

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

**OTIMIZAÇÃO DA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA FIBRA DE
CELULOSE POR MODELO PREDITIVO**

Bruno Vinícius Britez Martins

Campo Grande – MS
2025

Bruno Vinícius Britez Martins

**OTIMIZAÇÃO DA ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA FIBRA DE
CELULOSE POR MODELO PREDITIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Orientador: Prof. Dr. Celso Murilo dos Santos.

Campo Grande – MS

2025

RESUMO

Na produção de celulose, é essencial o acompanhamento de vários parâmetros que determinam as tomadas de decisão no processo industrial. Nesse contexto, são muitas as análises realizadas em um laboratório de qualidade, das quais algumas possuem uma frequência reduzida por condições como quantidade elevada de etapas, necessidade de um ambiente estável e tempo elevado para obtenção dos resultados. Dentre esses ensaios, a resistência à tração da fibra de celulose, destaca-se como um dos mais importantes, visto que, em um cenário que as variações no preço do mercado de fibra curta são constantes, é vantajoso alcançar as melhores condições do parâmetro na produção, pois reflete, principalmente na produtividade da polpa na máquina de papel. Ademais, a boa correlação entre a resistência e dados da morfologia das fibras, revela que a criação de um modelo preditivo é uma boa ferramenta de otimização, principalmente ao se avaliar o tempo curto para determinação das características anatômicas. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo a utilização de dados de morfologia do laboratório para a predição dos resultados do índice de tração, através da criação de um modelo de regressão linear múltipla. A ferramenta para análise estatística dos dados utilizada foi a linguagem de programação Python, sendo o *scikit-learn* a principal biblioteca. As variáveis selecionadas para configuração do modelo foram, o Comprimento Médio em Função da Massa, a Relação de Fibrilação, O Curl e a Relação de Finos. Ao final, como resultado, o modelo obteve um MAPE de 2,89% e RMSE de 2,49 N.m/g, demonstrando boa capacidade preditiva, sendo confirmada pelos testes de significância estatística. Dessa forma, o modelo pode ser utilizado como ferramenta na rotina analítica, reduzindo o tempo estimado de análise de 11 horas para apenas 5 horas de duração.

Palavras-chave: Índice de tração. Morfologia. Modelo preditivo. Fibra de celulose.

ABSTRACT

In pulp production, monitoring several parameters that guide industrial decision-making is essential. In this context, numerous analyses are carried out in a quality laboratory, some of which have reduced frequency due to factors such as a high number of procedural steps, the need for a stable environment, and the long time required to obtain results. Among these tests, the tensile strength of cellulose fibers stands out as one of the most important, since in a scenario where fluctuations in the short-fiber market price are constant, achieving optimal parameter conditions in production is advantageous, as it directly influences pulp productivity on the paper machine. Additionally, the strong correlation between tensile strength and fiber morphology data indicates that developing a predictive model is an effective optimization tool, especially considering the short time required to determine anatomical characteristics. Thus, the aim of this study was to use laboratory fiber morphology data to predict tensile index results through the development of a multiple linear regression model. Python was used as the tool for statistical data analysis, with scikit-learn as the main library. The variables selected for model configuration were Mass-Weighted Average Fiber Length, Fibrillation Ratio, Curl, and Fines Ratio. The final model achieved a MAPE of 2,89% and an RMSE of 2,49 N·m/g, demonstrating strong predictive capability, which was confirmed by statistical significance tests. Therefore, the model can be applied as a tool in the analytical routine, reducing the estimated analysis time from 11 hours to only 5 hours.

Keywords: Tensile index. Morphology. Predictive model. Cellulose fiber.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo amor e todo o esforço, mesmo nas dificuldades, para que eu e meus irmãos pudéssemos estudar, realizando o sonho da minha mãe de que algum dia um membro da família pudesse finalizar uma graduação.

Aos meus amigos, que tive o prazer de conhecer durante a graduação, João Luís, Radwan e Matheus, vocês tornaram essa etapa da minha vida mais leve.

Ao meu professor orientador Celso Murilo dos Santos, pelo apoio e incentivo na elaboração desse trabalho, além dos conselhos e se demonstrar referência durante toda a graduação.

Aos professores, Danieli, Janaína, João Renato, Carlos, Sérgio e Rebecca por sempre entregarem o melhor em suas aulas, seus esforços tornam o curso de Engenharia Química da UFMS um dos melhores do país.

A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e ao Instituto de Química, pela estrutura e as melhores condições que um estudante sonha algum dia em ter.

Gostaria de agradecer também à Suzano S.A, em particular o laboratório de Qualidade de Ribas do Rio Pardo, que me ofereceu toda estrutura para elaboração do projeto e por fornecer um ótimo programa de estágio.

Ao meu gestor Rafael Demuner e supervisora de estágio, Jéssica Alvinhão. Vocês são minhas maiores referências na indústria. Obrigado pelos ensinamentos, suporte e por enxergar em mim qualidades, que muitas vezes não enxergo.

Em especial, agradeço também a minha namorada, Vitória Hasegawa. Obrigado pelo apoio durante todos esses anos, você foi minha maior incentivadora e companheira durante esse período. Agradeço toda a cobrança e palavras de apoio para que chegasse a esse momento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvores mais utilizadas na extração de celulose.....	14
Figura 2 - Fibras de Pinus Taeda e de Eucalipto	15
Figura 3 - Comparativo entre coníferas e folhosas.....	16
Figura 4 - Processo <i>kraft</i>	18
Figura 5 - Processo de batelada do cozimento	20
Figura 6 - Etapas de um digestor contínuo	21
Figura 7 - Evolução da coloração da polpa	22
Figura 8 - Folhas após o corte.....	24
Figura 9 - Ciclo de recuperação química <i>kraft</i>	26
Figura 10 - Comportamento resultantes da refinação	28
Figura 11 - Colapso da fibra	29
Figura 12 - Fibrilação externa.....	29
Figura 13 - Estrutura das fibras	30
Figura 14 - Comparação entre porcentagem de rompimento e tração	32
Figura 15 - Fluxograma normatizado da análise em laboratório	35
Figura 16 - Representação da estrutura da fibra.....	36
Figura 17 - Relação entre população fibrosa e coarseness	37
Figura 18 - Comportamento de encanoamento e torções	38
Figura 19 - Distribuição padrão de resíduos.....	43
Figura 20 - Moinho PFI.....	47
Figura 21 - Imagem capturada pelo FS5 UHD	48
Figura 22 - Valmet FS5 UHD.....	49
Figura 23 - Mapa de calor das correlações	50
Figura 24 - Dispersão entre o índice de tração do laboratório e modelo	54
Figura 25 - Análise temporal do índice de tração	55
Figura 26 - Análise de resíduos.....	56
Figura 27 - Fluxograma do novo ensaio.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de fibras curtas	15
Tabela 2 - Principais agentes branqueadores utilizados na indústria	23
Tabela 3 - Lista de ensaios para determinação do índice de tração.....	33
Tabela 4 - Análise do FIV.....	52
Tabela 5 - Estimativas do modelo.....	53

NOMENCLATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CSA	Cross Sectional Area
CWT	Cell Wall Thickness
FIV	Fator de Inflação da Variância
IRA	Índice de Retenção de Água
ISO	International Organization for Standardization
LBO	Licor Branco Oxidado
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
NBR	Norma Brasileira
PFI	Paper and Fiber Research Institute
PIB	Produto Interno Bruto
RMSE	Root Mean Square Error
WWS	Wet Web Strength

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Geral 12	
2.2	Objetivos específicos	12
3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	13
4	ASPECTOS TEÓRICOS	14
4.1	Fontes de celulose.....	14
4.2	Extração da polpa celulósica.....	16
4.2.1	Processo <i>kraft</i>.....	17
4.2.2	Pátio de madeiras	18
4.2.3	Cozimento	19
4.2.4	Lavagem, depuração e deslignificação	21
4.2.5	Branqueamento	22
4.2.6	Secagem	23
4.2.7	Recuperação química.....	24
4.3	Formação do papel.....	26
4.3.1	Desagregação	26
4.3.2	Depuração	27
4.3.3	Refinação.....	27
4.3.4	Máquina de papel.....	30
4.4	Resistência à tração	31
4.4.1	Análise de resistência à tração	32
4.5	Morfologia das fibras de celulose	35
4.5.1	Correlações entre morfologia e a resistência à tração.....	38
4.6	Regressão linear múltipla	39
4.6.1	Método dos quadrados mínimos.....	39
4.6.2	Análise de variância (Teste F).....	40
4.6.3	Teste t.... ..	41
4.6.4	Coeficiente de Determinação Múltiplo e Coeficiente de Determinação Múltiplo Ajustado	41
4.6.5	Multicolinearidade	42

4.6.6	Durbin-Watson	42
4.6.7	Análise de resíduos	43
4.6.8	Seleção de variáveis.....	44
4.6.9	MAPE e RMSE	44
4.7	Python como ferramenta de análise de dados.....	45
4.7.1	Scikit-learn	45
4.7.2	Pandas.....	45
4.7.3	Matplotlib.....	45
4.7.4	NumPy.....	46
5	METODOLOGIA.....	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6.1	Seleção das variáveis.....	51
6.2	Validação dos resultados.....	52
6.3	Testes de significância.....	55
6.4	Proposta de novo método para determinação do índice de tração	56
7	CONCLUSÃO.....	58
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

A celulose é um dos componentes mais abundantes encontrados na natureza. Por sua versatilidade, pode ser essencial nos mais diversos processos industriais, como na fabricação de papel, tecidos, embalagens, alimentação e produtos biotecnológicos. Nas plantas, está presente nas paredes celulares, sendo responsável por conferir resistência, proteção e rigidez. Estima-se por exemplo, que compreenda cerca de 33% de toda a matéria vegetal do planeta (KLABIN, 2024; SUZANO, 2024; VERACEL, 2022).

Os primeiros relatos históricos sobre o uso da celulose para a produção de papel são por volta do ano de 105 d.C, quando Ts'ai Lun, um oficial da corte chinesa descobriu que se misturasse, cascas de amoreiras, pedaços de bambu, tecidos e cal, era possível criar uma pasta, que seca poderia ser utilizada na escrita. Esse processo se espalhou pelo mundo e foi utilizado por séculos, até que em 1838, o francês Anselme Payen descobriu a estrutura molecular da celulose e contribuiu para que as tecnologias de extração do composto evoluíssem mais rapidamente (CAMPOS; FOELKEL, 2017).

Conforme Campos e Foelkel (2017), a história da indústria de papel e celulose no Brasil, se inicia em 1808, com a vinda da família real portuguesa, quando surgiu a necessidade da produção de papel para impressão de cédulas bancárias, jornais e documentos oficiais do governo monárquico. Entretanto, somente em 1810, a primeira fábrica de papel iniciou suas operações na cidade de Rio de Janeiro.

No ano de 1920, havia o registro de apenas uma fábrica de celulose no estado de São Paulo, que utilizava *Araucaria augustifolia*, como matéria-prima. Até aquele momento, além do pinho-do-paraná, a matéria-prima nacional, baseava-se em aparas, trapos, palha de arroz, bambu, bagaço de cana, lírio e capim. No início de 1950, o Brasil era praticamente autossuficiente na produção de seu papel, mas ainda importava cerca de 70% da celulose que utilizava para sua fabricação (AQUINO, 2020; CAMPOS; FOELKEL, 2017).

Em 1956 a Companhia Suzano Papel e Celulose, inaugurou uma fábrica piloto de produção de celulose de fibra curta. Durante toda a década, a empresa conduziu uma série de pesquisas na Universidade da Califórnia, juntamente com o Instituto de Pesquisas Florestais, para a criação de um papel feito 100% a partir da madeira de eucalipto (HASSE, 2006 *apud* AQUINO, 2020).

Para Soto (1992), a criação do material feito exclusivamente da fibra curta representou um importante marco para o país, que presenciou a inovação tecnológica estimular o processo de integração vertical da indústria. Assim, a produção da celulose de fibra curta, que no ano de 1950 foi de 1590 toneladas, passou para 51900 toneladas no ano de 1956, tornando-se a principal fonte de matéria-prima para as indústrias papeleiras do Brasil.

Atualmente, a indústria de papel e celulose é responsável por 1,2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, posicionando o Brasil como um dos protagonistas do setor no cenário mundial (KLABIN, 2025). Apesar disso, um dos grandes desafios é a variação do preço da celulose de fibra curta no mercado, que é influenciado principalmente pelo mercado chinês e estadunidense (FERREIRA, 2021; SINPAPEL, 2025).

Essa constante mudança demonstra oportunidades de melhoria em toda a cadeia produtiva, desde o setor florestal, na produtividade, uniformidade e qualidade da madeira, até a indústria, na minimização do custo de produção e racionalização do uso de recursos naturais. No campo produtivo, destaca-se também o empenho constante das empresas brasileiras em oferecer fibras com as melhores propriedades aos seus clientes (DEMUNER, 2010).

Esse empenho está intimamente relacionado ao estudo da morfologia das fibras e seus constituintes químicos. Conforme Foelkel (2007), as fibras constituem o componente anatômico mais abundante da polpa de celulose e são importantes para previsões acerca do comportamento da polpa em condições operacionais do processo.

Nesse contexto, em um cenário industrial, uma oportunidade de aplicação de dados sobre a anatomia das fibras, é a otimização de análises laboratoriais, cujos parâmetros possuam correlação com a morfologia das fibras. Nesse sentido, em seus estudos, Page (1969) e Horn (1978) já avaliavam a relação direta que as propriedades mecânicas das fibras possuíam com as variáveis de resistência da fibra. Diante do contexto, o presente trabalho tem como objetivo a utilização de dados da análise de morfologia das fibras em laboratório, para otimização dos ensaios de resistência à tração.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O presente trabalho, tem como objetivo realizar a otimização da análise laboratorial de resistência à tração da fibra de celulose de eucalipto, utilizando-se de informações de morfologia de bancada para a construção de um modelo de regressão linear múltipla para predição dos resultados.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o processo de extração da celulose
- Avaliar a importância da determinação das propriedades físicas da fibra de celulose e seus impactos na produção de papel.
- Analisar a correlação entre as características morfológicas da fibra de celulose de eucalipto e a propriedade de resistência à tração.
- Desenvolver um modelo preditivo para a análise de resistência à tração da fibra de celulose, após o refino da polpa em moinho PFI.
- Validar o modelo e mensurar sua relevância no contexto de um laboratório industrial.

3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (2022), o setor de papel e celulose no Brasil desempenha um papel importante na economia nacional e também para o cenário mundial. Isto se deve principalmente às grandes receitas geradas, aos elevados investimentos, aos impactos nos diversos segmentos que compõe a cadeia produtiva, a geração e consumo de energia, assim como o impacto ambiental positivo.

De acordo com Antunes (2024), no ano de 2023, o Brasil ocupou a posição de maior exportador e segundo maior produtor de celulose no mundo. Corrobora para essa condição o aumento da demanda do mercado externo, principalmente acompanhada pela procura por papel de uso doméstico e sanitário. Esse impulso de 27% desde 2010, foi motivado pelo crescimento da população e do padrão de vida, especialmente do mercado asiático (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Nesse cenário o Mato Grosso do Sul figura como o maior produtor e exportador de celulose do país, sendo responsável no ano de 2024 por cerca de 24% da produção nacional. O estado consolidou-se como principal eixo de crescimento do ramo industrial, movimento condicionado por uma série de fatores, como incentivos governamentais e parcerias com investidores. Somente no ano de 2024, o estado foi responsável por 80% dos 234 mil hectares da nova área de plantio do setor silvícola (IBÁ, 2025).

Assim, torna-se evidente o valor de novas pesquisas focadas na área de celulose e produção de papel. Nesse contexto, um potencial objeto de estudo é a propriedade de resistência à tração da fibra, que representa um dos principais indicadores de performance da celulose em uma máquina de papel (FOELKEL, 2007).

Uma das oportunidades de melhoria, relacionadas à essa propriedade, são as análises realizadas em laboratório. Além de possuir tempo elevado de duração, os ensaios ainda são dependentes de condições adequadas do ambiente onde são realizados. Dessa forma, um modelo preditivo que auxilie na redução de etapas da análise, desponta como uma boa ferramenta de otimização, permitindo um maior acompanhamento da variável no processo, além de conferir um maior poder nas tomadas de decisões em um contexto industrial.

4 ASPECTOS TEÓRICOS

4.1 Fontes de celulose

Segundo o IPT (1988) a maioria das fibras utilizadas na fabricação de pastas celulósicas é de origem vegetal. Dessas, as de maior importância são as fibras da madeira, que são oriundas de dois grupos, que se dividem entre as dicotiledôneas, chamadas também de folhosas (porosas, duras ou *hardwoods*) e as coníferas, ou resinosas (não-porosas, moles ou *softwood*).

