

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

MAIARA SCHLUSAZ

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM MOINHO DE
SERRAS NAS PROPRIEDADES DA CELULOSE FLUFF E DE PAINÉIS
ABSORVENTES

PONTA GROSSA
2020

MAIARA SCHLUSAZ

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM MOINHO DE
SERRAS NAS PROPRIEDADES DA CELULOSE FLUFF E DE PAINÉIS
ABSORVENTES

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Processamento de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho.

PONTA GROSSA

2020

S346 Schlusaz, Maiara
Influência dos parâmetros de processamento em moinho de serras nas propriedades da celulose fluff e de painéis absorventes / Maiara Schlusaz. Ponta Grossa, 2020.

86 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho.

1. Morfologia de fibra. 2. Análise granulométrica. 3. Propriedades mecânicas. 4. Produtos absorventes. 5. Otimização de desfibramento. I. Carvalho, Benjamim de Melo. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. III.T.

CDD: 620.11

MAIARA SCHLUSAZ

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO EM MOINHO DE
SERRAS NAS PROPRIEDADES DA CELULOSE FLUFF E DE PAINÉIS
ABSORVENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa. Área de Processamento de Materiais.

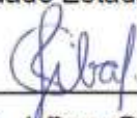
Ponta Grossa, 08 de Maio de 2020.



Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho — Orientador
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Profa. Dra. Adriane Bassani Soweck
Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Dra. Juliana Cristina da Silva
Doutora em Ciência Florestal
Universidade Federal de Viçosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por mais uma etapa vencida.

Agradeço à minha família, pelo incentivo de sempre e pela força nos momentos de cansaço durante a trajetória.

Ao meu professor orientador, Dr. Benjamim de Melo Carvalho, pela oportunidade de desenvolver este projeto e por acreditar que seria possível.

Ao Departamento de Assistência Técnica Klabin, pelo escopo de trabalho elaborado e pela dedicação em ajudar os clientes de celulose Fluff através de recomendações de *setups* para obtenção da melhor performance em seus processos produtivos.

À Fameccanica, que realizou os testes em suas instalações de acordo com o escopo elaborado.

À Klabin, pela oportunidade de aperfeiçoamento que me proporcionou; ao Centro de Tecnologia e à sua equipe, pelos equipamentos e pelo trabalho experimental desenvolvido.

À Silvana Meister Sommer, que, além de me abrir as portas da Pesquisa, me mostrou em cada momento a importância em não desistir e aonde eu poderia chegar.

Aos demais que se envolveram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

RESUMO

A celulose Fluff é uma matéria-prima empregada na produção de produtos absorventes higiênicos, e seu processamento é realizado através de moinhos desfibradores com o intuito de individualizar as fibras celulósicas que compõem o painel/núcleo. O processo de desfibramento passa por ajustes operacionais de maquinário que são pouco explorados quanto aos seus impactos e potenciais nas propriedades da celulose desfibrada e conseqüentemente do painel formado. O objetivo deste estudo foi avaliar o impacto de diferentes condições de processamento em propriedades morfológicas e granulométricas da celulose Fluff desfibrada, assim como de resistência mecânica dos painéis produzidos a partir desta celulose. O processo de desfibramento foi desenvolvido utilizando parâmetros representativos de escala industrial em moinho de modelo “*sawmill*”, onde foram testadas diferentes configurações de gap, velocidades de rotor e fluxos de alimentação de celulose. Os efeitos em propriedades morfológicas de comprimento, espessura de parede e finos foram investigados bem como os efeitos em granulometria do material classificado em *Good Fluff*, *Nits & Knots* e Finos. Foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistência à tração, absorção de energia à tração (TEA) e alongamento dos painéis absorventes e os resultados estatisticamente correlacionados com as propriedades previamente avaliadas. As celuloses Fluff empregadas no experimento são provenientes de coníferas, de especificação semelhante e variaram majoritariamente em seu conteúdo de umidade. Os resultados demonstram que as reduções do comprimento de fibra e de espessura de parede foram influenciadas somente pela utilização de gaps mais estreitos entre faca e contra-faca. O aumento do conteúdo de finos total, especificamente Finos A, foi influenciado pelo aumento do fluxo de alimentação, já o Finos B pela utilização de gap mais largo e também pela maior umidade da celulose. Na análise granulométrica, houve melhoria significativa na uniformidade do desfibramento obtida através do incremento em *Good Fluff* e redução de *Nits & Knots* quando utilizados menores fluxos de alimentação, maiores rotações de rotor, menor gap e celulose de menor umidade. O conteúdo de finos granulométrico mostrou ter sido impactado somente pela utilização de menores gaps. Além disso, para as condições deste estudo, não foi obtida correlação entre finos morfológico e o granulométrico. As propriedades de resistência à tração, TEA e alongamento foram superiores utilizando a celulose Fluff de maior umidade e que apresentou maiores conteúdos de *Nits & Knots*, além de terem sido influenciadas positivamente por maiores conteúdos de Finos B. Este estudo comprova que, a depender do gargalo produtivo e da particularidade de cada fabricante de produtos absorventes, a otimização dos parâmetros de moinho em conjunto demonstra ganhos relevantes quanto à uniformidade do desfibramento, à resistência de produto e a economias de processo atrelados a uma melhor performance da celulose Fluff utilizada.

Palavras-chave: morfologia de fibra; análise granulométrica; propriedades mecânicas; produtos absorventes; otimização de desfibramento.

ABSTRACT

Fluff cellulose is a raw material applied in hygienic product production and its processing is performed via shredding mills to individualize the cellulosic fibers that comprise the absorbent core. The shredding process experiences operational machinery adjustments that have not been explored in terms of its impacts and potentials on the defibrated pulp and formed core properties. The objective of this study was to evaluate the impact of different processing conditions on the morphological and granulometric properties of shredded Fluff pulp as well as the mechanical strength of the absorbent cores produced from these pulps. The shredding process was developed using representative industrial scale parameters in a "sawmill" where different gap configurations, rotor speeds, and pulp feed streams were tested. The effects on morphological properties of fiber length, fiber wall thickness, and fines were investigated in addition to the effects on material granulometry, classified as Good Fluff, Nits & Knots, and Fines. The mechanical properties of tensile strength, tensile energy absorption (TEA), and absorbent panel elongation were evaluated and the results statistically correlated with previously evaluated properties. The Fluff pulps used in the experiment are from conifers with similar specifications, varying mostly in moisture content. The results demonstrate that the reduction in fiber length and wall thickness were influenced only by the use of narrow gaps between knife and counter-knife. The higher total fines content, in particular Fines A were influenced by the increase in the feed stream and Fines B by the use of a wider gap and higher pulp moisture. In the granulometric analysis, there was a significant improvement in the shredding uniformity obtained through higher Good Fluff contents and reduction of Nits & Knots when lower feed streams, higher rotor speeds, narrowed gap, and lower pulp moisture were used. The granulometric fines content was impacted only by the use of narrowed gaps. Furthermore, for the conditions of this study, no correlation was obtained between morphological and granulometric fines. The properties of tensile strength, TEA, and elongation were superior using the Fluff pulp with the highest humidity and which presented the highest Nits & Knots content, in addition to being positively influenced by the higher Fines B content. This study proves that depending on the productive bottleneck and the particularity of each absorbent product manufacturer, the optimization of the mill parameters together demonstrates relevant gains in terms of shredding uniformity, product strength, and process savings linked to improved performance of the Fluff pulp used.

Keywords: fiber morphology; particle size analysis; mechanical properties; absorbent products; shredding optimization; shredding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Exemplo de efeitos do processamento mecânico nas fibras celulósicas visualizados em processos de refinação	15
FIGURA 2 – Componentes estruturais de um produto absorvente atual	19
FIGURA 3 – Pontes de hidrogênio intra e intermolecular em celulose.....	21
FIGURA 4 – Esquema de uma máquina de produtos absorventes destacando: a) alimentação da bobina de celulose, b) moinho desfibrador, c) roda formadora de painel, d) sistema de exaustão da máquina	24
FIGURA 5 – Aspectos morfológicos (a) e princípios de medição (b) para comprimento da fibra celulósica através de microscopia óptica no equipamento FS5 Valmet. Em b, Lc representa o comprimento de linha central (em verde), e Lp representa o comprimento projetado (em vermelho).....	25
FIGURA 6 – Aspectos morfológicos e princípio de medição para espessura de parede da fibra celulósica através de microscopia óptica no equipamento FS5 Valmet	26
FIGURA 7 – Método de avaliação por escala de cinza, sendo possível mensurar a largura de fibra e a espessura de parede através da microscopia óptica	26
FIGURA 8 – Painel de uma fralda atual que apresenta um desfibramento desuniforme e ineficiente da celulose Fluff, indicando presença de Nits & Knots e possíveis pontos de ruptura e vazamento.....	28
FIGURA 9 – Aspecto de “Nits & Knots” retidos na peneira de 16” Mesh, e “Good Fluff” retido em peneira de 30” Mesh	29
FIGURA 10 – Bobina de celulose Fluff em linha de produção	33
FIGURA 11 – Esquema de alimentação de 4 bobinas de celulose Fluff em um moinho	34
FIGURA 12 – Estrutura interna de um moinho de serras modelo “sawmill”, indicando em a) o rolo guia da alimentação de celulose que controla e direciona o fluxo de alimentação da celulose para dentro do moinho, b) “gap”, distanciamento entre faca (serra móvel) e contra-faca (régua fixa), e c) rotor de serras	35
FIGURA 13 – Imagem de microscopia óptica e dados fornecidos pelo Fiber Image Analyzer: flocos, vasos, kink, curl ou ângulo de curvatura da fibra, palitos,	

coarseness e, em destaque, as propriedades contempladas neste estudo de comprimento de fibras, espessura de parede e finos A e B	36
FIGURA 14 – Sistema de classificação de fibras e finos via FS5	36
FIGURA 15 – Suspensão fibrosa sendo analisada dinamicamente via microscopia em FS5.....	38
FIGURA 16 – Equipamento Johnson Nit Counter da Marketing Technology Service	39
FIGURA 17 – Formador de painéis de celulose Fluff desfibrada e balança analítica para controle de peso automático	41
FIGURA 18 – Prensa e extensor para densificação dos painéis.....	42
FIGURA 19 – Corpo de prova cortado a laser nas dimensões (160 X 50 mm).....	42
FIGURA 20 – Modelo do corte no <i>software</i> do equipamento	43
FIGURA 21 – Procedimento de densificação das bordas do corpo de prova utilizando extensor	43
FIGURA 22 – Densificação final do corpo de prova via extensores	44
FIGURA 23 – Micrômetro a laser para medição e controle de espessura em corpos de prova	44
FIGURA 24 – Sistema universal de ensaios da marca Instron modelo 3360, célula de carga de 5N, garra com suporte para até 50N e de dimensões de 50mm X 25 mm.	45
FIGURA 25 – Posicionamento do corpo de prova em garras do equipamento Instron, a) manipulação do corpo de prova e b) posicionamento do corpo de prova nas garras	45
FIGURA 26 – Aspecto da celulose Fluff pré e pós-desfibramento	49
FIGURA 27 – Aspecto da celulose Fluff via MEV pré e pós-desfibramento.....	49
FIGURA 28 – Análises morfológicas das celulosas Fluff processadas em diferentes condições de fluxo de alimentação (kg/h)	50
FIGURA 29 – Análises morfológicas das celulosas Fluff processadas em diferentes condições de rotação do rotor (rpm)	51
FIGURA 30 – Análises morfológicas das celulosas Fluff processadas em diferentes condições de espaçamento entre faca e contra-faca (gap).....	52
FIGURA 31 – Análises morfológicas das celulosas Fluff agrupadas por celulose A e B posterior ao desfibramento	54
FIGURA 32 – Avaliação da redução do comprimento de fibra da celulose A e B pós-desfibramento quando comparado à morfologia previamente ao processo	55

