preservada.

Fardim & Duran (2004) citam que os químicos são empregados no licor de polpação para separar as fibras a altas temperaturas, conduzindo a diferentes graus de degradação da lignina e carboidratos. Um teor reduzido de lignina e um alto teor de carboidratos requerem condições menos severas de polpação e conduzem a um alto rendimento gravimétrico.

A medida que o nível de álcali aumenta, aumenta-se também o grau de deslignificação, ou seja, há a redução do número kappa, do rendimento depurado, do teor de rejeitos e o aumento

da seletividade da polpação. Em estudo com madeiras de *Eucalyptus globulus*, Axelsson et al. (2000) verificaram que o rendimento para um dado número kappa é diminuído substancialmente pelo aumento da temperatura ou carga de álcali na polpação. Um aumento nestas variáveis também resulta no decréscimo da viscosidade.

O uso de baixos níveis de álcali ativo na polpação melhora todas as propriedades mecânicas da polpa, mas reduz a alvura e aumenta o número kappa. O aumento da carga alcalina na polpação proporciona redução significativa do rendimento gravimétrico do processo de polpação.

5 CONCLUSÕES

É notável a contribuição do Brasil no panorama mundial em exportação de papel e celulose. Mesmo conhecendo a composição química da madeira, não é fácil prever o comportamento no processo, uma vez que os componentes se encontram arrançados de forma complexa tornando o comportamento diferente de quando estão isolados.

As propriedades de um papel produzido de uma espécie de madeira variam bastante em relação a um papel similar obtido de outra espécie. A qualidade desejada do produto final depende da celulose.

Conhecer as propriedades primárias da polpa e as propriedades secundárias que possuem correlação é de fundamental importância para o papelero, uma vez que as variáveis secundárias auxiliam a predição das especificações da polpa celulósica e das variáveis chaves do processo de produção em uma fábrica integrada de papel e celulose.

A viscosidade se relaciona com o grau de polimerização da celulose e, indiretamente, com a resistência final do papel. Durante o branqueamento, busca-se entregar uma polpa com a alvura adequada às especificações, assim, geralmente ocorre uma degradação dos carboidratos, paralela à remoção e modificação da lignina. Portanto, é necessário que se estabeleça um ponto de equilíbrio entre todas as variáveis de controle do branqueamento, para entregar no final do processo os parâmetros de qualidade.

A viscosidade é amplamente utilizada para controlar a qualidade da polpa no processo industrial, uma vez que quanto maior a viscosidade, menor a degradação da polpa. A partir da análise estatística dos dados, pode-se perceber que quanto maior o kappa, maior a viscosidade, indicando que a polpa está mais preservada. Quanto maior a viscosidade nas outras etapas do processo, maior na saída do branqueamento.

O controle de alvura na polpa é importante uma vez que compõe a qualidade da polpa produzida ao final do processo e economiza químicos.

O objetivo do processo kraft é retirar a lignina. Para retirar lignina, há a degradação da polpa. Pode ocorrer da alvura entrar reduzida no branqueamento, no entanto, a polpa final precisa estar nas especificações do produto final, dessa forma, quanto menor a alvura na entrada do branqueamento, maior o consumo de químicos. Na entrada do branqueamento, quanto maior a alvura, mais baixo o kappa.

Conhecer o comportamento das propriedades finais da polpa e o comportamento de variáveis secundárias ao longo do processo é de fundamental importância para prever o

processo e entender os impactos das variações da qualidade da polpa no processo de produção de papel.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se correlacionar as demais especificações de celulose, como sujidade com o processo de produção de celulose, buscando cada vez mais ter a visão de produção ao longo do processo. Além disso, torna-se interessante relacionar as variáveis da polpa de celulose com as variáveis que podem impactar o desempenho do processo e qualidade do produto, uma vez que conhecer o processo torna-o possível de buscar a estabilidade de qualidade, reduzindo a variabilidade dos produtos.

REFERÊNCIAS

ANDRITZ. **Fiber Technologies Division. Treinamento – Branqueamento.** 2012.

ALMEIDA, F. S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids para madeiras de eucalipto.** Universidade de São Paulo, Piracicaba, p. 115, 2003.

BIAZUS, A.; HORA, A. B. D.; LEITE, B. G. P. **Panorama de Mercado: Celulose.** BNDES Setorial, n.32, p. 311-370, 2010.

BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Tipos e aplicações.** Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/181>. Acesso em: 08 out. 2021.

CAMPOS, E. S. **Curso básico de fabricação de celulose e papel,** 2011. disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2011_Curso_Fabricacao_Celulose_Papel.pdf. Acesso em 30 set. 2021.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2.ed., São Paulo: IPT, p. 45-106, 1998.

FARDIM, P.; DURÁN, N. **Retention of cellulose, xylan and lignin in Kraft pulping of Eucalyptus studied by multivariate data analysis: Influences on physicochemical and mechanical properties of pulp.** *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 15, n. 4, p. 514-522, 2004.

FOELKEL, C. **As fibras dos eucaliptos e as qualidade requeridas na celulose kraft para a fabricação do papel,** Eucalyptus Online Book e Newsletter, 2007.

FOELKEL, C. **Propriedades Papeleiras das árvores, Madeiras e Fibras Celulósicas dos Eucaliptos.** Eucalyptus Online Book e Newsletter, 2009.

IBA - Indústria brasileira de árvores. **Relatório 2020,** Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2020.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

KLOCK, U., **Tecnologia de produção de polpa celulósica e papel**, UFPR, Introdução à obtenção de celulose e papel, 2005.

MINITAB. **Suporte ao Minitab**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/>. Acesso em: 25 out. 2021.

OSISOFT, **PI System - Conectando dados, operações e pessoas**. Disponível em: <https://www.osisoft.pt/pi-system>. Acesso em: 01 nov. 2021.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel-estudo de caso**. Tese da Universidade de São Paulo (USP), 2003.

Reis, H. M. **Visão Geral – Processo de Produção de celulose Suzano S/A**, 2014.

SOUZA, A. H. C. B. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.

SUZANO. **Manual do Suporte Técnico. Guia técnico**, Suzano 2020.

SUZANO. **Análise de viscosidade da polpa de celulose**, Suzano 2021.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L.M. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna**. Revista Cerne, Lavras, v.2, n.1, p. 83-93, 1996.

VALMET. **Valmet's pulping process**, 2019. Disponível em: <https://www.valmet.com/investors/valmet-as-an-investment/business-lines/pulp-and-energy/pulping-process/> Acesso em: 01 nov. 2021.

VASCONCELOS DIAS, R.L.; CLAUDIO-DA-SILVA JÚNIOR, E. **A influência da densidade básica da madeira de híbridos de Eucalyptus grandis em suas características**

químicas, e propriedades de polpação e do papel. CONGRESSO ANUAL DA ABTCP –
Semana do Papel, São Paulo, 1985.