Na Europa e América do Norte, o grupo predominante é o das coníferas, que são mundialmente as mais utilizadas na extração da celulose. No Brasil, os maiores representantes do grupo são as espécies de Araucária e Pinus. Entretanto, o grupo das folhosas é a de maior concentração no país, englobando várias espécies do gênero *Eucalyptus* (IPT, 1988). A Figura 1 representa as espécies mais comuns utilizadas como fontes de fibras para a fabricação de papel.

Figura 1 - Árvores mais utilizadas na extração de celulose



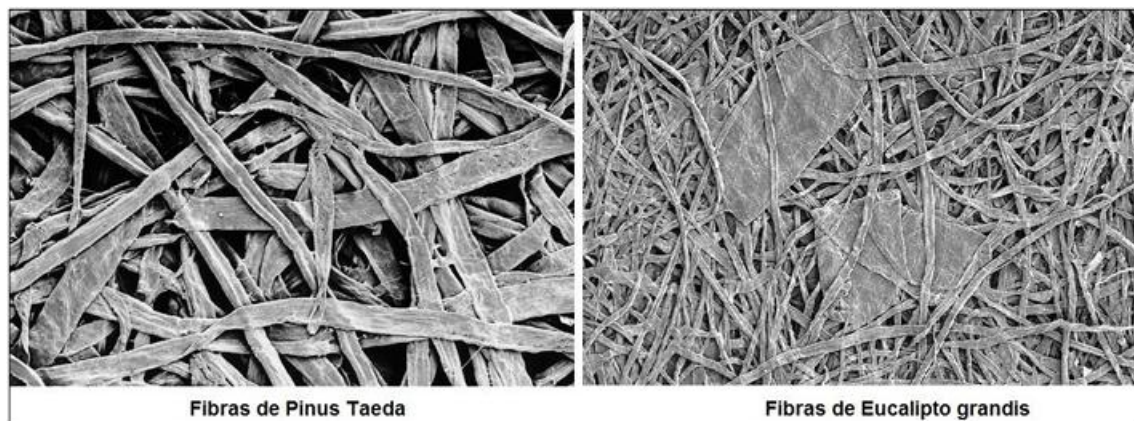
Fonte: REIS (2013).

As diferenças entre ambos os grupos também são observadas nas características das fibras. As coníferas, por exemplo, possuem fibras de maior comprimento, variando entre 2 e 5 milímetros, com propriedades mecânicas de maior robustez, resistência e durabilidade. Essas favorecem a fabricação de materiais como papelão ondulado, sacos de papel e papel-cartão (KLABIN, 2025).

As folhosas, de maneira oposta, fornecem as fibras curtas, com o comprimento entre 0,5 e 2 milímetros. Por serem mais flexíveis e moldáveis, são amplamente utilizadas na fabricação de papéis finos devido à sua maciez e excelente capacidade de absorção. Destacam-se entre os produtos dessa celulose, os itens de higiene e cuidado pessoal, como lenços, papéis higiênicos, guardanapos e papéis especiais

(KLABIN, 2025). A Figura 2, apesar de não estar destacada na mesma escala mesma escala, registra a microscopia de ambas as fibras.

Figura 2 - Fibras de Pinus Taeda e de Eucalipto



Fonte: REIS (2013).

Conforme relatório da Bracelpa (2012), são diversos os motivos que levam o Eucalipto a ser a espécie de maior plantio no Brasil. Entre os fatores, destacam-se a boa adaptação ao clima e o solo, aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento e os avanços tecnológicos em genética e biotecnologia. Como resultado, o país se destaca com o baixo tempo de rotação e grande produtividade, como registra o comparativo de fibras curtas da Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo de fibras curtas

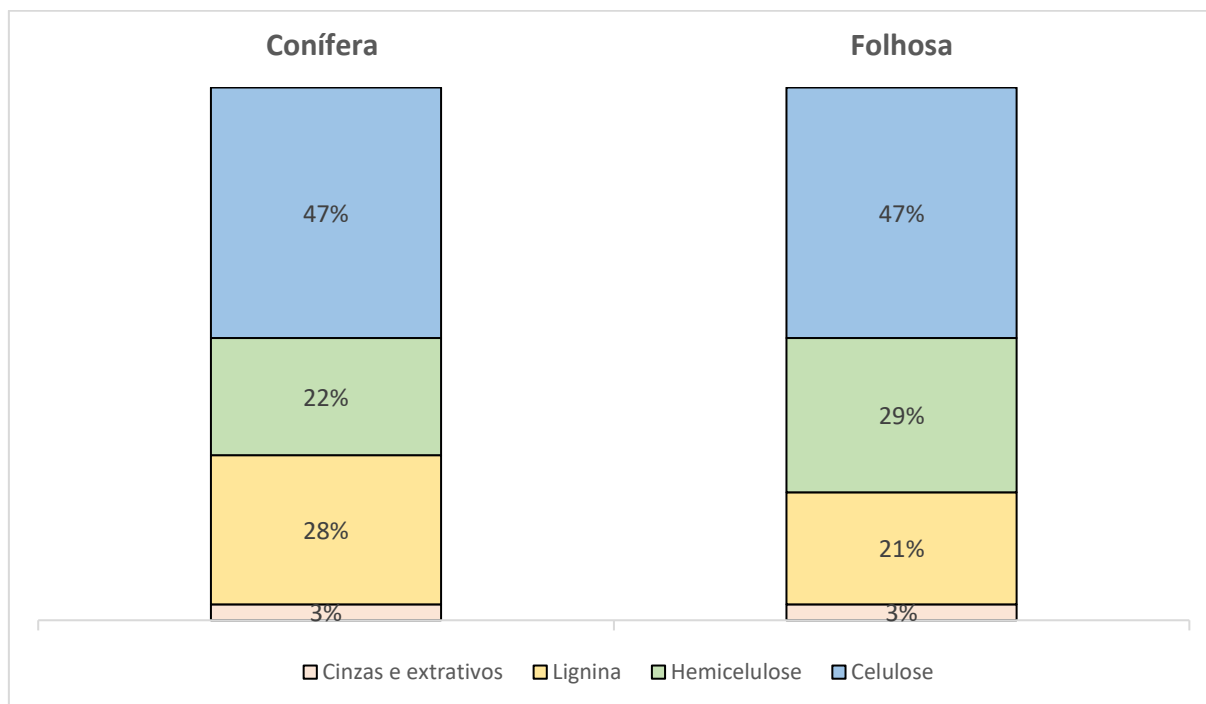
ESPÉCIES	PAÍSES	ROTAÇÃO (anos)	RENDIMENTO (m ³ /ha/ano)
Eucalipto	Brasil	7	44
Eucalipto	África do Sul	8 – 10	20
Eucalipto	Chile	10 – 12	25
Eucalipto	Portugal	12 – 15	12
Eucalipto	Espanha	12 – 15	10
Bétula	Suécia	35 – 40	6
Bétula	Finlândia	35 – 40	4

Fonte: Adaptado de BRACELPA (2012)

Anatomicamente a madeira é considerada um material lignocelulósico, que forma complexas matrizes constituídas de celulose, um rígido polímero de glicose, hemiceluloses, pectinas e outras gomas. Ademais, essa matriz é impregnada com lignina, que pode ser considerada como uma cobertura de resina plástica, atuando como principal agente ligante. Outros componentes são os materiais solúveis em

solventes orgânicos, chamados também de extrativos, tais como, torpenos e seus derivados, graxas, ceras e fenóis (CASTRO, 2009). A Figura 3 traz um comparativo entre as composições químicas da madeira das coníferas e das folhosas.

Figura 3 - Comparativo entre coníferas e folhosas



Fonte: Adaptado de REIS (2013).

Para a separação dos componentes dos materiais lignocelulósicos é necessário que ocorra o rompimento da parede celular da estrutura vegetal, removendo, solubilizando, ou despolimerizando a lignina. São muitos os processos capazes de alcançar esse objetivo, sejam os que empregam energia química, mecânica ou a combinação de ambas. Para uso comercial, os processos mais empregados na indústria são os químicos, dos quais, destaca-se o processo *kraft* (CASTRO, 2009; IPT, 1988).

4.2 Extração da polpa celulósica

O processo *kraft*, ou sulfato, de polpação foi desenvolvido em 1879 pelo químico alemão C. F. Dahl, em um esforço para encontrar um substituto para o carbonato de sódio empregado durante as operações de polpação a soda. Uma solução encontrada foi a adição de sulfato de sódio na fornalha de recuperação. O sulfato era quimicamente reduzido a sulfeto pela queima do licor, assim sendo introduzido no sistema. Descobriu-se posteriormente que o sulfeto no licor de

cozimento acelerava acentuadamente a deslignificação, produzindo uma polpa mais resistente (CAMPOS; FOELKEL, 2017; KLOCK, 2013). Atualmente, estima-se que cerca de 97,5% da extração de celulose no Brasil utiliza o processo *kraft* (IBÁ, 2023 *apud* FERNANDES *et al.*, 2024).

De acordo com o IPT (1988), as principais vantagens do processo *kraft* sobre os demais são:

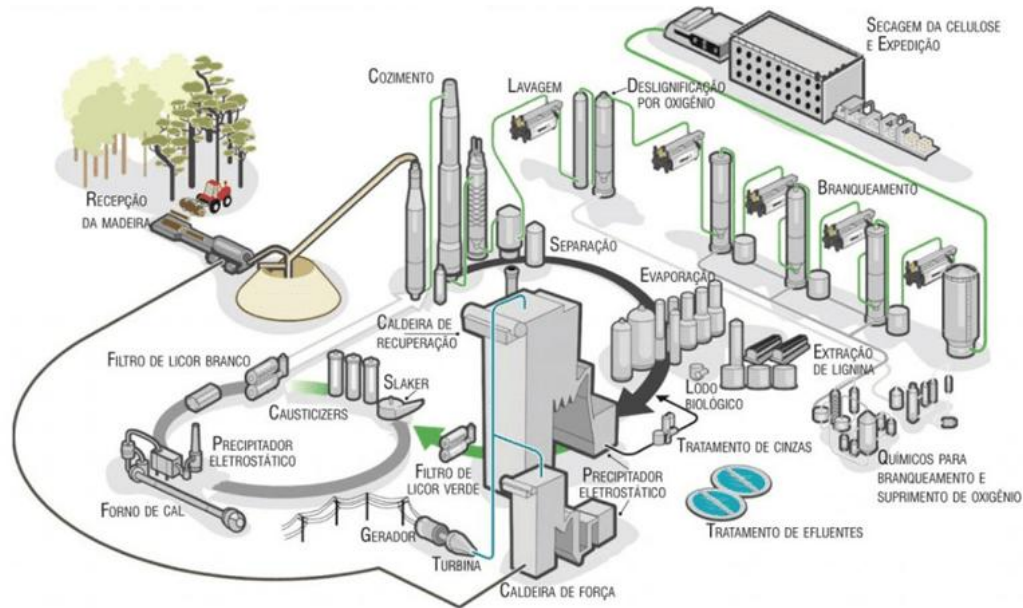
- Flexibilidade com relação às espécies de madeira;
- Ciclos de cozimento mais curtos que processos sulfitos ácidos;
- A pasta pode ser branqueada a altos níveis de alura;
- Produção de pastas de alta resistência;
- A recuperação do licor utilizado é economicamente viável.

Apesar de se tratar do processo mais vantajoso, como qualquer método, apresenta algumas desvantagens, tais como:

- Alto custo de investimento na construção das fábricas;
- Baixa alvura da pasta não-branqueada, em comparação com as pastas sulfito;
- Baixo rendimento de polpação;

4.2.1 Processo *kraft*

Em concordância com Reis (2013), a extração da celulose pelo processo *kraft* pode ser dividida em macro unidades. A primeira é chamada de Linha de Fibras e é responsável pela extração da polpa celulósica. A segunda é a de Recuperação e Utilidades, com o objetivo de recuperar os reagentes utilizados no cozimento e fornecer utilidades para os demais processos, como a água desmineralizada, vapor, energia elétrica e ar comprimido. A Figura 4 traz uma visão geral do processo.

Figura 4 - Processo *kraft*

Fonte: TERMOBLOG (2023).

As etapas da Linha de Fibras podem ser divididas, respectivamente, em: pátio de madeira, cozimento, lavagem e depuração, deslignificação, branqueamento e secagem.

4.2.2 Pátio de madeiras

É a etapa que descreve os processos que vão desde a chegada das toras a fábrica, até a alimentação das mesmas no digestor. As toras geralmente chegam transportadas por caminhões e são descarregadas por garras mecânicas (gruas), onde ficam estocadas até o momento de seu consumo. Uma etapa eficiente para remoção de matéria abrasiva, como areia e terra, que são prejudiciais aos equipamentos, tanto da fábrica, quanto das máquinas de papel é a lavagem das toras, cujo processo precede a picagem. Caso essa madeira chegue com cascas é necessária uma etapa adicional para sua remoção, pois a presença dessas danifica as facas dos picadores, faz com que o consumo de químicos destinados ao branqueamento seja maior e prejudica a qualidade da polpa. O resíduo industrial das cascas constitui de 10 a 20% da madeira total processada, podendo ser utilizado como combustível na caldeira para a geração de vapor, ou destinado para gaseificação em plantas industriais mais avançadas (CASTRO, 2009; REIS, 2013).

Após a estocagem, a madeira é direcionada às esteiras transportadoras que levam as toras até os picadores, que por meio da ação de facas, fragmentam a

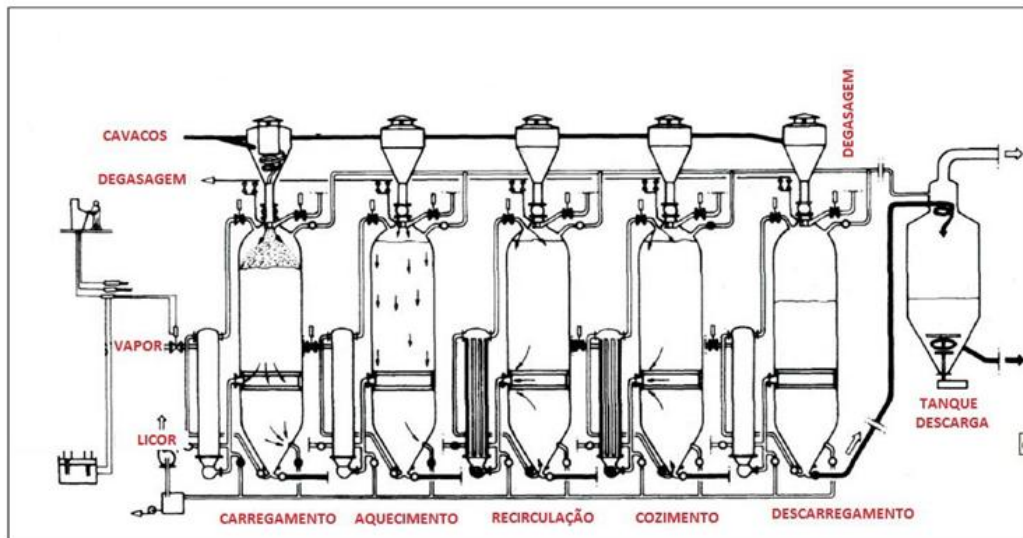
madeira para facilitar a penetração do licor de cozimento nos chamados cavacos. Parte desses não são considerados ideais para o cozimento, tidos como fora das dimensões adequadas, necessitando, assim, de uma classificação. Os cavacos são, então, enviados para uma peneira vibratória, onde ocorre a seleção e posterior remoção dos finos ou dos superdimensionados, retornando para o processo de picagem ou enviados para queima na caldeira (CASTRO, 2009; REIS, 2013).

4.2.3 Cozimento

Os cavacos selecionados são transportados para o processo de cozimento, no qual ocorre o tratamento químico com o licor do processo *kraft*, que é uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S). O cozimento, também chamado de digestão da madeira ocorre em vasos de pressão conhecidos como digestor, ou cozedor, podendo ser realizado em regime de batelada ou contínuo (CASTRO, 2009; REIS, 2013).

O processo descontínuo inicia-se com o carregamento, em que madeira e licor são alimentados em um vaso, para que, em seguida, haja um aquecimento gradual, que segue um programa pré-determinado, cuja temperatura se eleva progressivamente até atingir 160-170°C. Após o aquecimento, segue-se a etapa de repouso, na qual a mistura de licor e cavacos permanece o tempo necessário até que o cozimento ocorra como desejado. Por fim, a pressão residual do tanque é utilizada na descarga da polpa para um tanque de estocagem chamado *blow tank* (REIS, 2013). A Figura 5 apresenta uma síntese do processo de batelada.