FIGURA 33 – Análise granulométrica das celulosas Fluff processadas em diferentes fluxos de alimentação (kg/h).....	56
FIGURA 34 – Análise granulométrica das celulosas Fluff processadas em diferentes rotações de rotor (rpm).....	58
FIGURA 35 – Análise granulométrica das celulosas Fluff processadas em diferentes espaçamentos entre faca e contra-faca (gap).....	59
FIGURA 36 – Análise granulométrica das celulosas Fluff agrupadas por umidade de celulose	60
FIGURA 37 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes em diferentes condições de fluxo de alimentação (kg/h)	62
FIGURA 38 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes em diferentes condições de rotação de rotor.....	63
FIGURA 39 – Propriedades mecânicas dos painéis de absorventes em diferentes condições de espaçamento entre faca e contra-faca (gap).....	64
FIGURA 40 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes por celulosas de diferentes umidades	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dados de qualidade das bobinas utilizadas no experimento	33
TABELA 2 – Dados das peneiras granulométricas do equipamento.....	39
TABELA 3 – Planejamento experimental fatorial dos setups do moinho contemplando os diferentes parâmetros testados.....	46
TABELA 4 – Resultados de morfologia das celuloses A e B previamente ao desfibramento.....	48
TABELA 5 – DOE para análise dos 54 diferentes setups contemplando as variáveis de processamento.....	74
TABELA 6 – Análise de Variância das Propriedades Morfológicas.....	76
TABELA 7 – Sumário de Modelo das Propriedades Morfológicas	76
TABELA 8 – Método de Tukey das Propriedades Morfológicas.....	77
TABELA 9 – Coeficiente de Correlação de Pearson entre Propriedades Morfológicas e Parâmetros de Processamento	78
TABELA 10 – Análise de Variância das Propriedades Granulométricas.....	79
TABELA 11 – Sumário de Modelo das Propriedades Granulométricas	79
TABELA 12 – Método de Tukey das Propriedades Granulométricas.....	80
TABELA 13 – Coeficiente de Correlação de Pearson entre Propriedades Granulométricas e Parâmetros de Processamento.....	81
TABELA 14 – Análise de Variância das Propriedades Mecânicas.....	82
TABELA 15 – Sumário de Modelo das Propriedades Mecânicas.....	82
TABELA 16 – Método de Tukey das Propriedades Mecânicas.....	83
TABELA 17 – Coeficiente de Correlação de Pearson entre Propriedades Mecânicas, Granulométricas e Morfológicas e Parâmetros de Processamento.....	84
TABELA 18 – Coeficiente de Correlação de Pearson entre Propriedades Mecânicas, Granulométricas e Morfológicas e Parâmetros de Processamento.....	85

LISTA DE SIGLAS

ADL	Aquisition Distribution Layer
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Cross Sectional Area
CTMP	Chemi-thermomechanical ou quimiotermomecânica
DOE	Design of Experiment
DP	Degree of polimerization ou Grau de Polimerização
GAP	Espaçamento entre faca e contra-faca do moinho
ISO	International Organization for Standardization
MTS	Marketing Technology Service Equipments
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NaOH	Hidróxido de Sódio
Na ₂ S	Sulfeto de Sódio
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
RPM	Rotação por minuto
SAP	Polímero Superabsorvente
SCAN	Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing committee
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 CELULOSE FLUFF	18
3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CELULOSE FLUFF	20
3.3 DESFIBRAMENTO EM MOINHO	22
3.4 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DAS FIBRAS CELULÓSICAS	24
3.4.1 Comprimento de Fibras	25
3.4.2 Diâmetro de Fibras e Espessura de Parede	25
3.4.3 Finos Morfológico	27
3.5 PROPRIEDADES GRANULOMÉTRICAS EM PRODUTOS ABSORVENTES	27
3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PAINÉIS ABSORVENTES	29
3.6.1 Resistência à Tração	31
3.6.2 Alongamento	31
3.6.3 Absorção de Energia à Tração (TEA)	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 CELULOSE	33
4.2 DESFIBRAMENTO EM MOINHO SAWMILL	34
4.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA VIA MICROSCOPIA ÓPTICA	35
4.3.1 Preparo de Amostras	37
4.3.2 Microscopia Óptica	37
4.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA VIA NIT COUNTER	38
4.4.1 Preparo de Amostras	39
4.5 ANÁLISES FÍSICO-MECÂNICAS VIA MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL	40

4.5.1	Formação de Corpo de Prova	40
4.5.2	Ensaio de Resistência à Tração.....	45
4.6	DESIGN DO EXPERIMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	ANÁLISE MORFOLÓGICA	48
5.1.1	Análise Morfológica Pré-Desfibramento	48
5.1.2	Análise Morfológica por Fluxo de Alimentação.....	49
5.1.3	Análise Morfológica por RPM do Rotor	51
5.1.4	Análise Morfológica por GAP entre Faca e Contra-Faca.....	52
5.1.5	Análise Morfológica por Umidade de Celulose.....	53
5.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	55
5.2.1	Análise Granulométrica por Fluxo de Alimentação.....	56
5.2.2	Análise Granulométrica por RPM de Rotor	57
5.2.3	Análise Granulométrica por GAP entre Faca e Contra-faca.....	58
5.2.4	Análise Granulométrica por Umidade de Celulose.....	59
5.3	ANÁLISE FÍSICO-MECÂNICA DE PAINÉIS ABSORVENTES POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE DESFIBRAMENTO	61
5.3.1	Análise Físico-Mecânica do Painel por Fluxo de Alimentação	61
5.3.2	Análise Físico-Mecânica do Painel por RPM de Rotor.....	63
5.3.3	Análise Físico-Mecânica do Painel por GAP entre Faca e Contra-Faca	64
5.3.4	Análise Físico-Mecânica do Painel por Umidade de Celulose	65
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO A – DOE DO EXPERIMENTO.....	74
	ANEXO B - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA.....	76
	ANEXO C - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA..	79
	ANEXO D - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DE ANÁLISES MECÂNICAS	82

ANEXO E - ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS COMPLETAS.....	85
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Fibras celulósicas e seus derivados são amplamente utilizados em segmentos de papéis, alimentícios, farmacêuticos e higiênicos, nos quais a polpa celulósica proveniente do processamento de madeiras é uma das principais fontes desse polímero. A celulose é o biopolímero mais importante e disponível no mundo, sendo composta por monômeros de D-glucopiranosose ($C_6H_{11}O_5$) conectados através de ligações glicosídicas $\beta(1\rightarrow4)$ covalentes, que formam unidades chamadas celobiose e que expõem uma grande quantidade de grupos hidroxila, favorecendo ainda ligações de ponte de hidrogênio. Alguns parâmetros, como espécie da madeira, fonte e condições de processamento, ditam as características desse polímero, sua aplicabilidade e performance em produtos finais.^{1, 2, 3}

A celulose Fluff é a celulose destinada ao segmento de produtos higiênicos e absorventes e que passará pelo processamento mecânico de desfibramento. Será responsável principalmente pela estabilidade e formação do painel absorvente, pela distribuição do gel superabsorvente e pelo auxílio ao transporte e absorção de líquidos nesses produtos.⁴

Ao longo dos anos, a experiência tem indicado que a falha mecânica desses painéis absorventes tem sido frequentemente relatada por consumidores como uma das principais causas de problemas na distribuição de líquidos, ocasionando vazamentos. Além disso, a celulose Fluff é considerada uma *commodity* de alto valor agregado e de presença relevante na composição dos produtos absorventes, havendo uma busca constante por melhorias relacionadas à qualidade, à uniformidade e à estabilidade mecânica do painel de celulose, além de seu estudo e sua otimização serem importantes fatores econômicos e de performance.⁵⁻⁹

O desfibramento da celulose Fluff pode ser realizado através de moinhos de dentes, martelos ou serras e ocorre a seco. Este processamento é considerado uma das etapas mais importantes na fabricação dos produtos absorventes e do segmento *air laid* e depende exclusivamente dos parâmetros de processamento utilizados e da tecnologia de maquinário empregada. Para aplicações nesse segmento, as fibras celulósicas individualizadas devem apresentar homogeneidade, maiores comprimentos e, com isso, prover maior estabilidade mecânica do painel absorvente. Para alcançar essas características, a celulose deve ser bem desfibrada

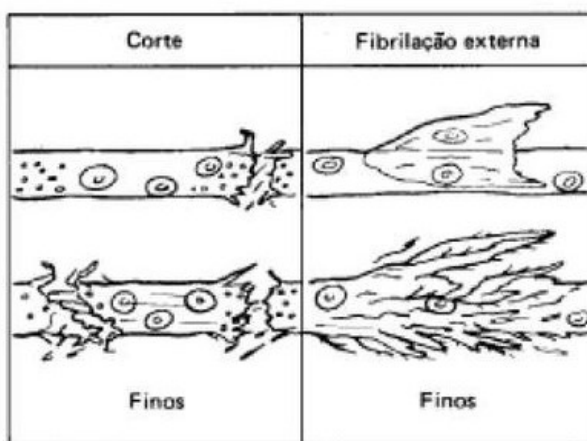
através de um processo controlado e otimizado, almejando sempre a máxima individualização das fibras, sem danificá-las.⁵⁻⁸

Sob as tensões mecânicas decorrentes do processo de desfibramento, a energia mecânica fornecida pelas forças de compressão e cisalhamento na moagem é suficiente para alterar a topoquímica da fibra de celulose e ainda causar a cisão da cadeia polimérica por ação mecânica, levando à sua despolimerização e tornando-a de difícil processamento posterior, de baixa resistência e inadequada para algumas aplicações.^{3, 10}

Reações de despolimerização ocorrem continuamente durante os processos que envolvem a absorção de energia mecânica e afetam as propriedades do produto processado. As reações induzidas pelo estresse mecânico na celulose, além de resultarem na desagregação dos feixes de fibras, considerada o propósito do desfibramento, acabam também por reduzir significativamente o seu comprimento, além de fibrilar o material.¹⁰

A Figura 1 exemplifica os possíveis danos causados pelo processamento mecânico das fibras celulósicas, demonstrando o aspecto dos finos gerados pelas ações de corte e fibrilação da celulose.

FIGURA 1 – Exemplo de efeitos do processamento mecânico nas fibras celulósicas visualizados em processos de refinação



Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2010.

Em termos práticos, na performance dos produtos absorventes, esses danos às fibras geralmente estão correlacionados a reclamações de usuários por problemas com a ruptura de painéis e vazamentos de fluídos, geralmente causados

pela distribuição desuniforme das fibras e pelas baixas resistências mecânicas que muitas vezes são iniciadas durante o processo de manufatura do produto.

Apesar de os parâmetros de ajuste de moinho serem considerados fundamentais para um desfibramento uniforme e eficiente, esse é um tema pouco explorado, publicado e difundido quando falamos de celulose Fluff. Dentre as razões da falta de informações ao público, está a alta competitividade entre os fabricantes de produtos absorventes e a manutenção da otimização de processo como “estratégia” competitiva do produto, as diferentes tecnologias e particularidades de maquinário dos fabricantes, a indisponibilidade em parar linhas de produção para realização de testes piloto, além da não mensuração das oportunidades de ganho no produto final a partir da otimização desses parâmetros.⁹

Sendo assim, o presente trabalho objetivou avaliar e quantificar o impacto dos parâmetros operacionais do moinho em morfologia de fibra, qualidade e uniformidade do desfibramento bem como relacioná-los com as propriedades de resistência mecânica obtidas em painéis absorventes formados pela celulose Fluff.

Com o objetivo de representar processos em escala industrial, o teste foi realizado em planta piloto equipada com moinho de serras modelo “*sawmill*” contemplando configurações industriais. Alinhadas a essas variáveis foram incluídas celulosas com características e especificações dentro dos limites empregados pelo mercado, diferenciando-se apenas no teor de umidade (%), compreendendo a faixa típica de comercialização de 6% e 9%.