Figura 5 - Processo de batelada do cozimento

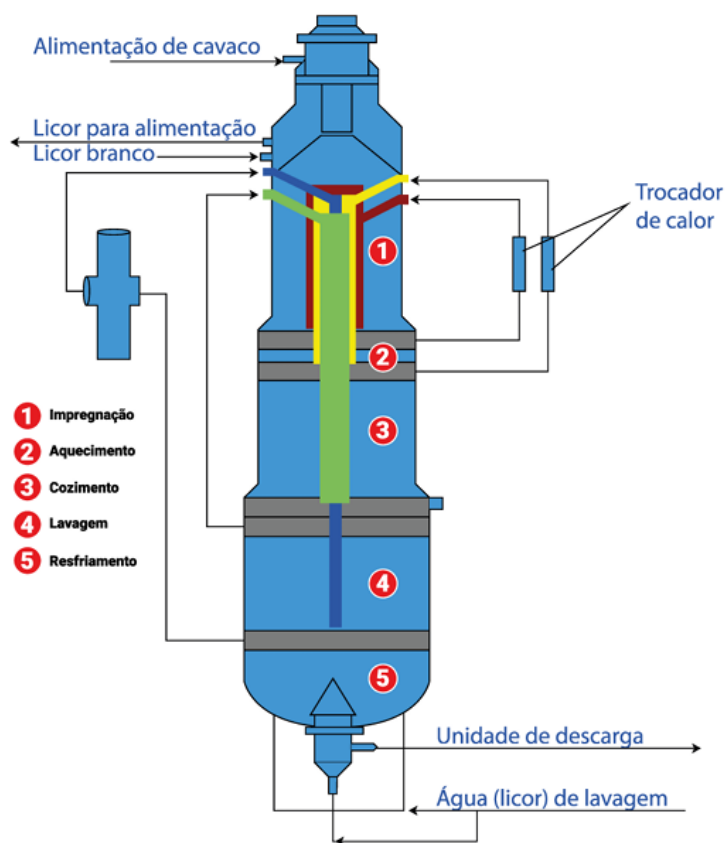


Fonte: REIS (2013).

A carga de álcali ativo, temperatura de cozimento e relação de licor e madeira são selecionados de forma a alcançar a lignina residual almejada. As condições são controladas por meio de amostragens do material e análises realizadas no laboratório, sendo o número de permanganato, também chamado de Número Kappa o procedimento mais utilizado pelas indústrias. (CASTRO, 2009; SOUZA, 2024).

O processo contínuo ocorre em um reator tubular vertical, onde a mistura de cavaco e madeira percorre o vaso em um fluxo descendente, passando pelas etapas de aquecimento, cozimento, lavagem e resfriamento. As últimas duas, são responsáveis pela lavagem e filtração do licor negro, assim também como desaquecimento da polpa e ajuste da consistência (BATISTA, 2018). A Figura 6 representa esquematicamente as etapas de um digestor contínuo.

Figura 6 - Etapas de um digestor contínuo



Fonte: MATOS (2018, *apud* FILIPIN, 2024).

No fundo do digestor a polpa marrom é descarregada e também estocada no *blow tank*, para então seguir para a etapa de lavagem. O tempo de cozimento também é definido de acordo com o grau de deslignificação desejado, sendo a relação entre tempo e temperatura, conhecida como Fator H, o parâmetro determinante para alcançar o nível de lignina residual pretendido (REIS, 2013).

A polpa extraída dos digestores contém cerca de 2-3% de lignina residual, que reflete um Número Kappa entre 13 e 20, suficiente para conferir uma coloração marrom para a polpa. Ademais, nas etapas subsequentes, o objetivo passa a ser a eliminação dos grupos cromóforos, para assim alcançar o resultado de uma celulose com elevado grau de alvura (MACEDO, 2006 *apud* REIS, 2013).

4.2.4 Lavagem, depuração e deslignificação

A polpa marrom é enviada para a depuração, que de forma mecânica separa os materiais estranhos às fibras, como nós, palitos que não foram devidamente desfibrados, areia e materiais metálicos (CASTRO, 2009). A pasta depurada pela ação

de cestos rotativos com diferentes tipos de malha ou peneiras, é lavada e posteriormente enviada para o branqueamento, ou para uma etapa predecessora de deslignificação por oxigênio (REIS, 2013).

A etapa de deslignificação ou pré-branqueamento tem por objetivo reduzir a quantidade de lignina residual da polpa entre 30-50% antes do branqueamento. Esse estágio trabalha com um pH alcalino, alcançado pela adição de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) ou com o uso do licor branco oxidado (LBO). A principal finalidade da deslignificação é reduzir o consumo de químicos no branqueamento, considerado como um dos principais custos na extração de celulose (REIS, 2013). A Figura 7 mostra a evolução da coloração da polpa após a saída do digestor, lavagem e deslignificação com oxigênio.

Figura 7 - Evolução da coloração da polpa



Fonte: REIS (2013)

4.2.5 Branqueamento

O branqueamento é um tratamento físico-químico que tem por objetivo melhorar as propriedades da pasta celulósica. Branquear a celulose é levar a fibra ao seu estado natural de maior alvura possível. Para que isso ocorra é necessário que o teor de lignina residual, responsável pela coloração da polpa, seja removido. Em função do elevado grau de alvura desejado, são necessárias várias etapas sucessivas, que devem ser executadas com a menor quantidade possível de agentes de branqueamento, aspirando uma menor degradação das fibras (CASTRO, 2009).

São muitos os agentes branqueadores utilizados na indústria, cujos principais podem ser listados na Tabela 2:

Tabela 2 - Principais agentes branqueadores utilizados na indústria

ESTÁGIOS	CÓDIGO	PRODUTO QUÍMICO
Cloração	C	Cloro gasoso
Extração alcalina	E	Soda cáustica
Hipoclaração	H	Hipoclorito de sódio ou Hipoclorito de Cálcio
Dióxido de cloro	D	Dióxido de cloro
Peróxido	P	Peróxido de hidrogênio
Oxigênio	O	Oxigênio (O ₂)
Ozônio	Z	Ozônio (O ₃)
Extração oxidativa	E ₀	Soda cáustica e Oxigênio (O ₂)
Extração alcalina com peróxido	E _p	Soda cáustica e Peróxido de hidrogênio

Fonte: Adaptado de CASTRO (2009).

A sequência de branqueamento vai depender do grau de alvura exigido, ou da disponibilidade dos reagentes químicos, podendo variar de uma sequência simples como CEH, até mais complexas como CEHDEH (CASTRO, 2009). Atualmente, as sequências são conhecidas como ECF (*Elemental Chlorine Free*) e TCF (*Totally Chlorine Free*), das quais os produtos químicos mais empregados são o dióxido de cloro (ClO₂), a soda cáustica (NaOH), o peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e o ozônio (O₃) (FILIPIN, 2024).

Após as etapas de branqueamento atingirem a alvura almejada, a polpa é estocada em uma consistência em torno de 10-12% em torres de armazenamento para posteriormente seguirem para a etapa de secagem ou produção de papel (REIS, 2013).

4.2.6 Secagem

A polpa formada pode ser utilizada em uma fábrica integrada com a produção de papel, ou vendida. A pasta destinada ao mercado deve ser desaguada (40-60%) de água ou seca (5-10%) de água residual, enfardada e embalada, conforme a destinação pretendida da empresa. No desaguamento a água é removida de forma mecânica por meio da filtração e prensagem, iniciando-se pelo posicionamento da polpa, com consistência baixa, em uma mesa formadora. A seguir, a folha é drenada

por sucção e por fim passa pelo processo de prensagem para máxima remoção de água (REIS, 2013).

Na secagem térmica, são utilizados métodos físicos para remoção da água que a prensagem não consegue remover, sendo os métodos mais utilizados, a secagem com cilindros secadores, túnel de vapor, *flash dryer* e *steam dryer*. Convencionalmente, no sistema de secagem em túnel, ou máquina secadora, a folha de pasta celulósica é formada após filtração e a prensagem, sendo logo em seguida enviada ao secador, onde flutua sobre ar aquecido. A folha sai do secador com um teor seco de 90-95%, posteriormente são cortadas, embaladas e agrupadas em uma certa quantidade de fardos, para seguidamente serem enviadas para os clientes (FILIPIN, 2024; REIS, 2013). A Figura 8 exemplifica algumas folhas após o corte.

Figura 8 - Folhas após o corte



Fonte: KLABIN (2024)

4.2.7 Recuperação química

A macrounidade de recuperação química é considerada a mais importante na fabricação de celulose, estando relacionada diretamente à viabilidade econômica da de todo o processo *kraft* (CASTRO, 2009). Basicamente o processo de recuperação químico pode ser resumido na queima de Licor Preto concentrado previamente. A energia proveniente da queima do licor é utilizada em diversos processos dentro da fábrica, podendo ser transformada em energia mecânica, elétrica e térmica (REIS, 2013).

O primeiro passo da recuperação química é a passagem do licor preto diluído, 14% de sólidos, por uma sequência de evaporadores de múltiplos efeitos. Na saída

do sistema, o licor estará a uma concentração de 80% de sólidos, chamado de licor preto concentrado. Ademais, o material rico em matéria orgânica é enviado para queima na caldeira de recuperação (CASTRO, 2009).

Ao mesmo tempo, a caldeira de recuperação pode ser considerada um reator químico, como também um gerador de vapor. A principal função do equipamento é transformar o sulfato de sódio do licor em sulfeto de sódio, por uma reação de redução química. Antes de ser queimado o licor preto é enriquecido com cinzas da combustão da própria caldeira, buscando a reposição da sulfidez do licor de cozimento (REIS, 2013).

A combustão ocorre em um ambiente deficiente de oxigênio para que ocorra devidamente a reação de redução, cujo foco é a queima da matéria orgânica formada principalmente por lignina. O vapor da queima é utilizado nos demais processos dentro da indústria e o concentrado de matéria inorgânica, chamado de *smelt*, é recolhido no fundo da caldeira, sendo posteriormente solubilizado com licor fraco, recebendo o nome de licor verde (CASTRO, 2009; REIS, 2013).

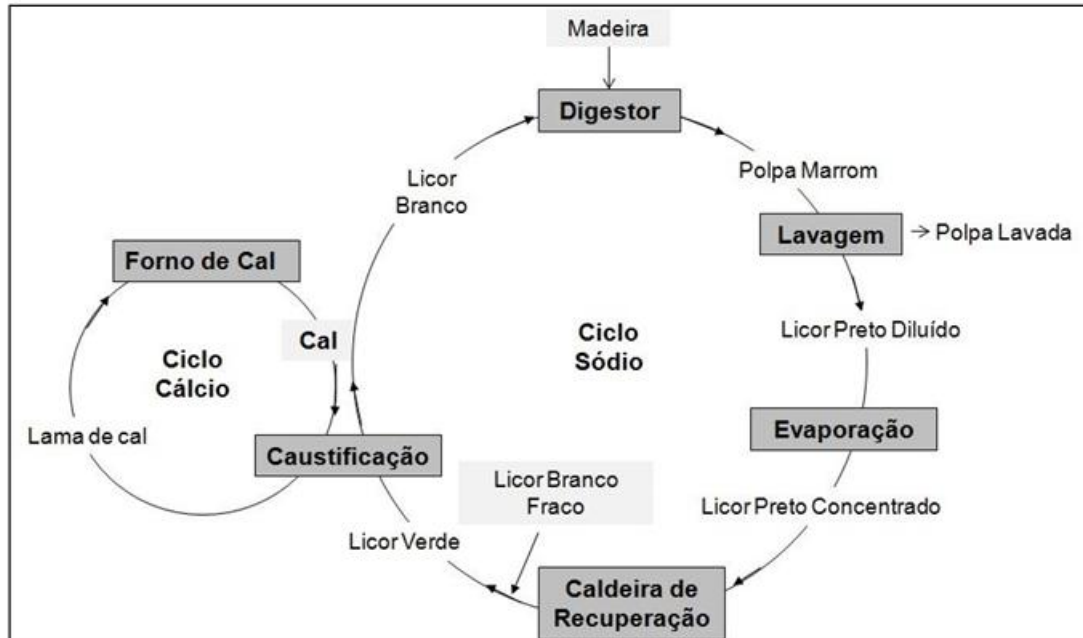
O licor verde, uma combinação de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S), é convertido em licor de cozimento na caustificação, através da adição de óxido de cálcio, oriundo da calcinação da lama de carbonato de cálcio do forno de cal. Inicialmente o licor é transferido para o setor de caustificação, onde passa pelo processo de clarificação, ou seja, remoção das impurezas insolúveis contidas no licor, chamadas de *dregs*. Essa filtração direta pode ser realizada por decantadores ou filtros e, logo após, o licor verde filtrado é tratado com uma suspensão concentrada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cuja reação resulta em carbonato de sódio (Na_2CO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) (REIS, 2013).

A primeira etapa da reação é o apagamento do óxido de cálcio (CaO) pela reação com a água do licor verde, resultando em hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que reage imediatamente com o carbonato de sódio (Na_2CO_3), sendo convertido em (NaOH).

O licor branco bruto produzido nos caustificadores contém um precipitado de (CaCO_3), também conhecido como lama de cal. O licor é enviado para polpação, enquanto a lama de cal passa por um processo de lavagem, buscando a remoção do licor residual, que pode resultar na formação de pedras no forno de cal. A lama lavada, possui em torno de 60-80% de sólidos, sendo posteriormente calcinada no forno de cal. O carbonato de cálcio (CaCO_3) é então convertido em óxido de cálcio, com uma

eficiência estimada de 85-95%, fechando o ciclo de recuperação química. Figura 9 retrata de forma esquemática e simplificada o ciclo de recuperação química *kraft*.

Figura 9 - Ciclo de recuperação química *kraft*



Fonte: REIS (2013).

4.3 Formação do papel

O papel é caracterizado por fibras unidas, tanto fisicamente quanto quimicamente por pontes de hidrogênio (CAMPOS, 2011). A polpa celulósica extraída no processo *kraft*, como relatado anteriormente, pode ser utilizada na fabricação de papel em uma fábrica integrada, ou após secagem, enviada para os clientes.

A chegada das fibras na preparação da massa para formação do papel pode ocorrer de diversas formas. Em uma fábrica integrada, a polpa pode chegar por tubulações com uma consistência de 3 a 6%, em folhas, ou rolos com umidade em torno de 10%, ou proveniente de uma desaguadora, com 60% de umidade (CAMPOS, 2011).

4.3.1 Desagregação

Em fábricas não integradas, existe a necessidade de formar uma suspensão de fibras em água com uma consistência adequada para as próximas etapas. Esse processo é realizado por um desagregador, também chamado de *hydrapulper*, que se

assemelha a um liquidificador e gigante de formato cilíndrico e possui grandes rotores giratórios em seu fundo (BATISTA, 2018, CAMPOS, 2011).

4.3.2 Depuração

Pastilhas, nós, areia e partículas metálicas são danosos à máquina de papel, desgastam equipamentos, causam problemas na secagem e aumentam o consumo de vapor. A depuração é a etapa destinada a retirada desses materiais estranhos, que são indesejáveis para aparência e qualidade da folha de papel. Os sistemas de depuração mais conhecidos são: peneiramento, também chamado de *screen*, e centrifugação ou *cleaner*, depurador centrífugo (CAMPOS, 2011).

Na depuração por peneiramento, a separação é feita de acordo com o tamanho e o formato das partículas e a classificação pode ser realizada por equipamentos como, diafragma ou tela plana, cilindro com alimentação interna e cilindros pressurizados (CAMPOS, 2011)

Em contrapartida, na separação feita por depuradores centrífugos, a classificação é feita em função da densidade, utilizando-se separadores de areia, cestas rotativas, cilindros e ciclones. A escolha dos equipamentos é definida por fatores como, capital disponível e facilidade de manutenção (CAMPOS, 2011)

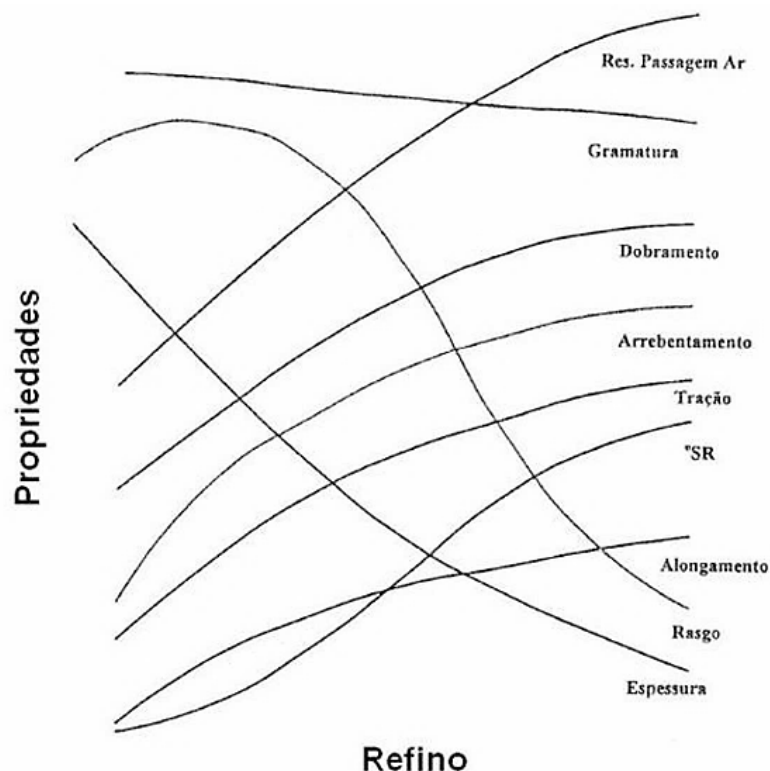
4.3.3 Refinação

Após desagregação e retirada das impurezas, a polpa é enviada para a etapa de refinação, que pode ser considerada uma das mais importantes da fabricação de papel. A refinação das pastas celulósicas é caracterizada pelo tratamento mecânico das fibras, visando a melhora das propriedades que resultam na união entre as fibras, buscando garantir a obtenção de um papel mais homogêneo e resistente a esforços mecânicos (CAMPOS, 2011).

Para alcançar as características aspiradas, as fibras passam por uma série de processos físicos que podem ocasionar seu encurtamento, hidratação e fibrilação. São muitos os efeitos desejados e indesejados resultantes do tratamento com refinação, dos quais se destacam como norma, o aumento das seguintes propriedades: resistência à tração, arrebentamento, união interna, densidade e tempo de drenagem. Por outro lado, a opacidade, permeabilidade, poder absorvente,

estabilidade dimensional e compressibilidade diminuem. O rasgo apresenta um comportamento de aumento com uma refinação moderada, porém apresenta tendência de queda com um maior tratamento mecânico, conforme destacado na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento resultantes da refinação

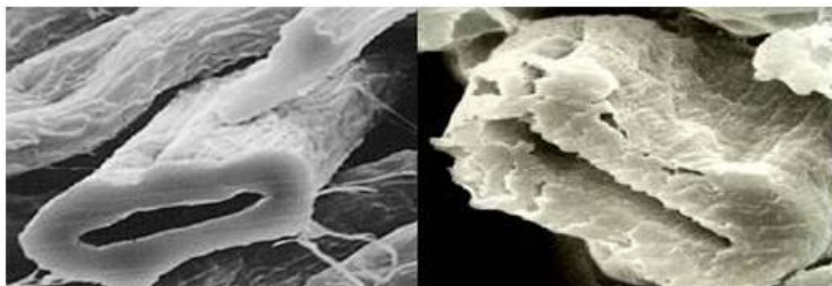


Fonte: CAMPOS (2011)

O processo de refinação é feito em uma máquina denominada refinador, composta por dois discos face a face, que giram em sentido contrário, aplicando uma tensão de cisalhamento na massa de celulose. Em escala industrial a distância entre os discos é mantida em torno de 100 μm , demonstrando que a ação do refino pode ser considerada drástica sobre as fibras, provocando modificações irreversíveis à estrutura das fibras, seja por ação mecânica dos discos contra a fibra, ou de fibra contra fibra (BATISTA, 2018, CAMPOS, 2011).

Como resultado da pressão exercida pelos discos, as ligações que mantêm a estrutura das fibras vão se quebrando, permitindo a separação de suas paredes. Fibrilas são expostas no corpo principal da fibra, permitindo que novas superfícies absorvam água e, conseqüentemente, ocorra mais fibrilação. Os impactos causados nas fibras fazem com que se tornem mais flexíveis e resistentes, decorrendo no chamado, colapso da fibra, conforme a Figura 11 (CAMPOS, 2011).

Figura 11 - Colapso da fibra

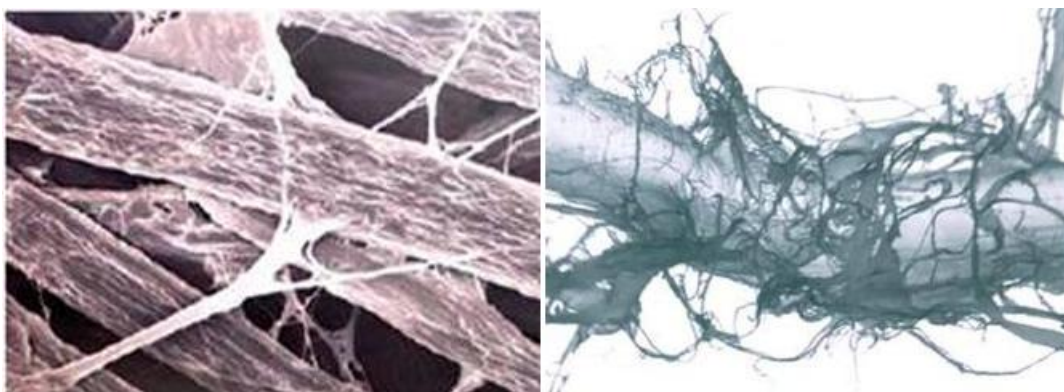


Fonte: FOELKEL (2007).

Os efeitos primários, que possibilitam a diferenciação entre uma fibra refinada e não refinada são: fibrilação (interna e externa) e efeitos destrutivos, como corte e geração de finos (CAMPOS, 2011). Tanto as fibras curtas, quanto longas são constituídas de uma camada primária e outras três secundárias. O talo central da fibra é chamado de Lúmen, enquanto as demais camadas se aglutinam através da lamela central, que é constituída basicamente de lignina (PILÃO, 2001).

A fibrilação externa envolve a perda parcial de material lamelar e exposição das camadas secundárias. Para cada uma dessas camadas, existe um certo volume específico de fibrilas, que representam moléculas celulósicas constituídas de minúsculas fibras parecidas com cabelos, que são separadas pelo contato com as lâminas dos discos, aumentando consideravelmente a área superficial das fibras, que resulta em um maior agrupamento durante o processo de formação da folha (CAMPOS, 2011; PILÃO, 2001). A Figura 12 demonstra os efeitos da fibrilação externa.

Figura 12 - Fibrilação externa

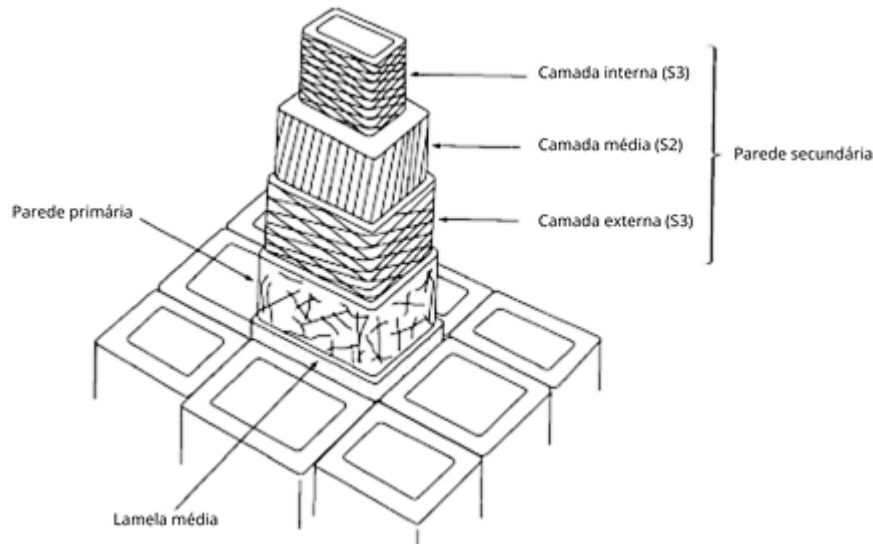


Fonte: FOELKEL (2007).

Na fibrilação interna, ocorre a delaminação coaxial da parede celular, decorrente do aumento da quantidade de água na célula. Esse aumento é causado principalmente pela remoção da camada primária, que é impermeável (CAMPOS,

2011; PILÃO, 2001). A Figura 13 é uma representação das diferentes camadas de uma fibra, constituída de uma camada primária e três camadas internas.

Figura 13 - Estrutura das fibras



Fonte: Adaptado de SUNDBLAD (2015).

O corte das fibras é uma das consequências inerentes do processo de refinação. Em alguns casos, como o da fibra longa, o efeito de corte é desejado para melhorar a formação da folha na máquina de papel, entretanto, na maioria das vezes, o corte excessivo pode resultar na perda de características de resistência da fibra e em um maior número de finos, resultantes do desprendimento de partes de material laminar e da parede celular (CAMPOS, 2011; PILÃO, 2001).

Na indústria é mais comum de se expressar o nível de refinação em termos da resistência à drenagem da polpa, através do aparelho de Schopper-Riegler (°SR), que expressa a drenabilidade da polpa após o tratamento mecânico. Quanto maior o refino, maior a fibrilação, e consequentemente, mais água é retida pela polpa, resultando em maiores valores de °SR.

4.3.4 Máquina de papel

A massa que segue para a formação do papel pode passar por uma etapa adicional de aditivação com produtos químicos, para lhe conferir maior ou menor brancura, opacidade e resistência mecânica (YUJI, 2013 *apud*, BATISTA, 2018).

Na etapa da caixa de entrada, a massa é colocada em uma esteira conhecida como Tela Formadora, onde forma uma fina camada com 95% de água, a qual posteriormente é drenada para formação da folha. As fibras previamente drenadas

são encaminhadas para a prensagem, a fim de promover maior entrelaçamento e, conseqüentemente, maior resistência e espessura de folha (BATISTA, 2018).

O papel, então, passa por cilindros aquecidos a vapor, visando a remoção de água residual. Em algumas situações, as bobinas formadas necessitam de uma etapa adicional, conhecida como rebobinamento, objetivando a formação de bobinas de tamanho menor para facilitar a manipulação das gráficas, ou nas próprias dependências da papelreira (YUJI, 2013 *apud*, BATISTA, 2018).

4.4 Resistência à tração

Em uma fábrica de papel são muitas as premissas básicas para fabricação de um produto com qualidade. Independentemente do tipo de papel fabricado, a alta produtividade, o baixo custo e a alta eficiência operacional, caracterizada por poucas quebras de folha e poucas paradas, são metas essenciais a serem alcançadas por qualquer papelreiro (FOELKEL, 2007; GREGERSEN, 2005).

Para alcançar esses objetivos, a matéria-prima deve ser mais uniforme possível, mantendo uma estreita faixa de variação, que resulta na padronização do processo produtivo dentro da fábrica, como no nível de refinação, a quantidade de aditivos químicos, a drenagem, consumo de utilidades, consolidação da folha, propriedades físico-mecânicas e óticas do papel (FOELKEL, 2007).

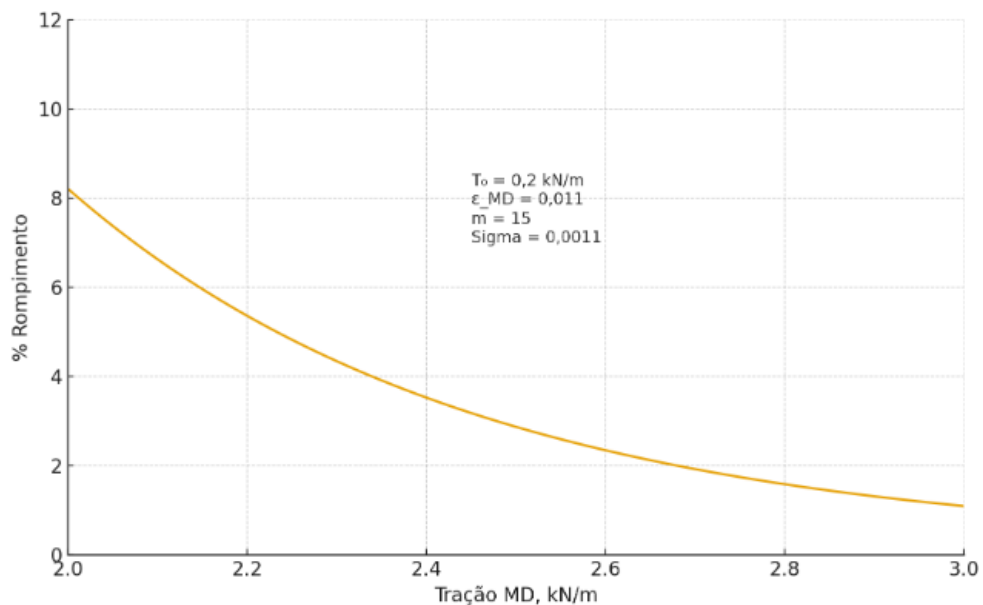
Algumas das propriedades das fibras que devem ser controladas são influenciadas diretamente pelas características da madeira retirada da floresta. Árvores com maior ou menor densidade básica, por exemplo, determinam polpas com diferentes qualidades. Outras propriedades, por sua vez, estão relacionadas às condições operacionais do processo industrial de extração de celulose. Etapas como a produção cavacos, cozimento, branqueamento e secagem, influenciam em alguns parâmetros da polpa, das quais podem se destacar a viscosidade, a degradação das cadeias de carboidrato e a integridade das fibras.

Em sua maioria, as propriedades da polpa celulósica dependem tanto da qualidade da madeira utilizada, quanto dos processos industriais aplicados na sua extração. Exemplos disso são as características de resistência, como o índice de retenção de água (IRA), a resistência da folha a úmido (WWS) e a resistência da fibra individual, que representa um importante indicador de performance na máquina de papel (FOELKEL, 2007).

Para Gregersen (2005), a *runnability*, ou estabilidade e desempenho na produção de papel, é diretamente relacionada à propriedade de resistência das fibras. Uma celulose com características boas de tração e alongação, refletem uma menor quantidade de quebras de folha, uma melhor uniformidade e resistência às tensões na ao longo da máquina de papel.

Ao mesmo tempo, os estudos de Uesaka (2001), reforçam a tese de que a frequência de ruptura da folha diminui com o aumento da resistência à tração na direção da máquina, apresentando um comportamento com uma ligeira não linearidade, conforme o gráfico da Figura 14.

Figura 14 - Comparação entre porcentagem de rompimento e tração



Fonte: Adaptado de UESAKA (2001).

Diante disso, mostra-se essencial o controle dessa variável no processo de extração de celulose, visto que a gestão adequada, por meio de resultados, auxilia na justificativa correta para o desempenho positivo ou negativo da polpa na máquina de papel (FOELKEL, 2007).

4.4.1 Análise de resistência à tração

Em laboratório, a resistência à tração da fibra, denominada como índice de tração, é obtida seguindo uma série de métodos normalizados, que simulam até mesmo a formação do papel, justamente para se ter uma melhor predição da performance da pasta celulósica. A Tabela 3 lista os métodos de ensaios referentes às análises.

Tabela 3 - Lista de ensaios para determinação do índice de tração

ANÁLISES	MÉTODOS
Desagregação	ABNT NBR ISO 5263-1: Pastas celulósicas — Desagregação a úmido em laboratório. Parte 1: Desagregação de pastas celulósicas químicas
Refinação PFI	ABNT NBR ISO 5264-2: Pastas celulósicas — Refinação em laboratório. Parte 2: Método do refinador PFI
Formação de folhas	ABNT NBR ISO 5269-1: Pastas celulósicas — Preparação de folhas em laboratório para ensaios físicos. Parte 1: Método do formador de folhas convencional
Teste do índice de resistência à tração	ABNT NBR ISO 1924-3: Papel e cartão — Determinação das propriedades de tração. Parte 3: Método da velocidade constante de alongamento (100 mm/min)

Fonte: O Autor (2025).

As três primeiras normas, referem-se a ensaios que simulam a fabricação de papel, dos quais se destacam as etapas de desagregação, refinação e a formação das folhas.

O ensaio inicial, relativo à norma ABNT NBR ISO 5263-1, trata sobre a desagregação de amostras de pastas químicas. Nele, uma certa quantidade de celulose, de teor seco superior a 60%, é umedecida por 4 horas e posteriormente desagregada à 30000 revoluções em um equipamento composto por uma hélice de três pontas, chamado de desagregador.