O foco do experimento não está em estabelecer condições de operação, pois entende-se que cada fabricante tem a sua estratégia em relação à categoria de produto (por exemplo, protetor diário, absorvente e fraldas infantis e geriátrica), matéria-prima e equipamentos, mas, fixados esses parâmetros, comprovar os possíveis impactos e ganhos em produto final atribuindo às condições operacionais escolhidas, e assim possibilitar a otimização do processo de desfibramento através do melhor ajuste de equipamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral realizar o desfibramento da celulose Fluff em moinho de serras, buscando a correlação entre diferentes configurações de ajuste do equipamento com propriedades morfológicas, granulométricas e mecânicas dos painéis absorventes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho foram centrados em:

- a) Avaliar morfológicamente as fibras celulósicas pré e pós-desfibramento via microscopia óptica;
- b) Avaliar a uniformidade do desfibramento através de análise granulométrica;
- c) Avaliar índice de resistência à tração, índice de absorção de energia à tração (TEA) e alongamento dos painéis absorventes através de máquina de ensaios universal;
- d) Correlacionar os parâmetros de moinho utilizados com os efeitos morfológicos, granulométricos e de resistência mecânica dos painéis.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CELULOSE FLUFF

A celulose Fluff utilizada no segmento de higiene tem sido usada desde a década de 1920, quando era componente principal de absorventes higiênicos femininos. Seu uso rapidamente se expandiu para fraldas descartáveis, e o domínio desse segmento sobre o consumo da celulose Fluff aconteceu em 1960. A partir de então, variados campos de aplicação expandiram seu uso, entre produtos como lenços umedecidos, embalagens de produtos cárneos, em segmentos pet e hospitalar. Adicionalmente, a celulose Fluff é considerada um dos constituintes mais sustentáveis e disponíveis no mundo, visto que é proveniente de fonte renovável e possui características de biodegradabilidade.^{12, 13}

Historicamente a celulose Fluff tem sido classificada como uma especialidade de mercado, sendo responsável pelo consumo de aproximadamente 10% da produção mundial de celulose. Em 2017, o consumo global dessa celulose atingiu 5,8 milhões de toneladas, e as projeções mostram que esse consumo deve crescer, atingindo 7 milhões de toneladas até 2022, movimentando \$5,3 bilhões de dólares no segmento. A maior fatia desse consumo global está em usos finais, como fraldas infantis, higiene feminina e produtos adultos de incontinência, representando 90,3% do consumo global. Outro mercado que tem empregado cada vez mais Fluff em seus produtos, e que tem crescido rapidamente, é o segmento de não tecidos e *air laid*, com crescimento anual de 5,5%.¹²

Apesar do elevado consumo, a composição celulósica dos produtos higiênicos tem sido altamente influenciada pelo crescimento do uso de polímeros superabsorventes (*SAP*), design de produto e expansão geográfica dos absorventes e fraldas em determinados mercados, porém ainda apresenta presença relevante nos produtos atuais, sendo de fundamental importância o desenvolvimento e a otimização de processos que visem ao aumento de rendimento e de sua qualidade na cadeia produtiva.^{12, 4}

Inicialmente a celulose Fluff foi o único constituinte responsável pela absorção nos produtos absorventes, resolvendo inicialmente todas as necessidades desse segmento, como aquisição, distribuição e retenção de fluidos. A partir de 1980, com o desenvolvimento e aumento do uso de “géis” superabsorventes

poliméricos, a celulose teve suas funções rearranjadas, sendo agora responsável pela performance em parâmetros de distribuição de fluidos, ancoragem do polímero superabsorvente, integridade e estabilidade mecânica do painel, em que nenhum dos outros constituintes conseguem eficácia até o momento.⁴⁻⁸

Os produtos higiênicos absorventes atuais possuem uma estrutura complexa e são constituídos por vários componentes, a depender exclusivamente do tipo de aplicação (protetor diário, absorventes, fraldas infantis e geriátricas, aplicações hospitalares, etc.), tipo de tecnologia de manufatura, dos produtores e do mercado.

A Figura 2 exemplifica a elevada complexidade desses produtos e demonstra os principais componentes da estrutura e suas funções no produto, com destaque ao “Core” do produto (ponto D), também conhecido como painel, “*pad*” ou manta absorvente. Nesse ponto, a celulose Fluff está presente em diferentes proporções (5 a 55 g/m²) a depender do tipo de produto, fabricante e mercado.

FIGURA 2 – Componentes estruturais de um produto absorvente atual



Fonte: EDANA, 2019.

- A) “*Top sheet*” ou folha de cobertura, responsável pelo contato inicial e macio com a pele do usuário;
- B) “ADL – *Acquisition distribution layer*” ou camada de aquisição e distribuição de fluidos, classificada por ser um não tecido (*nonwoven*) de estrutura aberta e porosa responsável pela retirada rápida de fluido do contato com a pele;
- C) “*Back Sheet*”, filme plástico à prova d’água responsável pela manutenção do fluido dentro do produto sem provocar vazamentos;

- D) “Core”, também conhecido como painel, pad ou manta absorvente, é responsável pela estrutura de suporte do produto, absorção dos fluidos e é composto por uma estrutura de celulose Fluff desfibrada e polímeros superabsorventes;
- E) “Strippers” ou orelhas de fechamento;
- F) Elásticos para contorno corporal e manutenção dos fluidos dentro do produto.

3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CELULOSE FLUFF

Produzida atualmente pelo processo sulfato (“Kraft”) ou sulfito, as variedades de fibras celulósicas de mercado são provenientes de folhosas e coníferas. No Brasil a espécie de conífera predominante na produção de celulose Fluff é proveniente do *Pinus spp*, especificamente o *Pinus taeda*. As árvores do gênero *Pinus* originam polpas celulósicas destinadas a produtos que demandem maior resistência, como papéis para embalagens (papel ondulado, papel-cartão, *sack kraft*), e segmento de produtos absorventes higiênicos.^{20, 48}

A depender do processo de polpação, as propriedades das fibras diferem-se umas das outras. Processos químicos correspondem a mais de 99% do mercado de celulose Fluff, porque agregam características importantes à fibra, como estética e uniformidade de comprimento, propriedades essenciais para o segmento.^{15, 48}

Polpações químicas envolvem a saturação dos cavacos com químicos (NaOH + Na₂S) e cozimento em reatores empregando alta pressão e temperatura. Esse processo dissolve a lignina e impurezas contidas na madeira, resultando em baixos rendimentos, porém com fibras mais uniformes quanto ao comprimento e à distribuição e melhores resistências, além de um branqueamento mais fácil e econômico.³

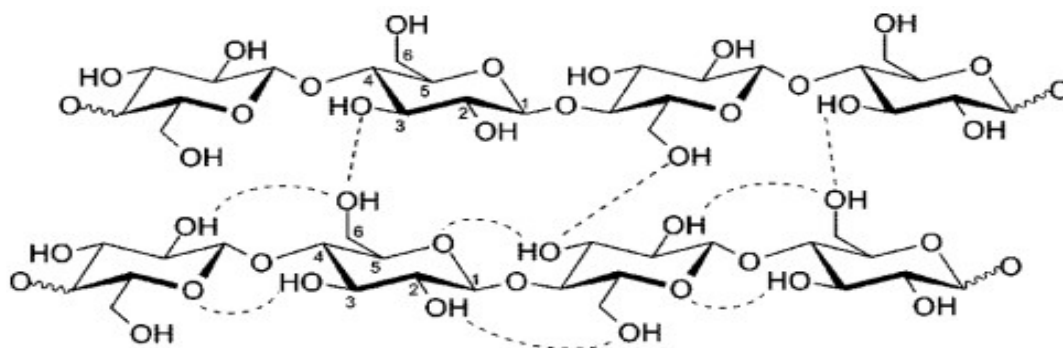
É no processo de formação de folha que a celulose do segmento Fluff se difere das celuloses comuns, porque, no processo de produção de produtos absorventes, características como uniformidade de gramatura, umidade, densidade e resistência são imprescindíveis, sendo necessários diferentes *setups* e controles de processo que visem a tais parâmetros.¹⁸ Diferentemente das celuloses de mercado, a celulose Fluff é fornecida em formato de bobinas, com gramaturas de 600 a 800 g/m² e densidades de 0,4 a 0,6 g/cm³.⁴

A folha de Fluff é formada a partir da polpa diluída proveniente do branqueamento, que é alimentada através da caixa de entrada e direcionada por

uma tela de formação. Nessa etapa, parâmetros de estabilidade de gramatura e formação são necessários, sendo importante haver grandes diluições para efetuar a boa uniformidade na dispersão das fibras e formação da folha. Após a formação, aproximadamente metade da água presente na folha é removida através de processos de drenagem, vácuo e prensagem. A folha então passa pelo processo de secagem, no qual sua umidade é removida até níveis de 6% a 10% de umidade residual. Nessas etapas de prensagem e secagem, propriedades de densidade, resistência e umidade da folha são determinadas. A umidade na celulose é uma propriedade fundamental para a etapa de desfibramento posterior.⁴

Altas estabilidades química e mecânica da celulose ocorrem devido às ligações covalentes glicosídicas e ao enorme grau de ligações de ponte de hidrogênio intra e intermoleculares, exemplificadas na Figura 3. Além disso, são responsáveis pelo caráter de hidrofiliicidade e absorção do biopolímero.¹⁶

FIGURA 3 – Pontes de hidrogênio intra e intermolecular em celulose



Fonte: PINKERT *et al.*, 2009.

Na prática, nos processamentos em moinhos, casos de umidade extremamente baixa da folha podem apresentar resistência ao desfibramento e causar excessivo danos às fibras. Já em casos de umidades elevadas, a folha é desintegrada em pequenos pedaços, também chamados de “*knots*”, nos quais em vez de separar as fibras individualmente, elas se mantêm aglomeradas graças às suas ligações químicas e físicas. As maiores umidades superficiais das fibras celulósicas promovem um maior número de ligações interfibrilares, aumentando a resistência da folha e dificultando o desfibramento.⁴

Em processo de conversão de bobinas e calandragem da celulose, fibras mais secas podem ainda apresentar maior resistência à compressão, já quando

úmidas são facilmente comprimidas, facilitando o controle de rebobinamento, perfil de espessura e uniformidade.⁴

3.3 DESFIBRAMENTO EM MOINHO

O desfibramento à seco da celulose Fluff é considerado um dos mais importantes passos na produção dos produtos absorventes e ocorre através de processos mecânicos que utilizam impacto e fricção entre martelos, dentes, serras ou discos refinadores, posicionados a uma distância de poucos milímetros da folha de celulose. Esse espaçamento que ocorre entre “faca” e “contra-faca” é chamado operacionalmente de “gap” de moinho.¹⁷

O objetivo desse processamento é o desfibramento através da máxima individualização das fibras, almejando sempre o menor impacto às fibras celulósicas, embora seja inevitável que essas técnicas convencionais produzam variados efeitos, como redução do seu comprimento, formação de finos ou pós, fibrilação, ou ainda acarretar um desfibramento ineficiente, por meio da manutenção de aglomerado de fibras também conhecido como nós, grumos, *fiber bundles*, e, no segmento Fluff, denominado “teor de *Nits & Knots*”. O ideal é sempre operar com um desfibramento brando, que facilite o desfibramento com baixos conteúdos de grumos em baixos consumos de energia e ainda atribua uma boa resistência do painel composto pela rede de fibras.⁴

A resistência por trás do desfibramento é dependente da força de ligação entre fibras, na qual as maiores resistências podem também indicar um maior consumo de energia para a individualização de fibras e redução do conteúdo de grumos. A energia requerida para o desfibramento é um dos principais indicadores de processo, estando relacionada com a espécie de madeira, condições de polpação, densidade e formação de folha ou ainda rotações do motor do equipamento. O consumo de energia, além de perda econômica em processo, se atrelado ao nível de rotação do motor, pode impactar negativamente o comprimento de fibras devido a uma maior incidência de cortes, ocasionando formação de finos e pó na máquina e aumento de estática no sistema, que, por sua vez, dificulta a formação do painel.⁴⁻⁸

A maneira mais efetiva de melhorar as condições de desfibramento é através da redução da densidade da folha de celulose, que fisicamente reduz o

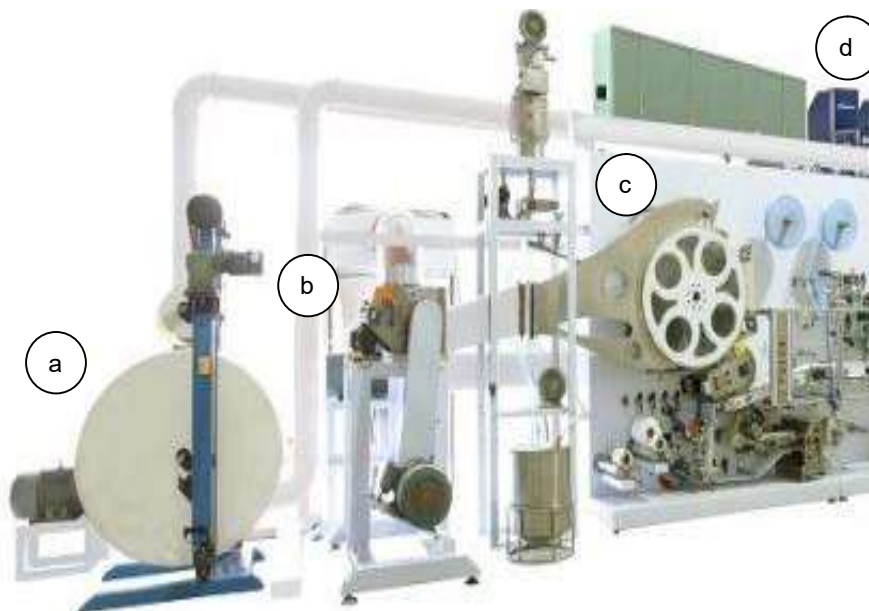
número de contato fibra/fibra e, portanto, as ligações de pontes de hidrogênio entre fibras, mas esse processo acarreta num maior consumo de energia para os produtores, limitando a produtividade devido ao maior consumo de vapor necessário para a secagem, ou ainda devido à redução de velocidade de linha.¹⁸