Após desagregação, a amostra pode ou não ser submetida à refinação, porém, como relatado anteriormente, a etapa, visa a melhora das propriedades mecânicas da fibra, sendo comum em um ensaio completo a realização dos testes em diferentes níveis de refino.

O método ABNT NBR ISO 5264-2 estabelece que a refinação deve ser realizada em moinho PFI, onde o controle do refino é expresso em termos de revoluções aplicadas sobre carga constante, reproduzindo o efeito mecânico típico de refinadores industriais.

De início, após a etapa de desagregação, a suspensão de pasta celulósica deve ser espessada através de drenagem, até alcançar uma fração mássica entre 11 e 20%, evitando-se a perda de fibras. A massa deve ser diluída a uma consistência de 10% e posicionada nas paredes do moinho.

O moinho PFI é constituído de um rotor, um recipiente de refinação com tampa e um dispositivo de carga para exercer a pressão de refinação (força de refinação por unidade de comprimento da barra). O rotor é constituído por 33 barras de mesmo comprimento, que são pressionadas pelo dispositivo de carga contra a parede do recipiente. Essa carga é normatizada por unidade de comprimento da barra, que deve ser de $(3,33 \pm 0,10)$ N/mm. A frequência rotacional é predeterminada e variam de acordo com o nível de refino pretendido.

A polpa recém refinada deve ser novamente desagregada à 10000 revoluções e enviada para um formador de papel, conforme a norma ABNT NBR ISO 5269-1. Após drenagem, para remoção da água residual e garantia de espessura e consistência adequada, a polpa ainda úmida é transferida para feltros ou chapas de prensagem e então é submetida a uma pressão de 410 kPa por determinado tempo. O procedimento é repetido mais uma vez, para que em seguida as chapas de secagem sejam separadas e enviadas para uma câmara ou sala de condicionamento, seguindo a norma ABNT NBR NM-ISO 187.

As folhas devem ser condicionadas a uma atmosfera normalizada, com boa circulação de ar, pelo período de no mínimo 4h. As condições de armazenamento são de temperatura de (23 ± 1) °C e umidade relativa de (50 ± 2) %. O tempo de estabilidade das condições da sala deve ser de no mínimo 1h, para que então os testes físicos possam ser realizados de forma padronizada.

A norma ABNT NBR ISO 1924-3 estabelece que a resistência à tração é a força máxima de tração por unidade de largura que o papel ou cartão suportam antes do rompimento, sob condições normalizadas. Quando essa resistência é dividida pela gramatura do papel, obtém-se o índice de tração, dado em N·m/g.

O teste é realizado em um corpo-de-prova posicionado entre duas garras no aparelho para ensaio, prendendo a amostra que é submetida à tracionamento em uma velocidade de alongamento constante de 100 mm/min.

Somando-se o tempo de análise de todos os ensaios, a duração estimada para se obter resultados do índice de tração é de aproximadamente 11 horas, como observado na repetibilidade em laboratório. A Figura 15 mostra um fluxograma com o tempo considerado para cada uma das etapas.

Figura 15 - Fluxograma normatizado da análise em laboratório



Fonte: O Autor (2025)

Embora a relevância da resistência à tração já ter sido discutida, em muitos laboratórios de qualidade a análise possui uma frequência limitada a um resultado semanal. Uma oportunidade de otimização da rotina, é a utilização de parâmetros do processo para a prever o comportamento da celulose, sendo a anatomia das fibras uma dessas propriedades.

4.5 Morfologia das fibras de celulose

Em linha com as ideias de Foelkel (2007), a morfologia, ou anatomia das fibras da madeira e seus constituintes químicos são muito importantes para se realizar previsões do comportamento da polpa em condições operacionais do processo. Dentre as fibras, o eucalipto se difere das demais espécies. Seu comprimento e *coarseness* são menores que as demais fibras disponíveis no mercado e como consequência sua população fibrosa é maior. Além disso, por possuir maior espessura de parede, suas fibras colapsam menos (FISEROVÁ, 2011, *apud* DEMUNER *et al.*, 2022).

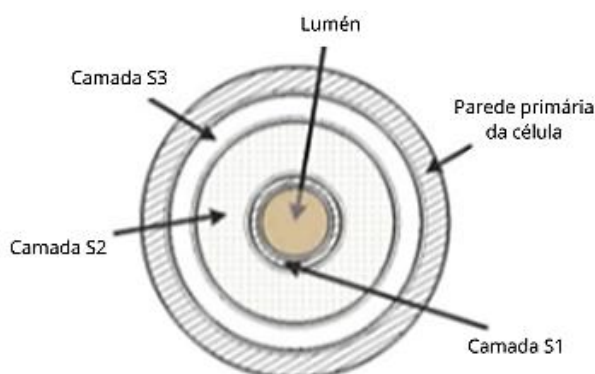
A norma ABNT NBR 15069 estabelece que o princípio de medição da morfologia é ótico, consistindo na captura de imagens do escoamento de uma amostra com consistência pré-determinada. Em uma amostragem são avaliadas milhares de fibras para se ter a melhor dimensão das propriedades. A principal vantagem do

método é o curto tempo de análise, que depende apenas da disponibilidade das amostras de polpa, com ou sem refino. Dentre as características, destacam-se: Comprimento, largura, diâmetro de lúmen, espessura de parede, *coarseness*, população fibrosa, *kinks*, *curl*, ângulo de *kinks*, fibrilação e finos.

O comprimento pode ser dividido entre o aritmético e o ponderado. O comprimento aritmético é obtido pela média dos comprimentos individuais de cada fibra, enquanto o ponderado considera como fatores de ponderação, a extensão de cada fibra e a massa de amostra. A norma ISO 1606-2 (Determinação do comprimento da fibra por análise óptica automatizada) define que o comprimento das fibras pode variar entre 0,2 – 7,0 mm. Da mesma forma, a largura pode ser estimada por média aritmética.

A espessura de parede (CWT) representa o comprimento da parede celular da fibra. Quanto maior for sua espessura, maior a tendência de rigidez e resistência ao colapso. De forma análoga o diâmetro do lúmen, que é o canal interno da fibra delimitado pela parede celular, pode ser determinado oticamente, ou matematicamente com os dados de diâmetro de espessura de parede e largura de fibra. Outro parâmetro ligado ao CWT é a área de seção cruzada da fibra (CSA), que em termos simples corresponde a área de toda a parede celular da fibra, desconsiderando o lúmen. Fibras com maiores valores de CSA tendem a ser mais resistentes e colapsar com maior dificuldade. A Figura 16 demonstra uma representação simplificada da estrutura da fibra.

Figura 16 - Representação da estrutura da fibra

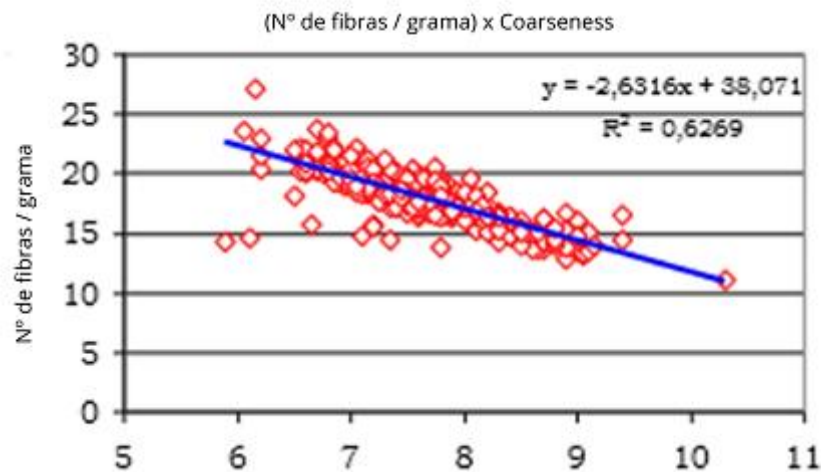


Fonte: Adaptado de SULEIMAN, MAHAKUR (2023).

O *coarseness*, também conhecido como aspereza, é a densidade linear das fibras, expresso geralmente em termos de mg/100m. A propriedade depende diretamente da largura da fibra e espessura da parede. Fibras com maior valor de

coarseness apresentam paredes celulares mais espessas, uma maior densidade e uma certa dificuldade na ligação com as demais fibras, dependendo do equipamento de morfologia, o *coarseness* também pode ser determinado oticamente (FOELKEL, 2007). A população fibrosa, por outro lado, é a quantidade de fibras por grama de polpa e é fortemente relacionada ao *coarseness*, apresentando um comportamento inversamente proporcional, conforme mostra a Figura 17.

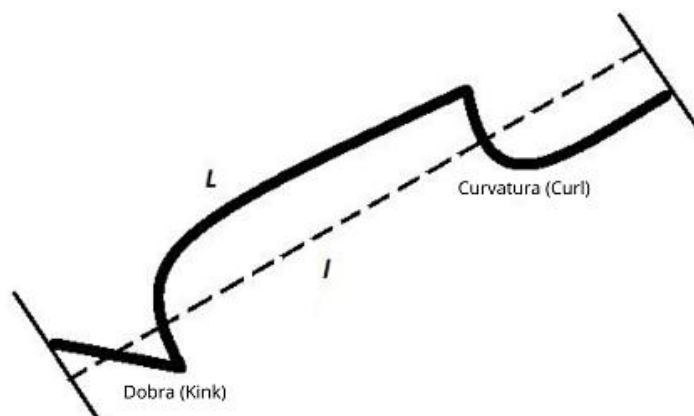
Figura 17 - Relação entre população fibrosa e coarseness



Fonte: Adaptado de ANDRADE (2017).

Alguns esforços mecânicos durante o processo de extração de celulose podem ocasionar deformações nas fibras, afetando negativamente as características de resistência (FOELKEL, 2007). O *curl*, ou encanoamento da fibra, representa a relação entre o comprimento real da fibra e o comprimento projetado. Quanto maior o valor de *curl*, expresso em porcentagem, menos reta é a fibra. Os *kinks*, ou torções, são definidos pelas mudanças abruptas de direção da fibra. O ângulo médio dessas dobras também é mensurado oticamente (ANDRADE, 2017). A Figura 18 representa ao mesmo tempo o comportamento de encanoamento e torções.

Figura 18 - Comportamento de encanoamento e torções



Fonte: Adaptado de SUNDBLAD (2015).

Diferente do método de determinação por *Britt Jar*, nos equipamentos de morfologia, os finos são mensurados visualmente, utilizando como referência informações padronizadas de comprimento e largura das fibras. As fibras geralmente possuem comprimento maior que 0,2 mm e largura maior que 10 μm , enquanto os finos são divididos em duas categorias. A primeira é de finos tipo A, que possuem comprimento menor que 0,2 mm e os finos tipo B, que possuem comprimento maior que 0,2 mm e largura menor que 10 μm (FOELKEL, 2009).

Por fim, a fibrilação é decorrente da delaminação parcial da parede celular, efeito comum da etapa de refinação na fabricação de papel. A fibrilação externa libera fibrilas superficiais, aumentando a área disponível para interação entre fibras e como resultado, maior é a coesão das fibras na estrutura do papel.

4.5.1 Correlações entre morfologia e a resistência à tração.

Muitos autores já discutiram o impacto das características anatômicas na qualidade da pasta celulósica. Em especial, a resistência à tração é um dos parâmetros mais afetados por algumas das propriedades citadas anteriormente. Em suas pesquisas, Page (1969) apresentou um modelo teórico que relacionava o índice de tração com a morfologia. Em seu trabalho, as dimensões como comprimento e largura de fibra afetavam positivamente na resistência à tração, assim como, a resistência das ligações e o RBA.

Da mesma forma, Horn (1978) desenvolveu uma série de equações, utilizando informações da morfologia de fibras *hardwood* para predição de parâmetros de polpas refinadas e não refinadas. Como resultado, as características que apresentaram maior

correlação com as propriedades mecânicas foram o comprimento de fibra, a espessura da parede celular e o ângulo de fibrilas.

Foelkel (2007), relata que a morfologia da fibra é muito útil na predição da resistência da polpa e seu comportamento na máquina de papel. Ele comenta que as deformações das fibras, como *curl* e *kinks* afetam negativamente na resistência das fibras, enquanto que o comprimento de fibra, a densidade da parede celular e a viscosidade da polpa apresentam correlação positiva com o parâmetro.

Ademais, Sundblad (2015) utilizou informações de um analisador online de morfologia para a construção de um modelo de regressão linear preditivo do índice de tração. Demuner *et al.* (2022) também empregou dados de morfologia online na criação de um modelo destinado a prever a resistência à tração das fibras submetidas a 1500 revoluções de refino no moinho PFI. A pesquisa revelou uma boa correlação entre a variável e propriedades da fibra como, ângulo de *kinks*, comprimento ponderado e viscosidade.

Diante da indicação de boas correlações entre a morfologia e a resistência à tração, averiguadas pelos trabalhos citados, a criação de um modelo de regressão linear múltipla demonstra ser a melhor opção para otimização da análise.

4.6 Regressão linear múltipla

Utiliza-se a regressão linear múltipla, quando a variável dependente está em função linear de duas ou mais variáveis explanatórias (HOFFMANN, 2016). O modelo com k variáveis independentes é representado pela Equação 1:

$$y_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1i} + \dots + \hat{\beta}_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

onde, y_i é a variável dependente, x_{ki} são as variáveis dependentes, $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ são os parâmetros e ε_i é o erro, com $i = 1, \dots, n \mid n \in \mathbb{N}$.

4.6.1 Método dos quadrados mínimos

O método mais utilizado para se encontrar os parâmetros é o de quadrados mínimos. Segundo Hoffmann (2016), o método consiste em encontrar valor para os parâmetros para minimizar a soma dos quadrados mínimos dos desvios da amostra. Os parâmetros podem ser obtidos pela equação:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}(X'Y) \quad (2)$$

onde, $X'X$ e $X'Y$, são:

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \cdots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \cdots & \sum x_{2i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{1i}x_{ki} & \sum x_{2i}x_{ki} & \cdots & \sum x_{ki}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X'Y = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ki}y_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

e $(X'X)^{-1}$ é a inversa de $(X'X)$

Conforme descrito por Montgomery (2021), para obter a equação (2) é necessário determinar o vetor de estimadores de mínimos quadrados, $\hat{\beta}$, que minimiza a soma dos quadrados dos erros, $(S(\beta))$:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)'(Y - X\beta) = Y'Y - 2\beta'X'Y + \beta'X'X\beta \quad (5)$$

$\beta'X'Y$ é um escalar, da mesma forma que sua transposta $Y'X\beta$, que devem satisfazer:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2X'Y + 2X'X\hat{\beta} = 0 \quad (6)$$

que simplificada, chega-se na equação normal dos mínimos quadrados:

$$X'Y = X'X\beta \quad (7)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação (7) pela matriz transposta $(X'X)^{-1}$, obtém-se a equação (2).

4.6.2 Análise de variância (Teste F)

Na regressão linear múltipla, o teste F serve para estimar a significância global do modelo, de forma que o conjunto das variáveis independentes devam possuir boa correlação com a variável dependente (MONTGOMERY, 2021). As hipóteses testadas são:

$$\begin{cases} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \cdots \beta_k = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0, \text{ para pelo menos um } j = 1, \dots, k; \text{ com } k \in \mathbb{N} \end{cases}$$

A hipótese nula (H_0) implica que as variáveis independentes não possuem efeito significativo sobre a variável independente. A segunda hipótese (H_1) é a rejeição da primeira, onde pelo menos um dos parâmetros têm efeito significativo na variável dependente (SILVA, 2024).

O resultado do teste pode ser validado pelo valor p, que indica a probabilidade de se obter um valor de F tão elevado quanto o observado, caso todos os coeficientes da regressão fossem iguais a zero. A hipótese (H_1) é aceita se o valor p for menor que o nível de significância pré-definido (α), assim, rejeitando a hipótese nula (H_0), significando que as variáveis independentes selecionadas são importantes para o modelo (ANDERSON; SWEENEY; WILLIAMS 2020)

4.6.3 Teste t

O teste t é uma boa ferramenta para analisar individualmente se as variáveis selecionadas para o modelo são significativas (ANDERSON; SWEENEY; WILLIAMS 2020). Suas hipóteses são:

$$\begin{cases} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0 \end{cases}$$

Caso H_0 não seja rejeitada, a variável independente X_j pode ser excluída do modelo. Assim como no teste F, o resultado pode ser validado pelo valor p de cada variável, onde, resultados menores que o nível de significância (α) rejeitam a hipótese nula, portanto, as variáveis são significativas (ANDERSON; SWEENEY; WILLIAMS 2020).

4.6.4 Coeficiente de Determinação Múltiplo e Coeficiente de Determinação Múltiplo Ajustado

O coeficiente de determinação múltiplo, chamado de R^2 é utilizado para avaliar o ajuste do modelo, sendo obtido por:

$$R^2 = \frac{SQRegressão}{SQTotal} \quad (8)$$

onde,

$SQTotal$ = soma dos quadrados total = $\sum (y_i - \bar{y}_i)^2$, com y_i sendo o valor real da variável dependente e $\bar{y}_i$ a média desses valores.

$SQRegressão$ = soma dos quadrados devido à regressão = $\sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$, com $\hat{y}_i$ representando o valor predito pelo modelo.

Muitos analistas preferem o valor ajustado do R^2 , a fim de evitar superestimar o impacto da adição de uma variável independente, sobre a variabilidade explicada pela equação do modelo de regressão (ANDERSON; SWEENEY; WILLIAMS 2020).

Com n representando o número de observações e p o número de variáveis, o coeficiente fica:

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (9)$$

4.6.5 Multicolinearidade

Em algumas situações é comum de se observar que as variáveis independentes de um modelo são correlacionadas, cujo efeito se denomina multicolinearidade. Essas variáveis podem acabar afetando a análise, ao alterar o sinal de forma errônea do coeficiente de algum parâmetro, ou impossibilitando de se determinar a significância real das variáveis (ANDERSON; SWEENEY; WILLIAMS 2020). Uma das formas de se detectar esse efeito é através do teste de Fator de Inflação da Variância (FIV), para cada parâmetro, cuja equação, segue:

$$FIV(\beta_j) = \frac{1}{(1-R_j^2)} \quad (10)$$

com $j = 1, \dots, k$ e R_j^2 sendo o coeficiente de determinação obtido quando x é regredido com relação às outras variáveis independentes. Para valores de $FIV(\beta_j) > 10$, evidencia-se a presença grave de multicolinearidade. Alguns autores, de forma mais conservadora, sugerem que o FIV não deva exceder valores maiores 4 ou 5 (MONTGOMERY, 2021).

4.6.6 Durbin-Watson

O teste de Durbin-Watson parte do pressuposto que modelos de regressão não devem possuir correlação entre seus erros, de forma que são independentes sob a condição de normalidade (GUJARATI, 2006, apud SILVA, 2024).

O valor estimado para o teste deve estar entre 0 e 4, porém os valores próximos a 2 indicam que os dados do modelo não possuem uma autocorrelação significativa, rejeitando assim a hipótese nula. Valores menores que 2 indicam uma autocorrelação positiva, enquanto que valores maiores, indicam uma autocorrelação negativa. Se os erros estiverem correlacionados, a regressão de mínimo quadrados pode subestimar o erro padrão dos coeficientes (GUJARATI, 2011, apud NASCIMENTO, 2023)

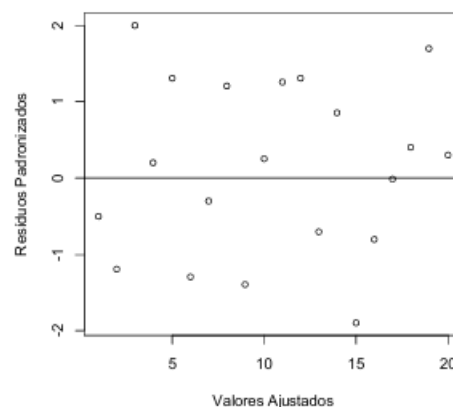
4.6.7 Análise de resíduos

Analisar os resíduos é uma etapa importante ao verificar se um modelo possui uma adequação nos seus resultados. Com relação aos resíduos, que consistem na diferença entre os valores observados e os valores previstos, um dos critérios é verificar se seguem uma distribuição normal. O teste de Shapiro-Wilk é utilizado para avaliar a hipótese de que uma amostra vem de uma população normalmente distribuída (SILVA, 2024).

Os dados da estatística variam entre 0 e 1, com valores mais próximos de 1 indicando que o modelo segue uma distribuição semelhante à normal. Seu valor p, menor que o nível de significância, indica que os dados rejeitam a hipótese nula, simbolizando que os dados amostrais não seguem uma distribuição normal. Em termos práticos, caso p seja maior que o nível de significância escolhido, há evidências suficientes para sugerir que os dados sejam de uma distribuição normal (SILVA, 2024).

Outra forma de verificar que os resíduos seguem uma distribuição normal é realizar uma análise de gráficos construídos, onde no eixo das abcissas, estão os valores ajustados da variável dependente e no eixo da ordenada, estão os resíduos padronizados. Caso a distribuição dos pontos seja bem aleatória no gráfico e sem nenhuma tendência aparente, representa uma distribuição normal dos resíduos (CHARNET et al., 2008, apud NASCIMENTO, 2023). A Figura 19 representa uma distribuição gráfica dos dados adequada.

Figura 19 - Distribuição padrão de resíduos



Fonte: NASCIMENTO (2023).

4.6.8 Seleção de variáveis

Frequentemente, para se realizar a escolha das variáveis adequadas para o modelo, utiliza-se o método de regressão por etapas, chamado de *stepwise*. Nele, as variáveis são incluídas no modelo uma por vez, verificando se o ajuste é adequado, ou são incluídas todas ao mesmo tempo, para se rejeitar uma por vez até a melhor composição (CHARNET et al., 2008, *apud* NASCIMENTO, 2023). O método permite alternadamente, eliminações ou inclusões de variáveis no modelo, realizando uma combinação dos seguintes métodos:

- *Forward* (passo à frente): Consiste de início na inclusão de apenas uma variável independente, sendo acrescentadas novas ao seguir critérios específicos.
- *Backward* (passo atrás): Ao contrário do anterior, o método se inicia com a inclusão de todas as variáveis, que são removidas, para que os critérios pré-estabelecidos sejam alcançados.

4.6.9 MAPE e RMSE

Para validação do modelo, é comum em *machine learning* a realização de testes baseados na diferença entre os dados preditos e os dados reais. Uma dessas ferramentas é o Erro absoluto percentual médio (MAPE), que avalia a média das diferenças percentuais absolutas entre os resultados. Um valor de MAPE baixo significa que as previsões estão próximas dos valores observados, conforme a escolha aceitável para o erro (VIEIRA, 2023). O parâmetro pode ser calculado, seguindo a Equação 11.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (11)$$

onde,

n é o número total de amostras, y_i é o valor real da amostra e $\hat{y}_i$ o valor predito pelo modelo.

Outra ferramenta muito utilizada é a raiz do erro quadrático médio, que representa em média, o quanto as previsões se afastam do valor real, conferindo um peso maior aos erros grandes. Na prática, indica a distância média que as previsões estarão do alvo, acima ou abaixo (FILHO, 2023). A métrica pode ser calculada pela Equação 12:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

4.7 Python como ferramenta de análise de dados

O Python é uma linguagem de programação de alto nível, que ao lado da linguagem R, criada por Ross Ihaka e Robert Gentleman, é uma mais utilizadas na ciência de dados. Suas diversas bibliotecas, fácil legibilidade e pouca verbosidade, faz com que seja de grande auxílio para os cientistas de dados (YEGULALP, 2018, *apud* OKAMURA, 2019).

4.7.1 Scikit-learn

O *Scikit-learn*, conhecido também como *sklearn* é uma biblioteca escrita em sua maior parte para Python, que reúne diversas ferramentas de aprendizado de máquina, como algoritmos de classificação, regressão, agrupamento e redução de dimensionalidade. A biblioteca também inclui instrumentos de pré-processamento para normalização, escala e codificação de dados. Toda sua descrição e guias podem ser encontrados em DEVELOPERS, 2019.

4.7.2 Pandas

Focada na manipulação de dados, a biblioteca Pandas oferece diversos recursos que vão desde a organização de bases de dados em tabelas estruturadas, até a importação e exportação de informações para diferentes formatos, como planilhas, textos estruturados e bancos de dados (EBAC, 2025).

4.7.3 Matplotlib

O Matplotlib é uma biblioteca de visualização de dados em Python, utilizada para criação gráfica e representações visuais. Entre suas funcionalidades, destaca-se a capacidade de criações de gráficos 2D e 3D, o suporte a diferentes formatos de saída e a possibilidade de personalizar gráficos em diversos aspectos. (COUTINHO, 2021).

4.7.4 NumPy

O NumPy é uma das principais bibliotecas para a computação científica em Python, fornecendo além de uma grande quantidade de funções matemáticas, suporte para estruturas de dados multidimensionais, como vetores e matrizes. A grande vantagem da biblioteca é a capacidade de lidar com grandes volumes de informações de forma eficiente (VAZ, 2025).

5 METODOLOGIA

É comum em laboratórios de qualidade de indústrias de celulose, realizar de forma semanal a análise do índice de tração da fibra de celulose. Uma das etapas da análise, já descrita anteriormente é a refinação, na qual a pasta celulósica, após desagregada, é enviada para refinação em um moinho PFI. A Figura 20 representa o equipamento utilizado para a refinação.

Figura 20 - Moinho PFI



Fonte: O Autor (2025)

Durante o período de 10 meses, foram coletadas pequenas alíquotas de polpa refinada a 1500 revoluções que seriam destinadas para etapa de formação das folhas de testes físicos. As amostras que estavam a uma consistência de 2%, seguindo a norma ABNT NBR ISO 5264-2, foram diluídas com água desmineralizada a uma consistência entre (0,004 - 0,01%), conforme o procedimento normatizado ISO 16065-2, que trata sobre a análise de morfologia utilizando métodos óticos.

Seguindo a norma citada anteriormente, as amostras com consistência adequada, foram submetidas a um escoamento controlado no equipamento de morfologia FS5 UHD, onde foram capturadas milhares de imagens para determinação das características morfológicas.

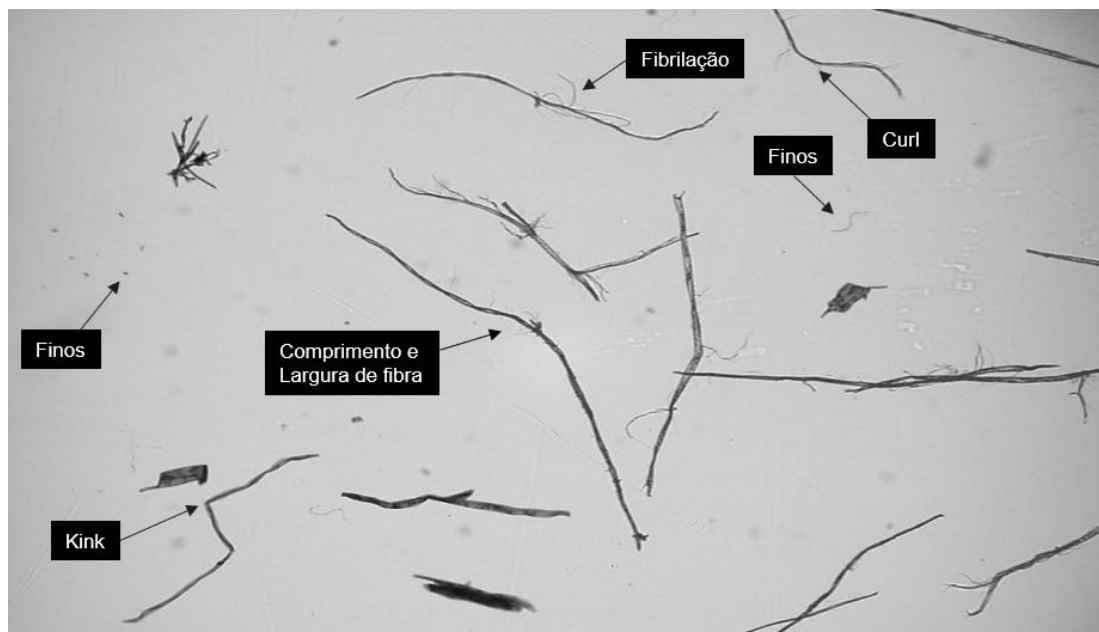
Algumas das propriedades registradas pelo equipamento, as quais também já foram discutidas anteriormente, são:

- Comprimento médio e ponderado das fibras;
- Largura média e ponderada das fibras;

- *Coarseness gravimétrico* e *coarseness* ótico, que retratam a densidade linear das fibras, em termos de massa e óticamente;
- *Curl* (curvatura) e *kinks* (dobras) e ângulo de *kinks*, que representam a deformação causada por esforços mecânicos sobre as fibras;
- CWT e CSA, que indicam as dimensões da parede celular e sua respectiva área;
- Relação de finos, relação de finos tipo A e B;
- Relação de fibrilação;
- Fibras por grama, que simboliza a população de fibras por massa de amostra.

A Figura 21 demonstra uma das imagens capturadas pelo equipamento, além de algumas das propriedades citadas de morfologia.

Figura 21 - Imagem capturada pelo FS5 UHD



Fonte: O Autor (2025)

Ao final foram realizados 120 ensaios, dos quais 80 foram utilizados para treinamento do modelo e 40 para sua validação. A proporção escolhida de dados de treino e validação foi feita baseando-se em alguns trabalhos realizados anteriormente, dos quais foi comum seguir a proporção de 70-80% dos dados destinados ao treino do modelo e entre 20-30% para sua validação. A Figura 22 representa o equipamento utilizado nos ensaios de morfologia.

Figura 22 - Valmet FS5 UHD



Fonte: O Autor (2025).

Os dados coletados foram padronizados, de forma que cada variável independente escalonada, fosse centrada para apresentar uma distribuição com média nula e desvio padrão unitário. A transformação foi definida por:

$$X_{escalonado,j} = \frac{x_j - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (13)$$

onde,

$X_{escalonado,j}$ é a variável padronizada, com $(j = 1, \dots, m)$, sendo m a última variável. x_j a variável original e $\bar{x}_j$ a média de todos os dados da variável original.

Todas etapas de construção do modelo e padronização dos dados foram realizadas utilizando bibliotecas da linguagem de programação Python 3.10. Após padronização, as variáveis do modelo foram selecionadas utilizando o método *stepwise*, de forma que fossem adicionadas e removidas seguindo um critério de valor p . Caso o valor p , do teste t da variável, fosse menor que o nível de significância escolhido para o modelo (5%), a variável era incluída no modelo. Da mesma forma, caso a combinação das variáveis escolhidas apresentasse algum valor p maior que o nível de significância, o parâmetro também era removido.

Além de serem validadas pelo modelo, a escolha das variáveis foi feita baseando-se na bibliografia, sendo realizada uma análise adequada para confirmação.