Algumas alternativas químicas também são possíveis para melhorar as características do desfibramento como qualidade, uniformidade e redução de energia. Essas alternativas são realizadas através do tratamento da celulose com os chamados *debonders*, previamente à etapa de secagem, que são químicos que reduzem a força da ligação interfibrilar da celulose por ocuparem as ligações de ponte de hidrogênio. Sua função é manter o nível de *knots* tão baixo quanto possível através da maior uniformidade do conteúdo fibroso ao mesmo tempo que reduzem o consumo de energia no moinho, mantêm o comprimento das fibras, reduzem a densidade das folhas formadas e aumentam a maciez do material. No entanto, essa adição de químicos, além de impactar em custos, afeta negativamente as propriedades de absorção da celulose, o que faz com que muitas vezes não sejam bem aceitos no mercado.¹⁸

A Figura 4, mostra esquematicamente uma máquina de produtos absorventes, na qual ocorre a alimentação de celulose no moinho, sendo desfibrada e soprada contra uma roda formadora que apresenta o formato do produto. Nessa roda formadora forma-se um painel absorvente que, através de um pequeno vácuo, o remove para uma linha de envelopamento por materiais não tecidos e plásticos. Essa alimentação do sistema por ar e vácuo pode ocasionar perda produtiva por causa do escape de partículas de celulose classificadas como pó ou finos por entre as malhas metálicas do formador e que são perdidos através do sistema de exaustão da máquina, podendo afetar o rendimento do processo de desfibramento.^{5, 6, 7, 9}

Apesar do uso comum de moinhos, para o processamento da celulose Fluff, ainda existe um entendimento limitado do desfibramento e de seus parâmetros de ajuste com as propriedades morfológicas, de uniformidade e as propriedades mecânicas da rede de fibras formada à seco e suas relações. Dentre as razões para essa limitação, está a falta de equipamento e procedimento que possa caracterizar as propriedades mecânicas desses painéis, devido à individualização das fibras, à densidade e à formação a seco diferenciada diante das estruturas das fibras e dos papéis comumente empregados no ramo.¹⁸

FIGURA 4 – Esquema de uma máquina de produtos absorventes destacando: a) alimentação da bobina de celulose, b) moinho desfibrador, c) roda formadora de painel, d) sistema de exaustão da máquina



Fonte: Adaptado de CHAMPIONS INDUSTRY CO, 2019.

3.4 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DAS FIBRAS CELULÓSICAS

As propriedades físicas e mecânicas de materiais celulósicos dependem diretamente da fonte de sua matéria prima e da maneira como as fibras são processadas, impactando diretamente a sua morfologia. As fibras de folhosas, também chamadas fibras curtas, possuem comprimentos de até 1,2 milímetros, já as traqueídes de coníferas, popularmente conhecidas no segmento como fibra longa, possuem comprimentos que vão de 2 a 4 milímetros e são majoritariamente direcionadas à produção de celulose Fluff, devido à sua maior estabilidade e resistência mecânica.^{4, 15, 18, 48}

A morfologia da fibra é de fundamental importância para o segmento de celulose Fluff, porque a forma e a estrutura das fibras controlam muito da performance dos produtos absorventes. Apesar de a morfologia de fibra ser considerada complexa, para a celulose Fluff, alguns parâmetros apresentam função chave na estrutura desses produtos, destacando-se o comprimento, o diâmetro de fibra e a espessura de parede. Em geral, esses parâmetros definem a capilaridade da estrutura absorvente e controlam sua resistência à seco e úmida em suas aplicações.^{4, 18}

3.4.1 Comprimento de Fibras

Nas estruturas de produtos absorventes, as fibras mais longas e de maior grau de polimerização proveem maiores resistências e capilaridades que fibras curtas, contribuindo assim para uma resistência estrutural superior devido ao maior número de contatos entre fibras na continuidade da estrutura, proporcionado por esse maior comprimento.⁴

Na Figura 5, é possível visualizar o aspecto das fibras analisadas através de microscopia óptica pelo equipamento Fiber Image Analyzer FS5 da Valmet. A Figura b indica o comprimento de fibra projetado (método antigo) e de linha central (atual) utilizado pelo equipamento

FIGURA 5 – Aspectos morfológicos (a) e princípios de medição (b) para comprimento da fibra celulósica através de microscopia óptica no equipamento FS5 Valmet. Em b, Lc representa o comprimento de linha central (em verde), e Lp representa o comprimento projetado (em vermelho)



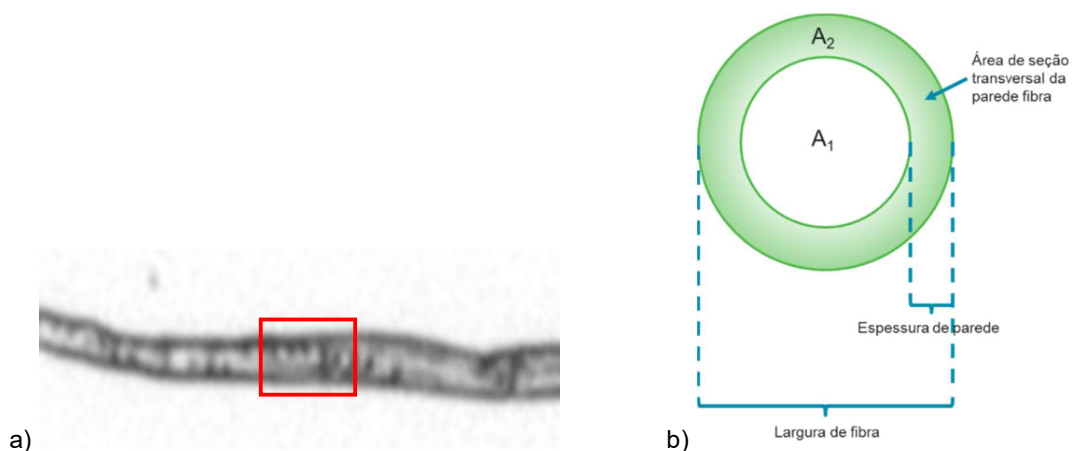
Fonte: Princípios de medição analisador Valmet FS5, Valmet 2020.

3.4.2 Diâmetro de Fibras e Espessura de Parede

Esses parâmetros são importantes porque desenvolvem o comportamento de resiliência dos painéis absorventes, com relevância para estado úmido no usuário e retorno de fluidos para contato com a pele. Fibras mais largas e de paredes mais espessas têm por característica apresentar maior rigidez e, com isso, resistir melhor à compressão nos estados seco e úmido, contribuindo assim para melhor resiliência e melhor capacidade de absorção e retenção de líquidos. Porém fibras mais finas apresentam maior facilidade para o entrelaçamento do que uma fibra mais espessa, o que promove uma maior estabilidade mecânica e alongamento do painel.⁴⁻⁷

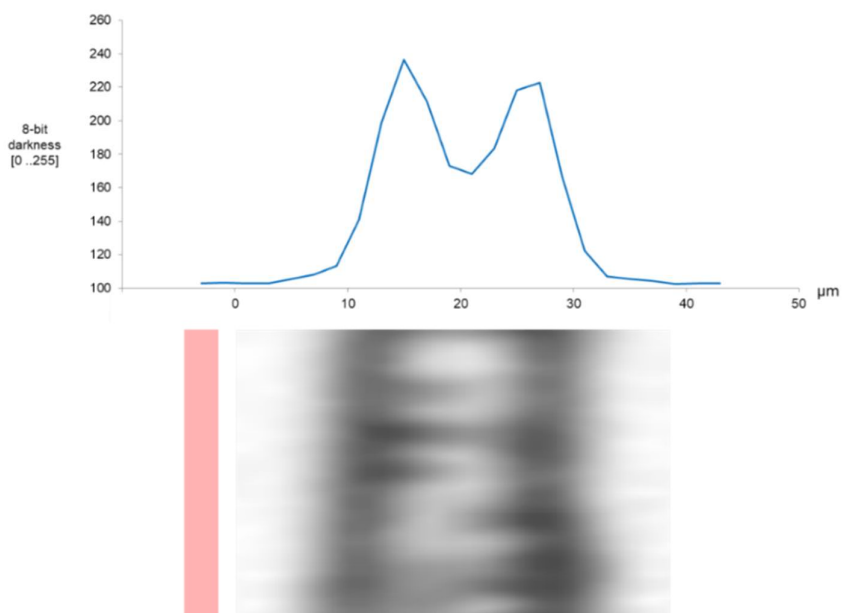
As Figuras 6 e 7 mostram uma análise óptica e exemplificam o esquema de como são realizadas as medições morfológicas. Devido ao aspecto tubular da fibra é possível determinar, através de escala de cinza obtida, a espessura de parede e assim estimar a área transversal da parede. Estes, parâmetros em conjunto com o comprimento de fibra, fornecem uma análise importante da morfologia dos materiais celulósicos.

FIGURA 6 – Aspectos morfológicos e princípio de medição para espessura de parede da fibra celulósica através de microscopia óptica no equipamento FS5 Valmet



Fonte: Princípios de medição analisador Valmet FS5, Valmet 2020.

FIGURA 7 – Método de avaliação por escala de cinza, sendo possível mensurar a largura de fibra e a espessura de parede através da microscopia óptica



Fonte: Princípios de medição analisador Valmet FS5, Valmet 2020.

3.4.3 Finos Morfológico

Os finos morfológicos são fragmentos das paredes primária e secundária da fibra celulósica e são gerados pelo processamento químico e mecânico. As celulosas diferem-se quanto à tendência dessa geração, sendo que polpas do processo *Kraft* apresentam maior resistência à remoção das paredes primárias e secundárias do que as de processo sulfito, que possui um maior potencial de degradação destas.⁴⁸

Polpas celulósicas com maior teor de finos proveniente do processamento químico tendem a produzir celulosas que são mais resistentes, devido à fibrilação ocorrida nas paredes, e, portanto, são difíceis de serem desfibradas em moinho, demandando maior energia.^{4, 48}

Já os finos gerados através do processamento mecânico (Figura 1), ocasionado pelo corte das fibras e redução do comprimento, têm o efeito de redução das resistências do material, além de contribuírem para problemas nos fabricantes como sujidade de máquina, consequência da maior geração de pó, ou ainda perda de processo através do sistema de exaustão na máquina de produtos absorventes.

3.5 PROPRIEDADES GRANULOMÉTRICAS EM PRODUTOS ABSORVENTES

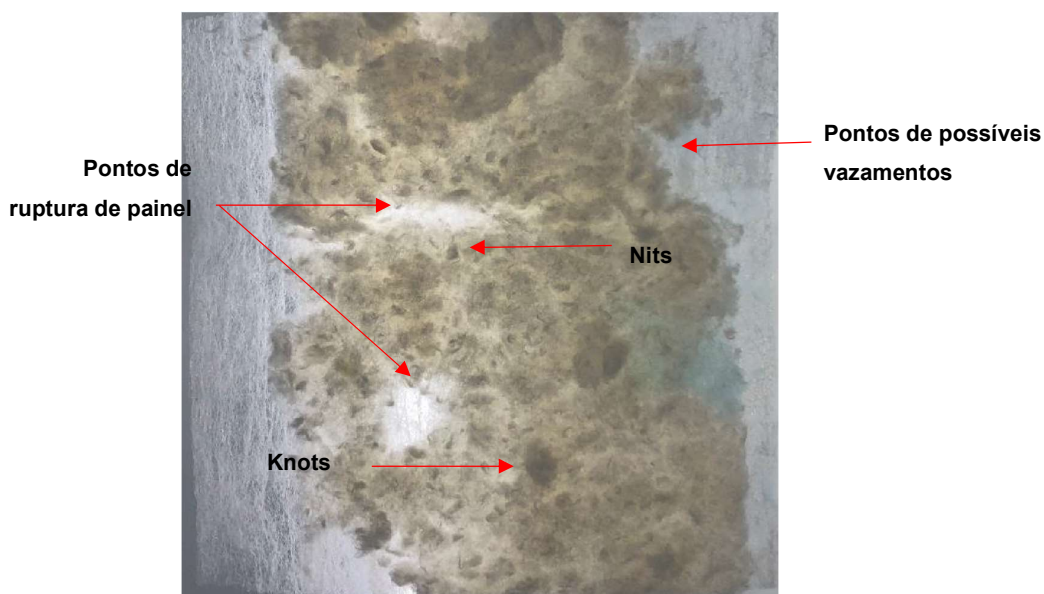
As propriedades dos painéis absorventes não dependem somente da estrutura da fibra celulósica, mas também da ligação entre as fibras, e estas dependem da maneira como o processo de desfibramento ocorreu. Densidade, gramatura, comprimento do segmento de fibra livre e o número de contatos fibra-fibra são importantes para avaliar parâmetros estruturais e impactam a força das ligações, influenciando fortemente as propriedades do painel absorvente. Ligações fortes indicam uma maior capacidade do painel de suportar efetivamente uma força ou um estresse aplicado antes que o material se rompa.^{22, 23}

A uniformidade do processo de desfibramento está atrelada à qualidade e à distribuição granulométrica do Fluff pós-desfibramento, sendo que essa distribuição do conteúdo fibroso é uma medida indireta da força de ligação entre fibras que contêm o material. Desfibramentos desuniformes podem causar problemas de rupturas de painéis, má distribuição de líquidos e ainda possíveis vazamentos em

produtos finais; é um parâmetro-chave em controles de processo que almejam melhorias de performance.^{5, 6, 7, 9}

A Figura 8 mostra o painel de uma fralda infantil de mercado atual, em que a celulose Fluff teve um desfibramento desuniforme e nela consegue-se verificar os pontos de ruptura do painel. Esse comportamento deve-se à heterogeneidade do material, que frequentemente apresenta fibras extremamente danificadas, curvadas, quebradas ou mal distribuídas. Esses efeitos também levam a uma menor resistência do painel e à ineficiência do produto final em usuários.^{5, 6, 7}

FIGURA 8 – Painel de uma fralda atual que apresenta um desfibramento desuniforme e ineficiente da celulose Fluff, indicando presença de Nits & Knots e possíveis pontos de ruptura e vazamento



Fonte: O Autor.