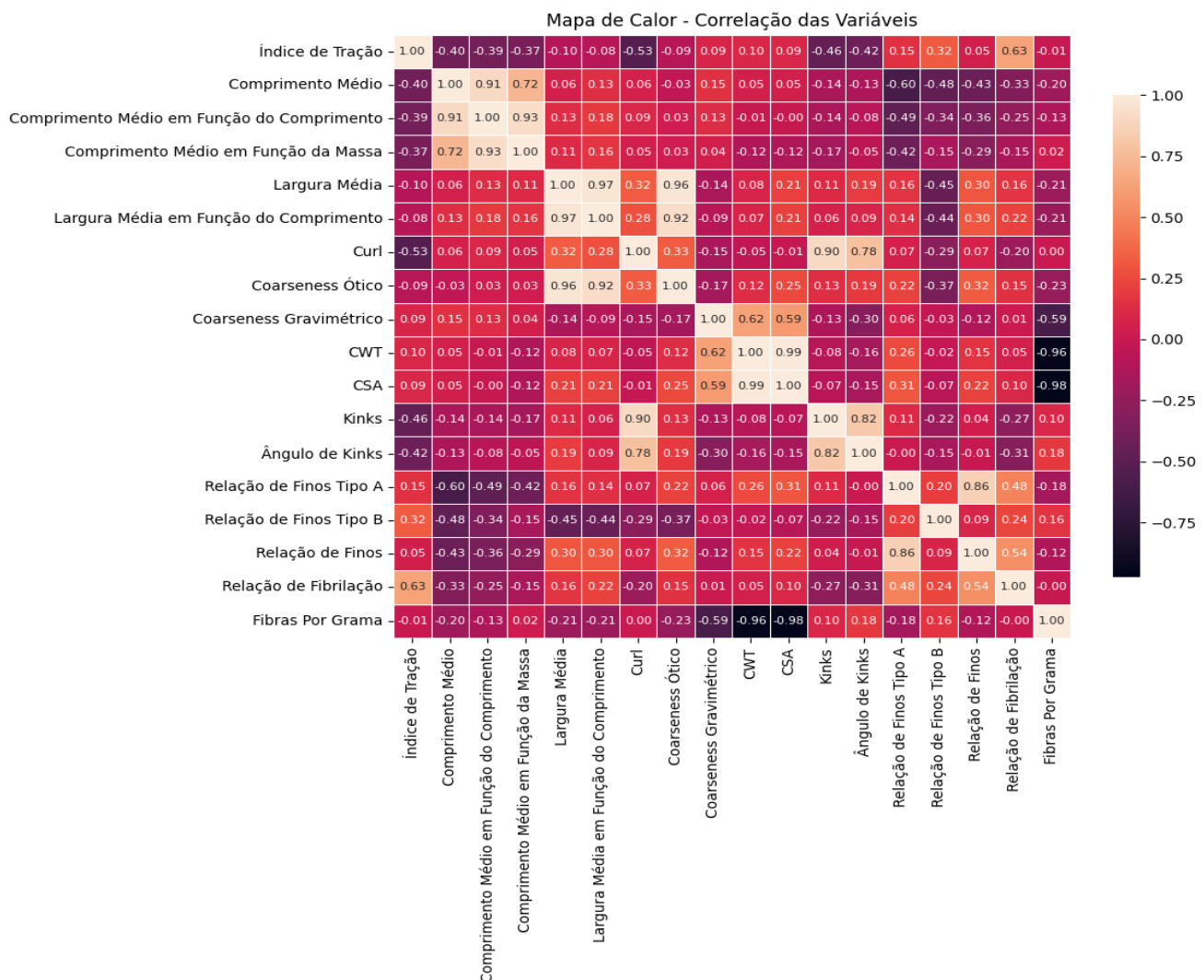
As últimas etapas foram relacionadas à validação do modelo, iniciando-se com a estimação dos valores de MAPE e RMSE. Para evidenciar a relevância e estabilidade do modelo, foram executados uma série de testes de significância, os quais foram citados anteriormente.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As bibliotecas do Python, utilizadas para manipulação de dados, modelagem e representação gráfica foram as seguintes: Scikit-Learn, Pandas, NumPy e Matplotlib.

Após coleta dos dados de morfologia, através da biblioteca Matplotlib, criou-se como ferramenta de observação um mapa de calor para análise de potenciais variáveis com boa correlação de Pearson em relação ao índice de tração. Valores próximos de 1 ou -1 indicam melhor associação entre os parâmetros, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Mapa de calor das correlações



Fonte: O Autor (2025).

Percebe-se pela Figura 23 que alguns dos parâmetros possuem forte correlação entre si, podendo chegar próximo a valores de 1 ou -1, como no caso das

características de comprimento médio, comprimento em função do comprimento e comprimento em função da massa. A alta correlação entre essas variáveis é fator limitante para o uso das mesmas de forma simultânea no modelo, de forma que o potencial efeito da multicolinearidade pode acarretar problemas estatísticos, como estimativa inadequada de coeficientes e problemas numéricos.

É possível observar a mesma situação para diversos parâmetros, como no caso da largura de fibra média e a largura em função do comprimento, assim também para as características relacionadas a parede celular, como o CWT e CSA. Ademais, os efeitos da deformação das fibras também possuem uma correlação elevada entre si ao se analisar o resultado entre o *curl*, os *kinks* e o ângulo médio de *kinks*.

Quanto ao índice de tração, as variáveis que apresentaram melhor correlação e, conseqüentemente, maior potencial para utilização como parâmetro no modelo, foram a Relação de Fibrilação e o *Curl*, com 0,63 e -0,53, respectivamente. Dessa forma a análise evidenciou o potencial para construção do modelo através de uma regressão linear múltipla.

6.1 Seleção das variáveis

Para a seleção das variáveis, o método escolhido foi o *Stepwise*, cuja ação foi baseada em uma estratégia iterativa focada nos valores de significância (valor p) de cada parâmetro da análise de morfologia.

Uma das estratégias do método é chamado de *forward selection*, que consiste em testar a inclusão de cada variável que ainda não está no conjunto, para logo em seguida calcular de forma isolada o valor p do coeficiente. O parâmetro com o valor p menor que o nível de significância escolhido de 0,05 é adicionado ao modelo, tendo sua escolha justificada também pela literatura.

Ao final as variáveis selecionadas foram:

Relação de Fibrilação (%): O principal efeito da refinação nas fibras de celulose é a delaminação da camada externa e conseqüente formação das fibrilas. O aumento da área superficial disponível para interação entre fibras, resulta em maior coesão e melhores efeitos em características de resistência (FOELKEL, 2007).

Curl (%): A desorganização estrutural promovida por ações mecânicas e as etapas de cozimento e branqueamento, faz com que as fibras estejam sujeitas a deformações estruturais. O excesso de curvatura e dobras dificultam a ligação entre

as fibras, resultando em uma resistência menor. A refinação favorece a flexibilidade da fibra, contribuindo para redução da curvatura (FOELKEL, 2007).

Relação de Finos (%): A coesão entre as fibras é favorecida também pelo teor de finos e seus fragmentos, pois contribuem na estruturação da rede de fibras na formação de papel. A refinação também possui como efeito o aumento no teor de finos da amostra (FOELKEL, 2007).

Comprimento Médio em Função da Massa (mm): Na literatura, é senso comum de que fibras de maior tamanho contribuem positivamente para características de resistência (FOELKEL, 2007). Entretanto, após refinação, conforme relata Yasumura, *et.al* (2012) é comum a presença de fibras com comprimentos menores, resultantes do tratamento mecânico intenso. Durante a elaboração deste trabalho, observou-se uma correlação levemente negativa entre o comprimento e o índice de tração, o que de início parece ser incoerente, pode ser atribuído à intensidade do refino e ao fato de que a melhoria na ligação entre as fibras tem como fatores predominantes a fibrilação e a hidratação. Ao final, os testes de validação do modelo reforçam a escolha adequada das variáveis.

Após escolha dos parâmetros, verificou-se a ausência de multicolinearidade, justificada pelos valores menores que 4 da análise do teste de FIV, realizado entre as variáveis independentes, conforma a Tabela 4:

Tabela 4 - Análise do FIV

Variáveis	Finos (%)	Fibrilação (%)	Curl (%)	Comprimento (mm)
FIV	1,602265	1,552137	1,105365	1,098222

Fonte: O Autor (2025).

6.2 Validação dos resultados

Com os dados padronizados e as variáveis selecionadas, foi possível prosseguir para a criação do modelo a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), cuja escolha foi baseada na bibliografia de outros trabalhos, como os de Ronald A. Fisher, que propôs esse valor como um limiar conveniente para indicar evidência estatística (TORBECK, 2010). No Python, o método escolhido foi o de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), sendo um dos mais utilizados por analistas na criação de um modelo de regressão linear múltipla. Pode-se verificar na Tabela 5, os coeficientes dos parâmetros selecionados e sua relevância estatística, através do valor p do teste t.

Tabela 5 - Estimativas do modelo

Coefficientes	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Valor p
Fibrilação (%)	3,8670	0,365	10,607	< 0,0000
Curl (%)	-1,7837	0,308	-5,538	< 0,0000
Comprimento (%)	-1,9047	0,307	-6,211	< 0,0000
Finos (%)	-2,2673	0,370	-6,126	< 0,0000

Fonte: O Autor (2025).

A estimativa dos parâmetros do modelo evidencia, principalmente, a relevância maior da variável Relação de Fibrilação, que pelo efeito da delaminação superficial e consequente formação das fibrilas, tende a favorecer uma maior ligação entre as fibras e uma maior resistência mecânica. O mapa de calor da Figura 23, através da correlação de Pearson também confirma o resultado da criação do modelo. Todos os valores p do teste t ficaram abaixo do nível de significância de 0,05 pré-determinado, assim, rejeitando a hipótese nula e demonstrando que as variáveis selecionadas são significantes para o índice de tração, que é a variável dependente.

Como citado anteriormente, das 120 análises realizadas em laboratório, 80 foram utilizadas na elaboração do modelo e 40 foram separadas para validação. O coeficiente de determinação ajustado, MAPE e RMSE foram calculados baseando-se nas 40 amostras.

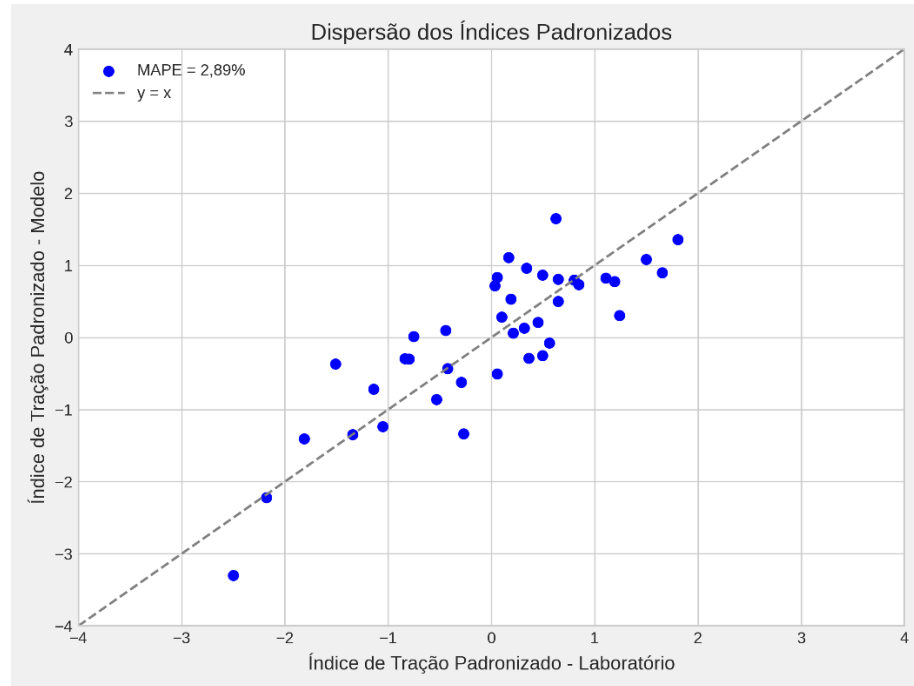
Nesse sentido, o ajuste do modelo foi verificado por meio do coeficiente de determinação ajustado (R_a^2). Para o R^2 padrão, observou-se um coeficiente de 0,6823, que explica 68,23% da variabilidade do índice de tração, entretanto, como discutido anteriormente, o que melhor representa a variabilidade para um modelo de vários parâmetros é o (R_a^2), pois considera o número de variáveis independentes, evitando uma superestimação do R^2 . O resultado do coeficiente foi de 0,6459, o que significa que o modelo explica de forma mais coerente, cerca de 64,59% da variabilidade do índice de tração.

O MAPE, calculado fez uma análise da diferença entre os dados observados no laboratório e os do modelo. O resultado do teste foi de 2,89%, indicando em média, o quanto os resultados de tração do modelo vão variar dos dados do laboratório. De forma similar, o RMSE faz um estudo do desvio absoluto dos dados observados. O parâmetro calculado de 2,49 N.m/g, retrata em média o desvio absoluto entre o valor real e o predito. Os parâmetros calculados indicam um ajuste muito bom do modelo,

principalmente ao se comparar com o range de reprodutibilidade de 2-4% da norma de determinação de resistência à tração (ABNT NBR ISO 1924-3).

A Figura 24 representa de forma visual a dispersão entre os dados padronizados do laboratório e do modelo.

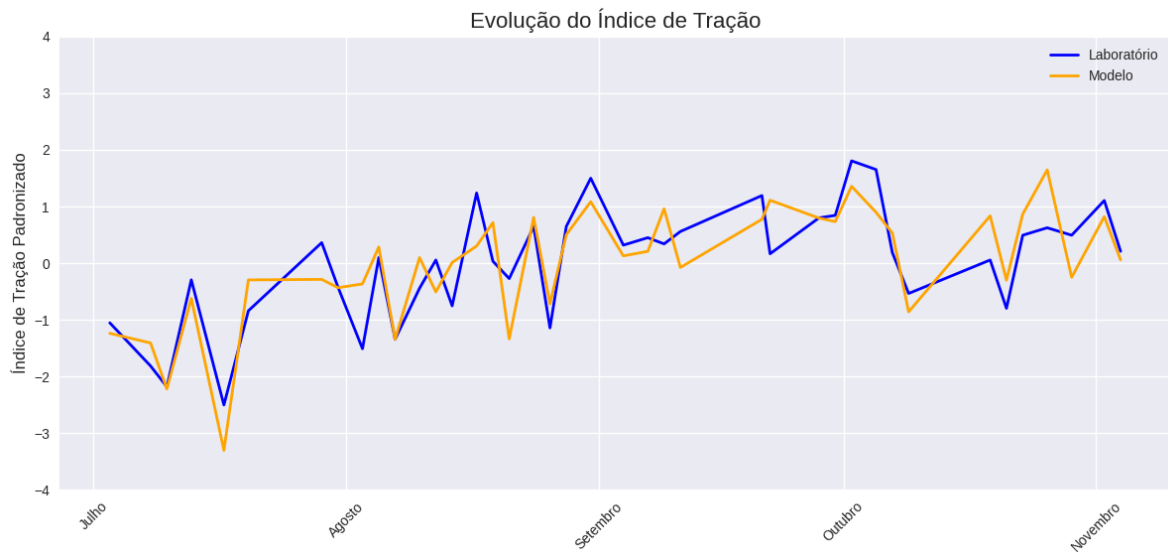
Figura 24 - Dispersão entre o índice de tração do laboratório e modelo



Fonte: O Autor (2025).

A Figura 25 faz uma análise temporal dos resultados, refletindo o desenvolvimento do Índice de Tração nos últimos meses. Visualmente, percebe-se o quão próximo o modelo está desempenhando com relação ao ensaio em laboratório, o que pode ser confirmado pelo resultado de 2,49 N.m/g do RMSE. Outra observação pertinente é o fato de que em algumas situações, apesar dos resultados estarem muito próximos, a tendência da curva segue um padrão invertido. Pode-se explicar a condição pelo efeito de mudanças no processo, que também afetam a resistência das fibras, como carga de álcali, qualidade da madeira e a ação mecânica de equipamentos.

Figura 25 - Análise temporal do índice de tração



Fonte: O Autor (2025)

6.3 Testes de significância

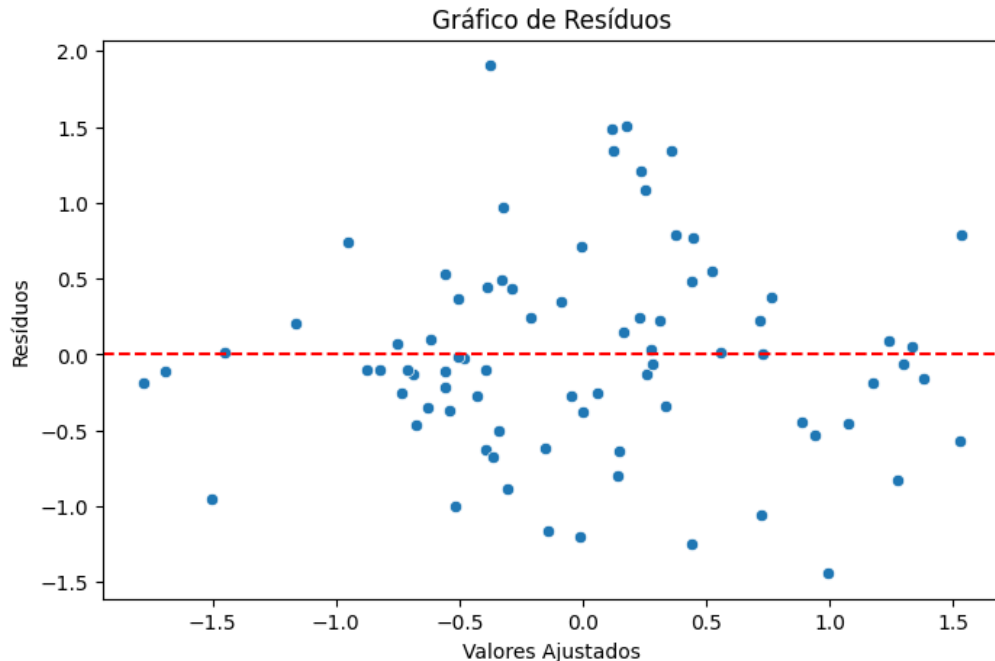
Para verificação da existência de uma relação global entre o índice de tração e o conjunto das variáveis selecionadas, foi realizada a análise de variância, chamada também de teste F. Como resultado, o teste F calculado para o modelo foi de 59,51, com valor p de $1,58 \cdot 10^{-22}$. Uma das formas de se avaliar os resultados do teste F, é pelo cálculo de seu valor p, o qual, deve ser menor que o nível de significância determinado para o modelo. Considerando-se o nível de significância de 0,05, a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, demonstrando que o modelo é estatisticamente relevante.

Ademais o teste de Durbin-Watson, que avalia se os erros do modelo possuem correlação, obteve como resultado 2,204, o valor alcançado é muito próximo de 2, cujo resultado considera a normalidade total dos erros. O teste revela uma leve tendência de autocorrelação negativa na normalidade dos erros, algo considerado estatisticamente normal.

Outra forma de se avaliar um modelo é pela análise de normalidade de seus resíduos. Charnet et al., 2008, *apud* Nascimento, 2023, destaca que uma distribuição gráfica aleatória e sem tendências representa uma boa ferramenta de avaliação dos resíduos. A Figura 26 representa a distribuição gráfica, em que se pode destacar a aleatoriedade dos resíduos, sendo bem distribuídos, como também a ausência de

tendências, dessa forma pode-se concluir que os dados seguem uma distribuição normal.

Figura 26 - Análise de resíduos



Fonte: O Autor (2025).

Ademais o teste de Shapiro-Wilk, que com valores próximos de 1 indicam a distribuição normal dos resíduos, obteve como resultado o valor de 0,9788. Outrossim, o valor p do teste foi de 0,2069, maior que o nível de significância de 0,05. O resultado aceita a hipótese nula, reforçando a ideia de que os dados seguem uma distribuição normal.

6.4 Proposta de novo método para determinação do índice de tração

Diante da análise de significância e do MAPE e RMSE baixos, o novo modelo pode ser considerado estatisticamente relevante, podendo assim, ser utilizado como ferramenta na determinação do índice de tração. É importante salientar que todo modelo preditivo possui um erro irreduzível, que representa uma variabilidade própria nos dados, causado por ruídos, medições e fatores que não podem ser observados. Mesmo que o modelo apresente um desempenho perfeito nos dados de treinamento, o modelo não pode superar esse limite de erro mínimo nos dados de teste (ROCKS; MEHTA, 2020).

Apesar disso, a grande vantagem da utilização do método na rotina analítica é a redução estimada no tempo de análise. Com a nova proposta, o ensaio de morfologia, com duração estimada de 15 minutos, será realizado após o a refinação, sendo essa a última etapa para determinação dos resultados. Deste modo, as etapas de formação de folhas, condicionamento e testes físicos não são necessárias, descartando assim, um tempo estimado de 6 horas. Ao todo, a duração da análise, com a utilização do modelo preditivo é de 5 horas, considerando também o tempo de hidratação da amostra. A Figura 27 traz em formato de fluxograma o roteiro da nova análise.

Figura 27 - Fluxograma do novo ensaio



Fonte: O Autor (2025).

A mudança na estimativa de tempo de ensaio do índice de tração, reduzindo de 11 horas para 5 horas de duração, demonstra que o modelo pode ser uma ótima ferramenta a ser utilizada na rotina analítica de um laboratório industrial. Sabe-se que um dos maiores desafios na área de qualidade é a otimização do tempo, mas com a nova proposta é possível readequar a rotina analítica, de forma que haja uma maior frequência de resultados e, conseqüentemente um maior acompanhamento do parâmetro no processo.

7 CONCLUSÃO

Ademais, após os testes realizados, o modelo preditivo criado pode ser considerado estatisticamente relevante. O MAPE de 2,89% e o RMSE de 2,49 N.m/g podem ser avaliados como bons resultados, visto que representam uma boa proximidade com os resultados das análises do laboratório.

Da mesma forma, os testes de multicolinearidade demonstraram que a seleção das variáveis foi feita de forma adequada, sendo verificada também através de referências na literatura. A análise de variância (teste F), reforça a existência do modelo, com um valor p de $1,58 \cdot 10^{-22}$ muito menor que o nível de significância de 5%. Ademais, o teste de Durbin-Watson, com valor de 2,204, confirma que os erros não possuem uma autocorrelação significativa, o que é considerado ideal para confirmação de normalidade.

Além disso, a análise gráfica dos resíduos, além do teste de Shapiro-Walk de 0,2069, revelaram uma distribuição normal dos resíduos, parte essencial também na avaliação de significância do modelo.

Por fim, a redução estimada do tempo de análise de 11 horas para 5 horas, também representa o potencial positivo para o uso do modelo na rotina analítica de um laboratório, que busca uma maior frequência de resultados do índice de tração.

Diante do exposto e dos dados validados através da estatística, conclui-se que a análise da morfologia das fibras demonstra uma infinidade de possibilidades. Além de poder ser utilizada na criação de novos modelos, que se correlacionam com testes físicos do laboratório, as características das fibras também podem representar mudanças no processo de extração da celulose na indústria, seja pela ação dos químicos, como também na ação mecânica de equipamentos da indústria.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, David R.; SWEENEY, Dennis J.; WILLIAMS, Thomas A.; et al. **Estatística aplicada a administração e economia**. 5. ed. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2020. *E-book*. p.603. ISBN 9786555583991. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555583991/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ANDRADE, F. M. **Principais características da fibra para ganho de maciez**. 50º Congresso Internacional de Celulose e Papel. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP, 2017. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2017_Fibras+Eucalipto+2_Tissue.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

ANTUNES, L.A.; BACHA, C.J.C.; BACHA, V.R. **Inserção do Brasil na produção e comercialização externa de celulose**. Revista de Política Agrícola, v.34, e02025, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35977/2317-224X.rpa2025.v34.020251>. Acesso em: 11 nov. 2025.

AQUINO, Sílvia Lima de. **A formação do complexo florestal celulósico brasileiro**. Desenvolvimento & Democracia, v. 8, n. 1, p. 1–24, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/dd/article/view/36828>. Acesso em: 11 nov. 2025.

BATISTA, Taoana Souza. **A indústria de papel e celulose no Brasil: Produtividade, competitividade, meio ambiente e mercado consumidor**. 2018. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26863>. Acesso em: 11 nov. 2025.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Relatório Estatístico 2012**. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/34>. Acesso em 11 nov. 2025.

CAMPOS, E. S. **Curso básico de fabricação de celulose e papel**. Suzano - SP, 2011. p. 73-134.

CAMPOS, Edison da Silva; FOELKEL, Celso. **A evolução tecnológica do setor de celulose e papel no Brasil**. São Paulo: ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2017. 224 p. Disponível em: https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/2017_Livro_EvolucaoTecnologica_Celulose_Papel_Brasil.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

CASTRO, Heizir F. de. **Papel e celulose**. Lorena: Escola de Engenharia de Lorena – USP, 2009. Apostila 4. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840556/434/apostila4papelecelulose.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

COUTINHO, Thiago. **Python Matplotlib: a biblioteca de software que cria gráficos**. Voitto, 11 jun. 2021. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-python-matplotlib>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DEMUNER, Braz. **Desempenho da fibra de eucalipto na produção de papel tissue de alta qualidade**. 2010. Disponível em: https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/2010_Desempenho_fibra.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

DEMUNER, R. B.; FARIA, C. A.; DE ALMEIDA, A. A. R.; PIGNATON, P. N. **On the usage of online fiber measurements for predicting bleached eucalyptus kraft pulp tensile index — an industrial case**. TAPPI Journal, [s. l.], v. hh, n. mm, p. pp-pp, jul. 2022. Disponível em: <https://www.tappi.org/publications-standards/tappi-journal/home/2022/july/on-the-usage-of-online-fiber-measurements-for-predicting-bleached-eucalyptus-kraft-pulp-tensile-index---an-industrial-case-tappi-journal-july-2022/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DEVELOPERS scikit learn. **Documentation of scikit-learn 0.21.2**. junho 2019. Disponível em: <https://scikit-learn.org/stable/documentation.html>. Acesso em: 11 nov. 2025.

EBAC. **Pandas em Python: o que é e como usar a biblioteca**. São Paulo: Escola Britânica de Artes Criativas e Tecnologia, 2025. Disponível em: <https://ebaonline.com.br/blog/pandas-em-python-o-que-e-e-como-usar-a-biblioteca>. Acesso em: 12 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Pulp and paper: roadmap para o setor de papel e celulose no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE; IEA, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-650/Pulp%20and%20paper_EPE+IEA_Portugu%C3%AAs_2022_01_25_IBA.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

FERNANDES, Patrícia Dias; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; BRAGA, João Paulo Carneiro de Holanda; SOUZA, Rodrigo Mendes Leal et al. **Descarbonização da indústria de base**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2024. 122 p. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/25847/1/PRLiv_216288_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20da%20ind%C3%BAstria%20de%20base.pdf. Acesso em: 11 out. 2025.

FERREIRA, Sarah Cristina; PAULA, Germano Mendes de. **Os primeiros impactos da Indústria 4.0 sobre o setor de papel e celulose**. Revista de Administração, Sociedade e Inovação, v. 7, n. 1, p. 1–24, jan./abr. 2021. Disponível em: <https://rasi.vr.uff.br/index.php/rasi/article/view/522>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FILHO, Mario. **RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio) em Machine Learning**. Mario Filho, 9 jan. 2023. Disponível em: <https://mariofilho.com/rmse-raiz-do-erro-quadratico-medio-em-machine-learning/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FILIPIN, Natália dos Reis. **Processo de produção de celulose: uma revisão**. 2024. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/41946>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FOELKEL, Celso. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel**. Eucalyptus Online Book, cap. 3, fev./mar. 2007. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03_fibras.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

FOELKEL, Celso. **Diferenciando polpas de mercado e papéis de eucalipto através da gestão dos finos celulósicos da polpa**. Eucalyptus Online Book. 2009. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT17_Finoscelulosicos.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

GREGERSEN, Øyvind Weiby. **Runnability, Fracture and Pressroom Breaks**. BioResources, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 797-825, 2005. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/07/2005.2.797.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HOFFMANN, Rodolfo. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. 5. ed. Piracicaba: O Autor, 2016. Disponível em: <https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/73>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HORN, R. A. **Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on paper strength**. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1978. (Research Paper FPL-312).

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (Ibá). **Relatório anual 2025**. Brasília: Ibá, 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Escola SENAI “Theonbaldo De Nigris” – Departamento Regional de São Paulo. **Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. Vol 1. 2ed. São Paulo, 1988. KLABIN. **Celulose de fibra longa e de fibra curta: diferenças**. Blog Klabin, 3 jan. 2025. Disponível em: <https://blog.klabin.com.br/-/celulose-de-fibra-longa-e-celulose-de-fibra-curta>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KLABIN. **Como o Brasil se tornou um dos líderes em papel e celulose**. Blog Klabin, 25 abr. 2024. Disponível em: <https://blog.klabin.com.br/-/brasil-lider-em-celulose-no-mundo>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KLOCK, U. L. **Polpa e Papel – Engenharia Industrial Madeireira (Manual)**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2013. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/processokraft.doc>. Acesso em: 11 out. 2025.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. E-book. p.233-264. ISBN 9788521637448. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637448/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

NASCIMENTO, Ana Livia Rodrigues. **Regressão linear múltipla na identificação de fatores relacionados à demanda por serviços de compartilhamento de bicicletas**. Ituiutaba, MG: Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal, Universidade Federal de Uberlândia, 2023. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Matemática). Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37792>. Acesso em: 11 out. 2025.

OKAMURA, Dalton Akio. **Análise de algoritmos de regressão aplicados a mercado financeiro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Ciência da Computação, Bauru. Orientadora: Simone Domingues Prado. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4e723602-1c53-4d40-83b2-1a22f9b449b0/content>. Acesso em: 12 nov. 2025.

PAGE, D. H. **“A Theory for the Tensile Strength of Paper”**. TAPPI Journal, v. 52, abril 1969. Disponível em:

<https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/18/OCT/18OCT583.aspx>. Acesso em: 11 nov. 2025.

PILÃO S.A. Máquinas e Equipamentos. **Refinação – Conceitos fundamentais de refinação de papel e celulose**. Curso ABTCP, jun. 2001. Disponível em:

https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2001_Pilao_CursoABTCP.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.

REIS, H. M. **Análise Energética e Ambiental do Processo de Obtenção do Licor de Cozimento Kraft para Extração de Celulose**. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2013.

ROCKS, J. W.; MEHTA, P. **Memorizing without overfitting: Bias, variance, and interpolation in over-parameterized models**. Physical Review Research, v. 4, n. 1, p. 013201, 15 mar. 2022. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013201. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2010.13933>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SILVA, Davi Arantes. **Modelo de regressão linear múltipla para previsão de overbreak em escavações subterrâneas de desenvolvimento**. Ouro Preto, MG: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2024. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Disponível em:

<https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/6931>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SINPAPEL. **Fatores de mercado indicam possível retomada nos preços da celulose no segundo semestre de 2025**. Sinpapel, 7 nov. 2025. Disponível em: <https://www.sinpapel.com.br/post/fatores-de-mercado-indicam-possivel-retomada-nos-pre%C3%A7os-da-celulose-no-segundo-semester-de-2025>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SUZANO. **Celulose: o que é, para que serve e onde está no seu dia a dia.** Blog Suzano, 18 out. 2024. Disponível em: <https://www.suzano.com.br/blog-posts/celulose-o-que-e-para-que-serve-e-onde-esta-no-seu-dia-a-dia>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SOTO BAQUERO, Fernando Agustin. **Da industria de papel ao complexo florestal no Brasil: o caminho do corporatismo tradicional ao neocorporativismo.** 1992. [303]f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas, SP. Disponível em: 20.500.12733/1576780. Acesso em: 11 nov. 2025.

SOUZA, Juliana Pinheiro Neves de. **Revisão do processo de obtenção da celulose kraft e suas tecnologias.** *Revista FT*, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 1-20, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/revisao-do-processo-de-obtencao-da-celulose-kraft-e-suas-tecnologias/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SULEIMAN, M. B.; ALAM, M. S.; ISLAM, A.; et al. **Various factors affecting the fatigue performance of natural fiber-reinforced polymer composites: a systematic review.** *Materials Today: Proceedings*, [s.l.], v. 63, p. 481-490, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/375445100_Various_factors_affecting_the_fatigue_performance_of_natural_fiber-reinforced_polymer_composites_a_systematic_review#fullTextFileContent. Acesso em: 11 nov. 2025.

SUNDBLAD, Sara. **Predictions of pulp and paper properties based on fiber morphology.** 2015. Dissertação (M.Sc.) — KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2015. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A898813/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

TERMOBLOG. **Produção de Celulose e Sistema Kraft**, 2023. Disponível em: <https://termoblog.com.br/producao-de-celulose-e-sistema-kraft/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

TORBECK, Lynn D. **Statistical Solutions: On the Verge of Significance: Why 5%.** *Pharmaceutical Technology*, v. 34, n. 7, 2010.

UESAKA, T.; FERAHI, M.; HRISTOPULOS, D.; DENG, N.; MOSS, C. **Factors controlling pressroom runnability of paper.** In: BAKER, C. F. (Ed.). *The Science of Papermaking*, Transactions of the XIIth Fundamental Research Symposium, Vol. 2, Manchester: FRC, 2001, p. 1423-1440. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/03/2001.2.1423.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

VAZ, Marcos. **O que é NumPy: entenda a biblioteca de Python.** Blog Upplay P2P, 21 jan. 2025. Disponível em: <https://blog.upplayp2p.com/glossario/o-que-e-numpy-biblioteca-python/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VERACEL. **O que é celulose? Saiba para que serve e qual a sua importância.** Veracel Celulose, 17 mar. 2022. Disponível em: <https://www.veracel.com.br/entenda->

a-celulose-descubra-o-que-e-para-que-serve-e-sua-importancia/. Acesso em: 11 nov. 2025.

VIEIRA, Jonatas. **Metrics Evaluation: MSE, RMSE, MAE and MAPE**. Medium, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://medium.com/@jonatasv/metrics-evaluation-mse-rmse-mae-and-mape-317cab85a26b>. Acesso em: 11 nov. 2025.

YASUMURA, Patricia Kaji; KOGA, Mariza Eiko Tsukuda; PARK, Song Won. **Physical properties of pulps refined in PFI mills. Part II: Morphological aspects of fibers**. In: ABTCP International Pulp and Paper Congress; VII CIADICYP – Ibero-American Congress on Pulp and Paper Research, 45., 2012, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABTCP; RIADICYP, 2012. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2012_Refino+PFI_Part+02.pdf. Acesso em: 13 nov. 2025.