A análise granulométrica é realizada através de peneiras de diferentes aberturas ASTM (*mesh*) e classifica o conteúdo percentualmente em:

- Teor de Fluff bem desfibrado (%), também chamado de *Good Fluff*, caracterizado pelo conteúdo fibroso com fibras individualizadas;
- Teor de grumos (%), ou "*Nits & Knots*", caracterizado por conter aglomerados de fibras;
- Teor de finos (%), caracterizado pelo excessivo corte de fibras ou ainda pela geração de "pó" em processo.⁹

Na Figura 9 pode ser visualizado o aspecto dos conteúdos de *Good Fluff* e *Nits & Knots*.

FIGURA 9 – Aspecto de “Nits & Knots” retidos na peneira de 16“ Mesh, e “Good Fluff” retido em peneira de 30” Mesh



Fonte: Marketing Technology Service, 2015.

A maior uniformidade do desfibramento está sempre atrelada à maximização do conteúdo de *Good Fluff*, que é caracterizado pela maior individualização das fibras, e seus conteúdos percentuais podem ser calculados a partir da equação 1.

A depender do tipo de processo de fabricação da indústria de produtos absorventes, a eficiência do processo, ou rendimento, pode ser definida por meio da equação 2, sendo composta pelos conteúdos de celulose que realmente são retidos no sistema e compõem os painéis absorventes, já que geralmente os finos são perdidos através do sistema de exaustão e muitas vezes são considerados perda de processo.⁹

$$Fluff\ Total\ (\%) = Good\ Fluff + Nits\ \&\ Knots + Finos \quad (1)$$

$$Eficiência\ de\ Desfibramento\ (\%) = Good\ Fluff + Nits\ \&\ Knots \quad (2)$$

3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PAINÉIS ABSORVENTES

As propriedades mecânicas de painéis absorventes são influenciadas pelas propriedades das fibras, suas dimensões e seu formato. Conhecer os mecanismos e propriedades envolvidos no comportamento macroscópico e microscópico do painel de fibras pode ser fundamental para correlacionar com a performance dos produtos no usuário final. Por esse motivo, os painéis produzidos com as diferentes configurações são submetidos a ensaios de tração, para medir a máxima força suportada pela rede fibrosa.^{5, 6, 7}

A possibilidade de utilizar equipamentos para a avaliação de propriedades mecânicas e viscoelásticas do painel mostraram que medições de reologia do material podem fornecer informações relevantes sobre a relação entre as propriedades da fibra, a estrutura do painel e as suas propriedades mecânicas, podendo relacionar-se com a performance do produto final no usuário. Sendo assim, torna-se relevante aplicar essa técnica para caracterizar a influência dos diferentes parâmetros de processamento da celulose em painéis absorventes.^{5, 6, 7, 24}

Similar ao que ocorre em papéis, a resistência à tração de painéis absorventes sofre influência do comprimento, da resistência e das ligações entre fibras de celulose. Diferentemente do processo mecânico de refinação que promove o aumento de resistências, devido à melhor ligação interfibrilar resultante da fibrilação mecânica e ao aumento da superfície específica fibrosa, o processamento da celulose Fluff individualiza as fibras, não afetando consideravelmente a fibrilação do material.^{25, 26}

Em papéis as propriedades mecânicas sob tração são influenciadas pela direção das fibras no papel, já em painéis de celulose Fluff essa orientação não ocorre, novamente destacando a relevância do impacto sofrido pelas fibras, sua qualidade desfibrada e seu efeito em resistência mecânica.²⁷

Visto a inexistência de um método específico para análise de resistências em painéis absorventes Fluff e, propondo um método alternativo ao *PFI-Method* (1981) "*Measurement of network strength in dry Fluffed pulps*", que não simula de maneira eficiente as forças mecânicas envolvidas durante o uso, sugere-se neste trabalho adaptar a norma de papéis *TAPPI/ANSI T 494 om-13* ao segmento de Fluff e, assim, poder empregá-lo para avaliar a propriedades físico-mecânicas em painéis absorventes. Uma das razões para a adequação e utilização da *T 494* é a sua maior similaridade com o tipo de estresse pelo qual os painéis absorventes passam em seu uso final (movimentos de caminhar, por exemplo) do que o método *PFI* (1981), que utiliza resistência ao estouro e pouco correlacionável com a dinâmica humana, além de que este método requer uma perfeita formação do material e baixas variabilidades, o que, em prática, na formação de painéis absorventes, é difícil de ocorrer.^{5, 6, 7, 28, 29}

3.6.1 Resistência à Tração

Resistência à tração é a força máxima de tração desenvolvida em um corpo de prova até sua ruptura, que ocorre sob condições previamente estabelecidas e é expressa como força por unidade de área.

Adaptando a teoria da normativa *TAPPI/ANSI T 494 om-13* de tração de papéis para o segmento de Fluff, a resistência à tração é indicativa da resistência derivada de fatores como resistência da fibra, comprimento e ligação, sendo muito utilizada no segmento de celuloses para deduzir informações sobre esses fatores, especialmente quando usada como um índice de resistência à tração, que é a resistência proporcional à gramatura.²⁹

Para fins de controle de qualidade, a resistência à tração tem sido usada como uma indicação da capacidade de manutenção de muitos papéis, que são submetidos a uma tensão de tração simples e direta. Neste trabalho, o mesmo método foi aplicado para painéis absorventes, e os resultados de resistência à tração também podem ser usados como uma indicação do potencial de resistência à ruptura do material em operações de conversão ou em performances de produto absorvente em usuários finais.

Avaliações conjuntas de resistência à tração, alongamento e absorção de energia são de fundamental relevância para análises de desempenho do produto, especialmente quando este é submetido a um estresse dinâmico, como é o caso dos produtos higiênicos.²⁹

3.6.2 Alongamento

O alongamento sofrido pelo corpo de prova é proveniente do ponto de máxima tensão desenvolvida no material antes de sua ruptura durante um ensaio de tração. Pode ser expresso em percentual, sendo a deformação em relação às dimensões do corpo de prova inicial.

O alongamento é muitas vezes avaliado em conjunto com a resistência à rigidez, visto que é um indicativo da capacidade do material de se adaptar a um contorno desejado ou de sobreviver a esforços de tração não uniformes. É uma propriedade de particular importância em produtos nos quais as propriedades

tensão-deformação estão sendo modificadas ou controladas, como é o caso de painéis absorventes em usuários.

Em seguimento de papéis especiais, esse índice indica a facilidade do material em se adaptar a formas irregulares e, juntamente com a absorção de energia à tração, indica o desempenho do material em condições de tensão e tensões dinâmicas ou repetitivas, adequando-se bem aos tipos de estresse pelos quais esses produtos passam em relação aos movimentos humanos.²⁹

3.6.3 Absorção de Energia à Tração (TEA)

Absorção de energia à tração, também conhecido como “TEA - *Tensile Energy Absorption*”, é o trabalho realizado em uma amostra sob tensão até sua ruptura, sendo medida pela integral da área sob a curva de resistência à tração num diagrama tensão-deformação.

A absorção de energia à tração é uma medida da capacidade de o material absorver energia (na taxa de deformação do instrumento de teste) e está relacionada com a durabilidade e resistência do material quando submetido a tensões repetitivas, dinâmicas ou a esforço.²⁹

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CELULOSE

Empregou-se a celulose PineFluff™, produzida pela Klabin (Figura 10), proveniente da madeira de *Pinus spp* dentro dos chamados padrões internacionais de especificação, conforme Tabela 1, considerando principalmente o enquadramento das propriedades de espessura (1,15 - 1,35 mm), densidade base seca (0,56 - 0,62 g/cm³) e resistência ao estouro (1050 ± 150 kPa). Buscando também incluir estratégias distintas de fabricantes de produtos absorventes, foram utilizadas amostras de celulose Fluff com umidades de 6,1% e 9,1%, consideradas faixas extremas dos limites de utilização comerciais.

TABELA 1 – Dados de qualidade das bobinas utilizadas no experimento

	Densidade Base Seca	Espessura	Gramatura	Umidade
	g/cm ³	mm	g/m ²	%
Celulose A	0,56	1,28	709,5	6,1
Celulose B	0,56	1,26	710,1	9,1

Fonte: O Autor.

FIGURA 10 – Bobina de celulose Fluff em linha de produção



Fonte: KLABIN, 2019.

4.2 DESFIBRAMENTO EM MOINHO SAWMILL

Tendo em vista que moinhos de laboratório podem não representar fielmente as mesmas condições observadas em processo produtivo, neste trabalho um dos principais focos estava na utilização de moinho com sistema representativo da escala industrial, compreendendo fluxos de alimentação de até 1000 kg/h.

O teste em moinho desfibrador foi realizado em planta piloto do fabricante de máquinas industriais de produtos absorventes *Fameccanica* em *Pescara*, Itália, utilizando sistema “*sawmill*”, que desfibra a folha de celulose através de serras.

A Figura 11 é meramente ilustrativa para o melhor entendimento do circuito de aproximação de um esquema industrial real, onde pode haver a alimentação do moinho por várias bobinas de celulose Fluff concomitantemente, a depender da gramatura dos produtos a serem fabricados.

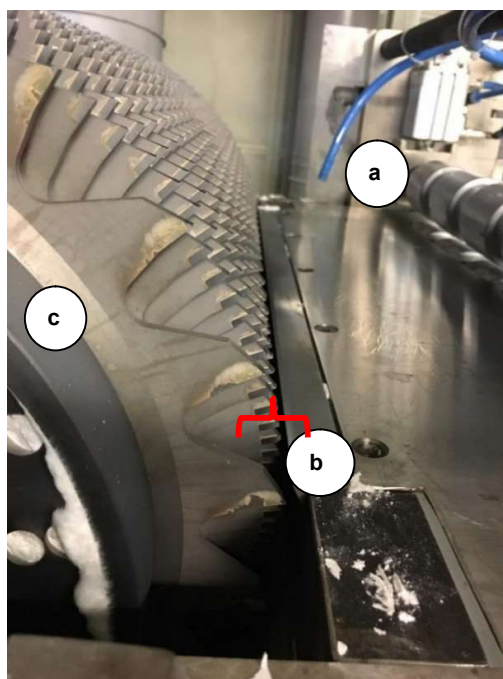
FIGURA 11 – Esquema de alimentação de 4 bobinas de celulose Fluff em um moinho



Fonte: CAMPEN MACHINERY CO.

No moinho os três pontos de ajustes principais e contemplados no experimento foram destacados na Figura 12, sendo os parâmetros possíveis de serem ajustados pela operação em uma linha de desfibramento. O primeiro é o fluxo de alimentação, destacado pelo ponto A da figura, o segundo é o espaçamento entre faca e contra-faca (gap), destacado pelo ponto B, e o terceiro e último é a velocidade do rotor (rpm), no ponto C.

FIGURA 12 – Estrutura interna de um moinho de serras modelo “sawmill”, indicando em a) o rolo guia da alimentação de celulose que controla e direciona o fluxo de alimentação da celulose para dentro do moinho, b) “gap”, distanciamento entre faca (serra móvel) e contra-faca (régua fixa), e c) rotor de serras



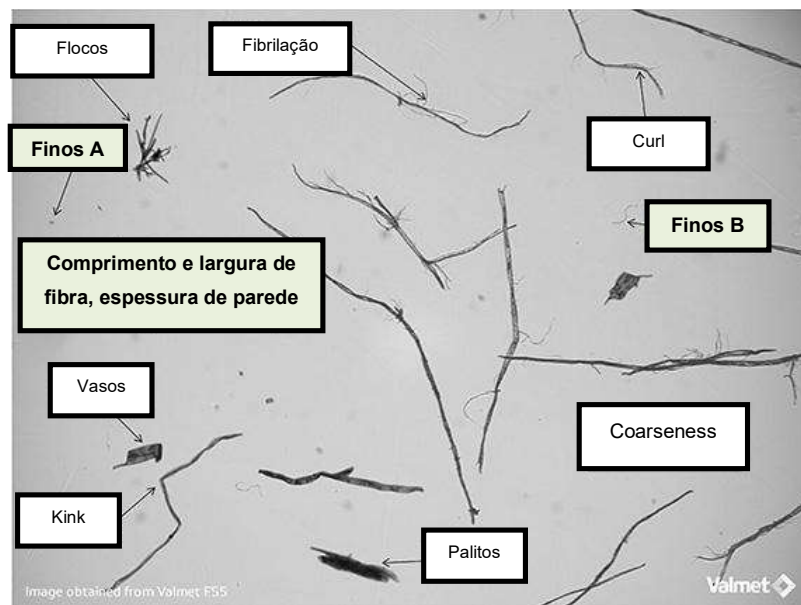
Fonte: O Autor.

4.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA VIA MICROSCOPIA ÓPTICA

As análises morfológicas das celuloses pré e pós-desfibramento foram realizadas através de microscopia óptica com o *Fiber Image Analyser – FS5* do fabricante *Valmet*. Uma câmera de alta definição captura imagens em escala de cinza, a partir das quais o analisador determina várias propriedades das fibras por meio de análise de imagem. O equipamento possui uma rede neural de classificação e modelagem ampla para caracterização de fibras, e as amostras são fotografadas na célula de medição com profundidade de 0,5 mm de campo de acordo com a norma ISO 16065-2 Pulps — “*Determination of fibre length by automated optical analysis — Part 2: Unpolarized light method*”.³¹

A medição do comprimento da fibra é realizada ao longo da linha central da fibra, isso garante que fibras enroladas e dobradas possam ser medidas com precisão. O dispositivo usa os resultados da medição de fibra para calcular a média aritmética ponderada em comprimento, frações e distribuições de comprimento de fibra, largura e curvatura.

FIGURA 13 – Imagem de microscopia óptica e dados fornecidos pelo Fiber Image Analyzer: flocos, vasos, kink, curl ou ângulo de curvatura da fibra, palitos, coarseness e, em destaque, as propriedades contempladas neste estudo de comprimento de fibras, espessura de parede e finos A e B



Fonte: Adaptado de VALMET, 2015.

A partir desta caracterização é possível a utilização da base de dados proveniente da análise microscópica para classificação da celulose através da definição dada pelo aparelho, em que:

- Fibras = Largura > 10 μm e comprimento > 0,2 mm de acordo com a ISO 16065-2;
- Finos A = proporção (%) da área total de fibras, com comprimento < 0,2 mm;
- Finos B = proporção (%) do comprimento total das fibras, com largura < 10 μm e comprimento > 0,2 mm.

FIGURA 14 – Sistema de classificação de fibras e finos via FS5



Fonte: VALMET, 2015.

4.3.1 Preparo de Amostras

Foram realizadas análises em triplicata da celulose proveniente de cada *setup*, pesando para cada uma aproximadamente 0,8 gramas da celulose. Cobriu-se com água as três amostras presentes nos frascos, de onde foram desagregadas manualmente e, após a completa desagregação, avolumou-se para 10 litros de água, sendo essa a suspensão inicial.

Da suspensão inicial retira-se aproximadamente 2,5 litros, pesando em seguida para correta aferição. Com esse volume determinado através da pesagem, filtra-se a solução em papel filtro previamente seco e com peso determinado. O papel filtro é seco em estufa à 105°C por 15 minutos, adicionais de 15 minutos em dessecador.

A filtração é realizada através de bomba de vácuo, sempre lavando as paredes do funil para que toda amostra fique retida no papel filtro. Dobra-se o papel, prosseguindo com a secagem do material em estufa à 105°C por 15 minutos, adicionais de 15 minutos em dessecador seguidos da pesagem da polpa seca e papel filtro.

Com esse procedimento, determina-se a massa seca de celulose presente nos 2,5 litros de polpa e então se determina a consistência da amostra através da equação 3. Esse passo é importante para a correta alimentação de dados e análise via FS5.

$$C = \frac{P_s - P_p}{P_u} \times 1000 \quad (3)$$

Em que:

P_s = Peso seco da amostra + papel filtro

P_p = Peso do papel filtro previamente seco

P_u = Peso úmido da amostra

4.3.2 Microscopia Óptica

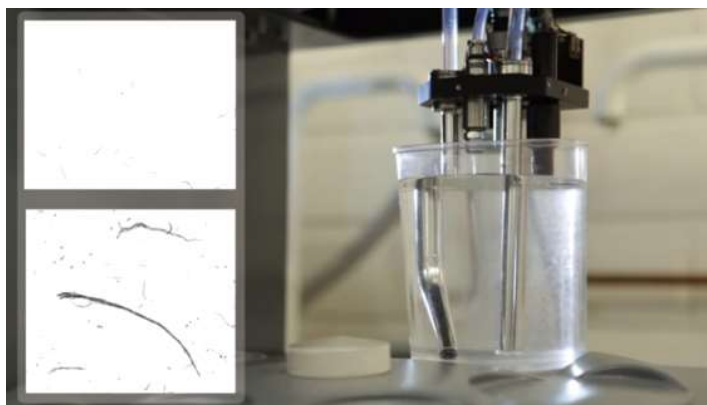
Com a consistência previamente determinada, retira-se 500 ml da solução inicial, calculando a massa seca teórica contida nesses 500 ml, e alimenta-se o

equipamento com a massa seca teórica determinada e volume alimentado de cada frasco.

Seleciona-se o programa de leitura para avaliação de morfologia de fibra longa branqueada, em que, para cada uma das amostras da triplicata, são realizadas duas leituras de microscopia, totalizando para cada celulose 6 resultados obtidos através de 3 triplicatas de consistências, sendo que o *software* do equipamento fornece a média aritmética das medições.

A Figura 15, mostra como é realizada a análise dinâmica do volume alimentado no equipamento, onde, sob agitação constante, ocorre a passagem da polpa pelo capilar, que contém a câmera de medição óptica.

FIGURA 15 – Suspensão fibrosa sendo analisada dinamicamente via microscopia em FS5



Fonte: VALMET, 2019.

4.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA VIA NIT COUNTER

A análise granulométrica é realizada via *Johnson Nit Counter (MTS Equipments)*, de acordo com a Figura 16, que classifica o conteúdo através de peneiras com diferentes aberturas ASTM Mesh (Tabela 2), separando percentualmente em 3 conteúdos distintos: bem desfibrado (%), ou *Good Fluff*, retido na malha de 30"; grumos (%), ou *Nits & Knots*, retido na malha de 16"; e finos (%) que são perdidos através do sistema de exaustão do equipamento.

O *Nit Counter*, equipamento derivado da norma SCAN-CM 37:85 "*Fluff: Knot Content*", é considerado um dos melhores métodos para simular e correlacionar aos potenciais impactos no processo produtivo, visto que utiliza fluxo de ar, diferentes

malhas para a retenção do material desfibrado e sistema de exaustão, similar ao processo industrial de desfibramento.

FIGURA 16 – Equipamento *Johnson Nit Counter* da *Marketing Technology Service*



Fonte: Adaptado de MTS, 2015.

TABELA 2 – Dados das peneiras granulométricas do equipamento

Mesh Tyler	Área aberta (mm)
16	1,19
30	0,59

Fonte: SIGMA ALDRICH, 2019.

4.4.1 Preparo de Amostras

A celulose Fluff previamente desfibrada pela empresa *Fameccanica* com os diferentes parâmetros de moinho foi retirada das embalagens e acondicionada em sala climatizada com umidade relativa de $50\% \pm 2$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ de acordo com a norma ISO 187:1990.

Conforme procedimento interno adaptado de SCAN-CM 37:85, pesou-se 8 gramas da celulose desfibrada em balança analítica *Mettler Toledo* modelo MS304S, alimentando o equipamento e prosseguindo com a análise com tempo de retenção de 10 minutos. O ajuste de ar comprimido do equipamento foi previamente configurado para 60 psi de pressão.

Os conteúdos podem ser calculados percentualmente através das equações 4 - 7.

$$P1 = P2 + P3 + P4 \quad (4)$$

Em que:

P1 é o peso do conteúdo total da celulose Fluff desfibrada, padrão de 8 gramas;

P2 é o peso do conteúdo de grumos ou *Nits & Knots*;

P3 é o peso do conteúdo bem desfibrado ou *Good Fluff*;

P4 é o peso de conteúdo de Finos.

$$\% \text{ Bem Desfibrado ou "Good Fluff"} = \frac{P3}{P1} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ Mal desfibrado ou "Nits & Knots"} = \frac{P2}{P1} \times 100 \quad (6)$$

$$\% \text{ Finos} = \frac{(8 - P3 - P2)}{P1} \times 100 \quad (7)$$

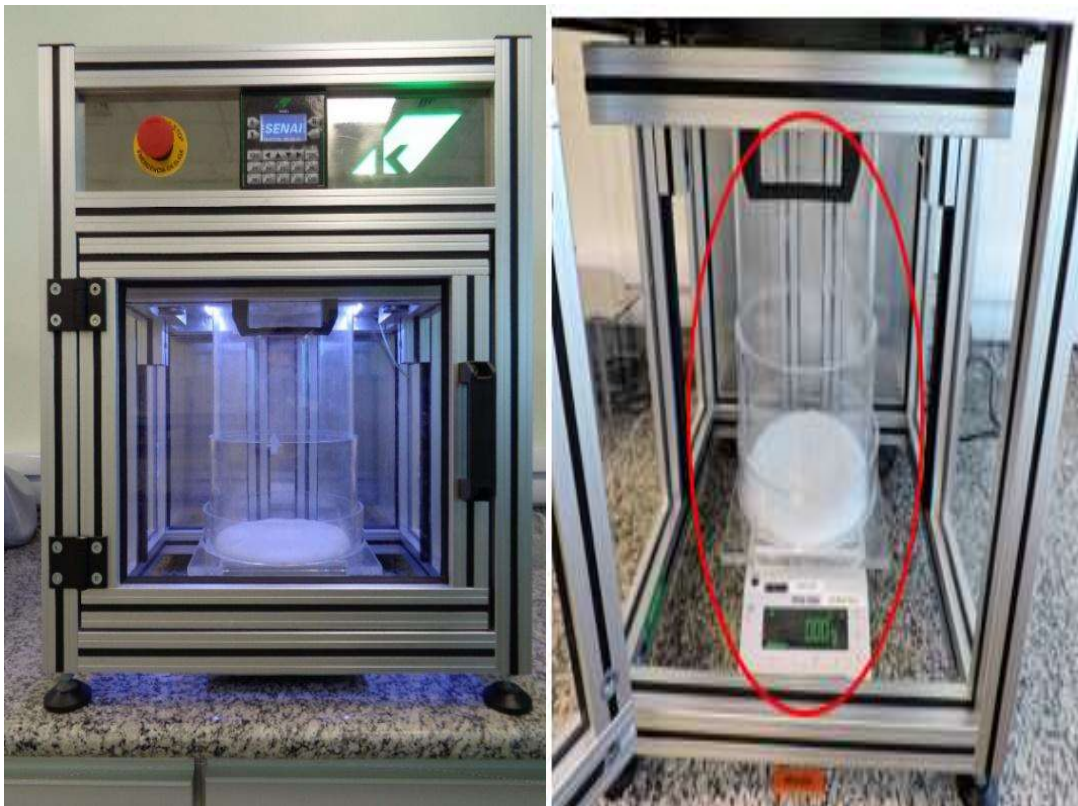
4.5 ANÁLISES FÍSICO-MECÂNICAS VIA MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL

4.5.1 Formação de Corpo de Prova

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram formados através de formador de painéis do Centro de Tecnologia Klabin, que pode ser visualizado na Figura 17. Nesse equipamento ocorre a alimentação do conteúdo desfibrado em um copo localizado na parte superior, que, através de revoluções entre parafusos, quebra os flocos de Fluff mecanicamente e força sua passagem por uma peneira perfurada, distribuindo uniformemente 22 gramas de celulose pelos 20 cm de diâmetro do formador de painel. O peso do painel é medido *on-line* através de balança analítica *Mettler Toledo* modelo MS4002S, condicionando a parada do equipamento ao atingir o *setpoint* de 22 gramas.

O painel de celulose formado é então densificado através de prensa PTI Áustria equipada com extensor à uma pressão de 2 Bar por 5 minutos, conforme Figura 18.

FIGURA 17 – Formador de painéis de celulose Fluff desfibrada e balança analítica para controle de peso automático



Fonte: O Autor.

Através da equação 8 aplicada em papéis, e relacionando-a a painéis absorventes, nota-se a importância da densificação e seu impacto em propriedades mecânicas.³⁵ Sendo assim, o protocolo considerou o mesmo protocolo minucioso de densificação na produção de corpos de prova utilizando o sistema da Figura 18.

$$\sigma_p = \frac{1}{3} k \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^n \sigma_f \quad (8)$$

Em que:

σ_p é a resistência a tração do papel/painel;

σ_f é a resistência a tração da fibra;

ρ_p é a densidade do papel/painel;

ρ_f é a densidade da fibra;

k e n constantes.

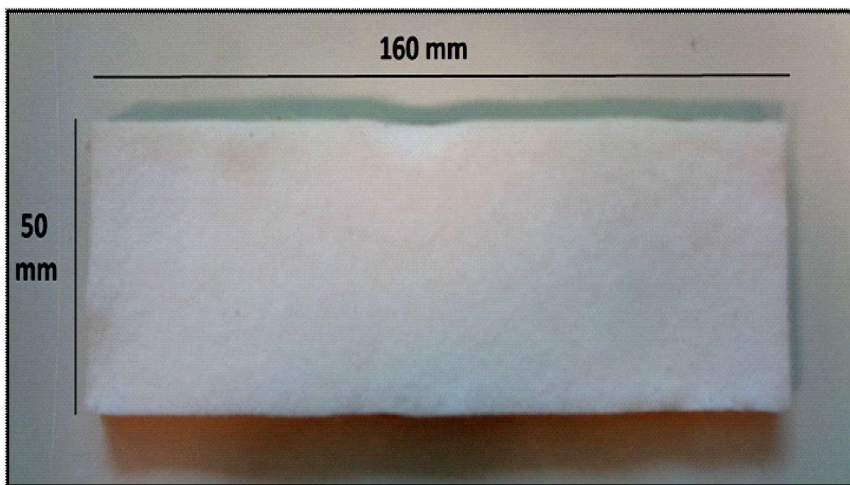
FIGURA 18 – Prensa e extensor para densificação dos painéis



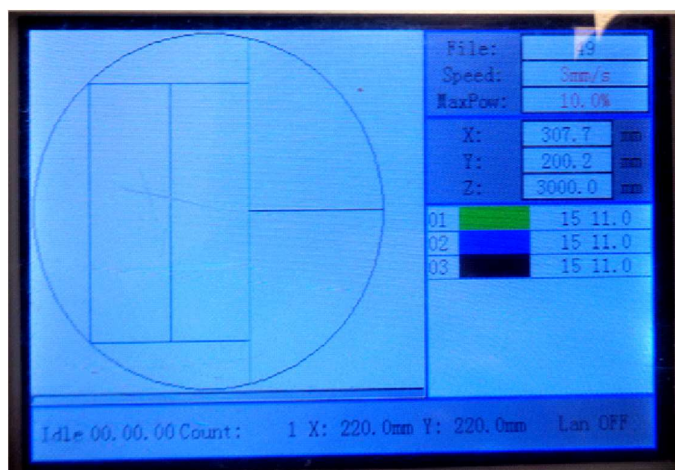
Fonte: O Autor.

Posterior à etapa de densificação, são confeccionados 2 corpos de prova de dimensão 160 mm (comprimento) x 50 mm (largura), conforme Figura 19, em que o corte é realizado via laser (Figura 20), para que não ocorra a densificação das bordas do material, que pode afetar as medições em ensaios de tração.

FIGURA 19 – Corpo de prova cortado a laser nas dimensões (160 X 50 mm)



Fonte: O Autor.

FIGURA 20 – Modelo do corte no *software* do equipamento

Fonte: O Autor.

Os corpos de prova são climatizados em laboratório por 24 horas à umidade relativa de $50\% \pm 2$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ conforme ISO 187. Para o condicionamento, foram utilizadas estantes para alocar o material, no qual, através das aberturas, ocorre a livre circulação do ar ambiente.

Visando preparar o corpo de prova para as garras do dinamômetro através de ponto de apoio e evitar a ruptura neste ponto, as bordas do material foram densificadas em prensa PTI Áustria à uma pressão de 5 Bar, porém agora utilizando extensor metálico de 1,85 kg por 5 minutos.

FIGURA 21 – Procedimento de densificação das bordas do corpo de prova utilizando extensor



Fonte: O Autor.

Os corpos de prova foram então pesados em balança analítica Mettler Toledo modelo MS304S, etapa seguida pela última densificação/uniformização do corpo de prova, que agora homogeneiza a densidade de toda a extensão do material (Figura 22), utilizando somente a sobreposição dos 2 extensores,

totalizando 3,7 kg por 2 minutos. Essa etapa busca a adequação da espessura do material, visto a sua resiliência e relaxação das fibras, que ocorre entre um passo e outro quando manipulados os corpos de prova.

FIGURA 22 – Densificação final do corpo de prova via extensores



Fonte: O Autor.

Retirados os extensores, imediatamente se direciona os corpos de prova para a medição de espessura através de micrômetro a laser indicado na Figura 23, retirando a medição após 2 minutos e 30 segundos. Após essa etapa, os corpos de prova são direcionados para a análise em máquina de ensaios universal.

FIGURA 23 – Micrômetro a laser para medição e controle de espessura em corpos de prova

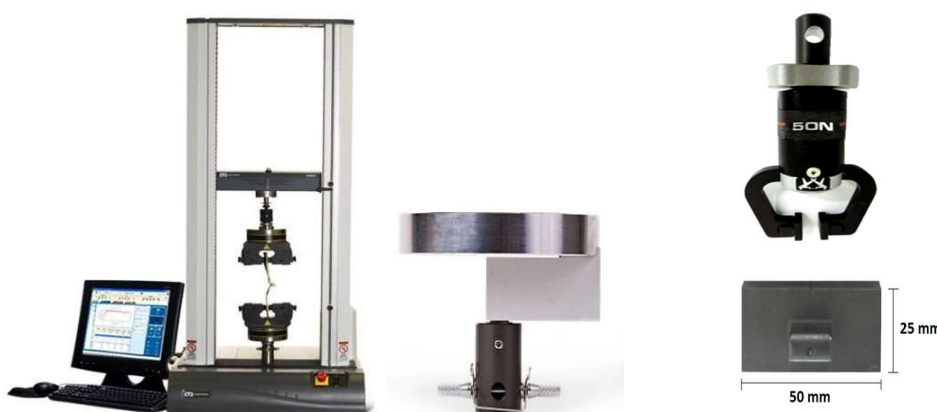


Fonte: O Autor.

4.5.2 Ensaio de Resistência à Tração

Os testes de tração, a fim de avaliar o comportamento mecânico do painel de Fluff, foram realizados conforme procedimento interno através do equipamento universal de ensaios da marca *Instron* modelo 3360, equipado com célula de carga de 5 N e garras para suporte de até 50N, localizado no Centro de Tecnologia da Klabin S.A. e destacados pela Figura 24.

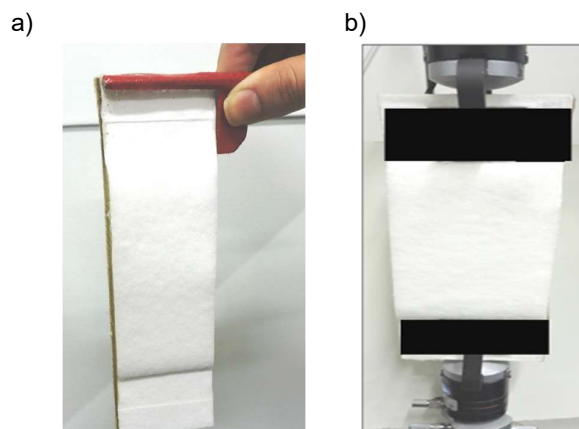
FIGURA 24 – Sistema universal de ensaios da marca Instron modelo 3360, célula de carga de 5N, garra com suporte para até 50N e de dimensões de 50mm X 25 mm



Fonte: Adaptado de INSTRON, 2019.

Os corpos de prova previamente formados de acordo com o item 4.5.1 são cuidadosamente posicionados (Figura 25) nas garras de superfície plana e aderente.

FIGURA 25 – Posicionamento do corpo de prova em garras do equipamento Instron, a) manipulação do corpo de prova e b) posicionamento do corpo de prova nas garras



Fonte: O Autor.

Durante os testes de tração, as amostras foram submetidas a taxas de alongação de 10 mm/min. Os valores de força e deslocamento foram coletados durante o teste a cada 1 ms. A programação dos parâmetros de teste e coleta de dados da curva de tensão x deformação foram realizados através do *software* do equipamento *Bluehill 3* versão 3.82.

4.6 DESIGN DO EXPERIMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O planejamento experimental fatorial de acordo com a Tabela 3 foi reproduzido pela *Fameccanica*. As celuloses foram desfibradas de acordo com as diferentes configurações de parâmetros e os conteúdos desfibrados coletados e retornados ao Brasil para continuação das análises no Centro de Tecnologia da Klabin em Telêmaco Borba.

TABELA 3 – Planejamento experimental fatorial dos *setups* do moinho contemplando os diferentes parâmetros testados

Umidade	Fluxo de Alimentação (kg/h)	RPM Rotor	GAP (mm)
Celulose A – 6,1%	500	4800	0,8
	750	5200	1,0
	1000	5600	1,2
Celulose B – 9,1%	500	4800	0,8
	750	5200	1,0
	1000	5600	1,2

Fonte: O Autor.

O design de experimento fatorial foi utilizado para identificar a influência de cada parâmetro do moinho, assim como a interação entre eles nas análises de morfologia, granulometria e resistências mecânicas. As condições de processamento avaliadas foram: fluxo de alimentação (kg/h), espaçamento entre faca e contra-faca (GAP) e velocidade de rotor (rpm). Os três parâmetros de ajuste do moinho resultaram em um total de 54 tratamentos ou *setups*, cada um correspondendo a uma combinação única de parâmetros, descritas no Anexo A – Tabela 5.

O *software* Minitab v. 2018 foi empregado para a análise estatística e de interação entre as variáveis dos dados experimentais através de *boxplot* utilizando agrupamento por variável, com um coeficiente de significância estatística de 95%. Com essa análise, pode-se facilmente reconhecer a tendência central e variabilidade de distribuições, amplitude interquartil, amplitude e mediana dos resultados obtidos.⁴⁷ Para visualização de tendências na análise de *boxplot*, os resultados foram estatisticamente agrupados por parâmetro, contemplando os 54 tratamentos e seus resultados médios expressos. A análise das médias para determinação de suas diferenças ou igualdades foram baseadas em análise de variância (ANOVA) através de teste de *Tukey*.

Empregou-se o *software* Origin v. 2018 para análise de correlações através do coeficiente de *Pearson*, também conhecido como R, em que a estatística de teste mede a relação ou associação estatística entre duas variáveis contínuas. É conhecido como o melhor método para medir a associação entre variáveis de interesse, porque é baseado no método de covariância. O método fornece informações sobre a intensidade ou magnitude da associação, ou correlação, bem como a sua direção.

Para o coeficiente de correlação de *Pearson*, valores entre $\pm 0,50$ e ± 1 são considerados de forte correlação, valores entre $\pm 0,30$ e $\pm 0,49$ são considerados de correlação média, valores abaixo de $\pm 0,29$ são considerados de baixa correlação e sem correlação quando o coeficiente é zero.³⁸ As correlações nulas ou baixas não serão consideradas para a discussão dos resultados deste trabalho.

As tabelas estatísticas que embasaram os resultados, as discussões e as conclusões quanto a médias e correlações estão descritas nos Anexos B, C, D, E.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE MORFOLÓGICA

Através da análise morfológica das celuloses Fluff, espera-se que os resultados contribuam com as análises posteriores de granulometria e de resistências mecânicas nos painéis absorventes.

5.1.1 Análise Morfológica Pré-Desfibramento

As celuloses empregadas para o experimento foram morfológicamente avaliadas previamente ao desfibramento e apresentaram resultados semelhantes, compreendendo resultados de comprimento de fibra ponderado em comprimento e em peso, espessura de parede, área transversal da parede, finos A, finos B e total de finos conforme Tabela 4.

TABELA 4 – Resultados de morfologia das celuloses A e B previamente ao desfibramento

Propriedade	Celulose A	Celulose B
Umidade (%)	6,1%	9,1%
Comprimento de fibra - Lc(l) ISO (mm)	2,060	2,083
Comprimento de fibra - Lc(w) ISO (mm)	2,697	2,723
Largura da fibra (μm)	26,37	26,18
Espessura da parede da fibra (μm)	11,49	10,67
Área transversal da parede da fibra CSA (μm^2)	538	519
Finos A (%)	12,32	12,56
Finos B (%)	0,67	0,64
Finos total A+B (%)	12,99	13,20

Fonte: O Autor.

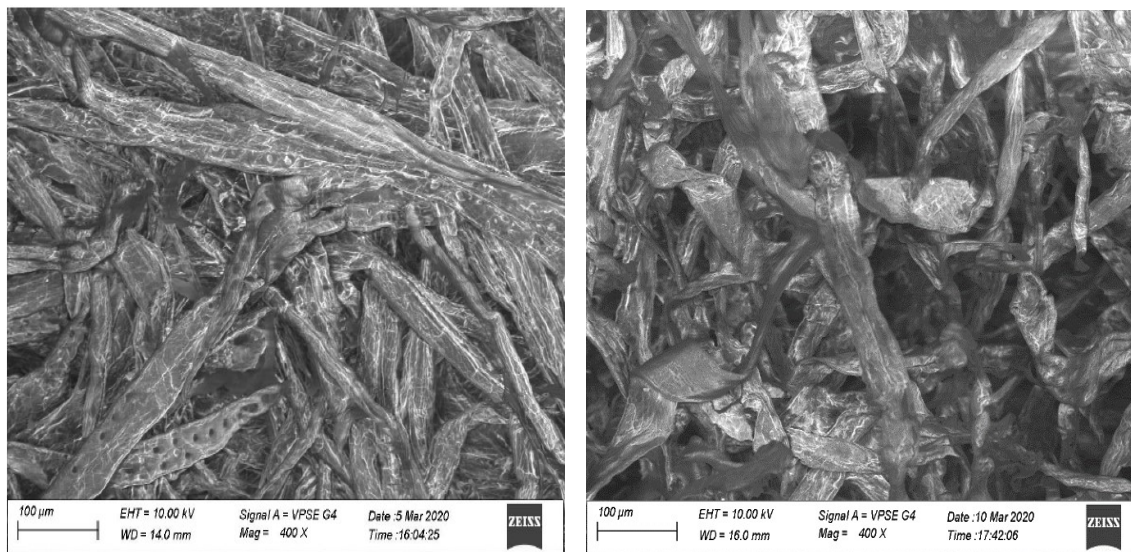
As Figuras 26 e 27 mostram o aspecto da celulose Fluff pré e pós-desfibramento através de foto e MEV. Nelas, é possível visualizar a diferente organização e distribuição das fibras antes (celulose em folha) e após o processo de desfibramento, assim como é possível verificar as distintas densidades e aspectos morfológicos das fibras.

FIGURA 26 – Aspecto da celulose Fluff pré e pós-desfibramento
 a) pré-desfibramento b) pós-desfibramento



Fonte: Klabin, 2020.

FIGURA 27 – Aspecto da celulose Fluff via MEV pré e pós-desfibramento



a) pré-desfibramento

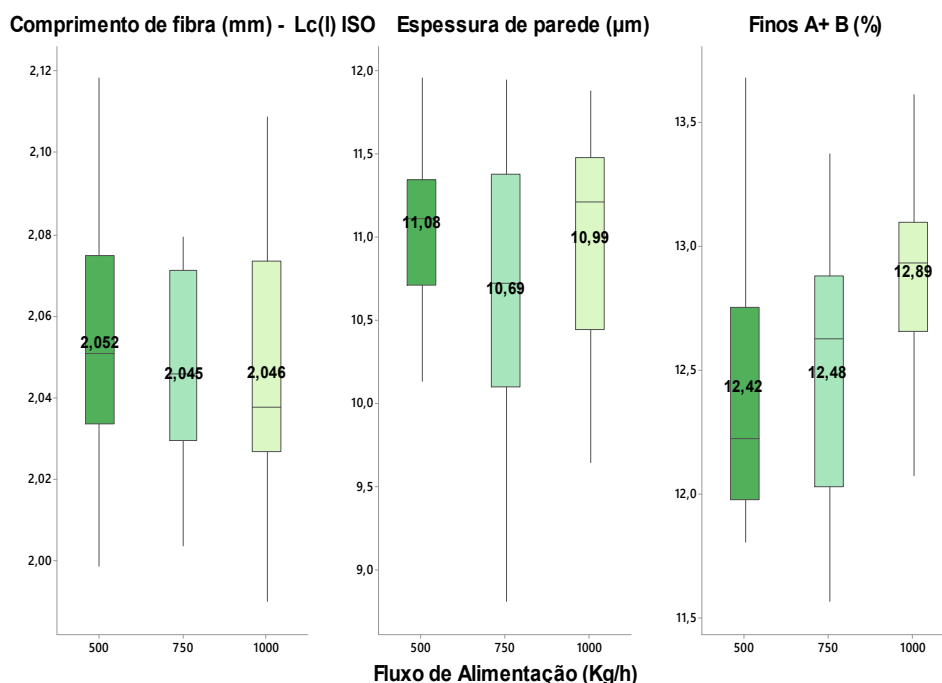
b) pós-desfibramento

Fonte: O Autor.

5.1.2 Análise Morfológica por Fluxo de Alimentação

Através da Figura 28, pode-se verificar que os resultados de morfologia para comprimento e espessura de fibra demonstraram não ter sido impactados pelos diferentes fluxos de alimentação, nos quais, através do método de *Tukey* (Anexo B – Tabela 8), não foi verificada variação entre médias e nem correlação com o parâmetro de processo através do método de *Pearson* (Anexo B – Tabela 9).

FIGURA 28 – Análises morfológicas das celuloses Fluff processadas em diferentes condições de fluxo de alimentação (kg/h)



Fonte: O Autor.

Já o conteúdo de finos total apresentou correlação média e positiva de 0,34 com o aumento do fluxo de alimentação do sistema, indicando que o aumento no volume de celulose alimentado no sistema acaba por aumentar o conteúdo de finos gerado no material, em especial o finos A. O fato de apenas o conteúdo de finos A ter apresentado correlação (0,33), indica que o fluxo de alimentação favoreceu em maior proporção a ação de corte das fibras característico deste material e que não impactou na sua fibrilação.

Levando em conta que o aumento de finos do sistema obrigatoriamente seja proveniente do corte, fibrilação e laminação das fibras dentro do sistema mecânico do moinho, as reduções em comprimento de fibra e espessura de parede deveriam ter apresentado tendências semelhantes, o que, neste experimento, não ocorreu para as diferentes taxas de alimentação.

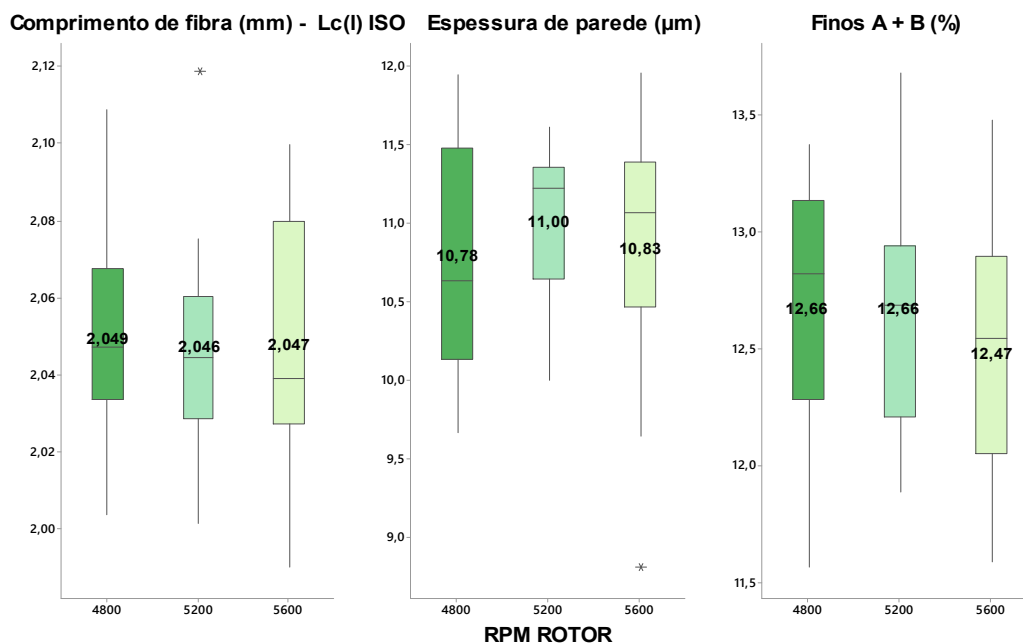
Uma consideração relevante para as análises morfológicas está em torno da complexa amostragem para celuloses Fluff desfibradas e sua representatividade, já que o material se encontra no formato “fofo” e de difícil homogeneidade conforme destacado pela Figura 27, o que não acontece para a celulose pré-desfibramento

que ocorre idealmente em condições normatizadas considerando a folha de celulose e a homogeneidade do material. Outra consideração está no elevado dano físico que o processo de desfibramento confere às fibras como fibrilação e torção, podendo interferir na acuracidade óptica do método (tópico 3.4) quando aplicado em celuloses Fluff desfibradas.

5.1.3 Análise Morfológica por RPM do Rotor

Para diferentes rotações do rotor do moinho, os resultados obtidos foram divergentes do comportamento esperado, que considerava que o maior número de ações mecânicas de atrito e fricção devido às maiores velocidades ocasionariam uma maior incidência de cortes na fibra, comportamento que microscopicamente não foi visualizado de acordo com a figura abaixo.

FIGURA 29 – Análises morfológicas das celuloses Fluff processadas em diferentes condições de rotação do rotor (rpm)



Fonte: O Autor.

Em trabalhos anteriores, quando utilizado moinho laboratorial de martelos “*hammermill*” no desfibramento de celulose CTMP, foi obtida redução de 23% no

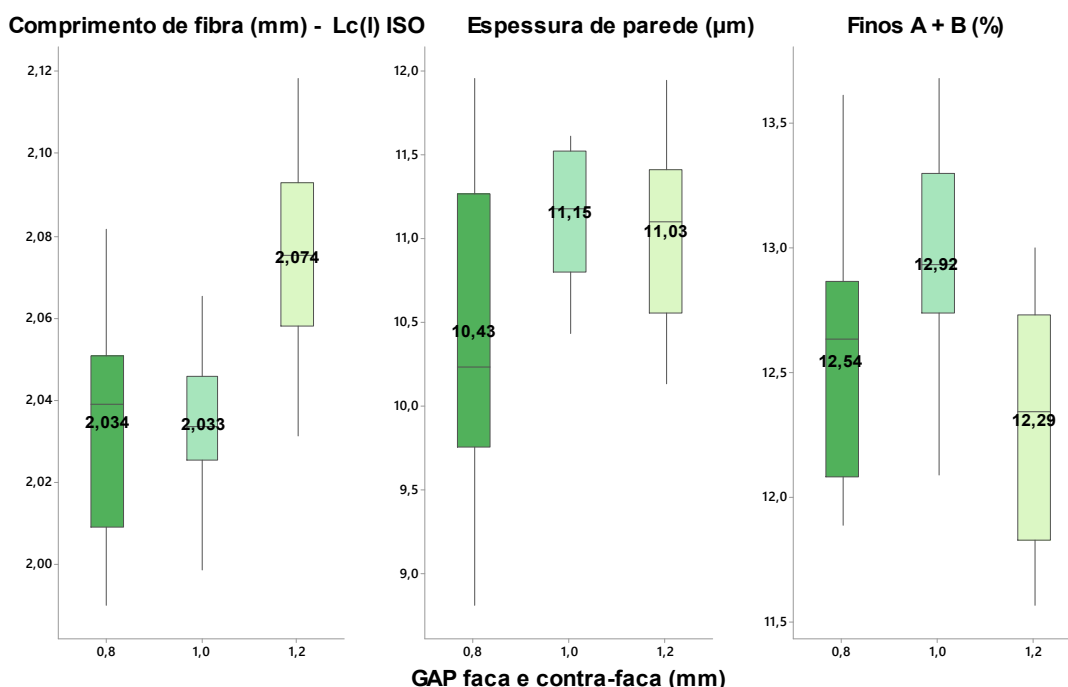
comprimento de fibra, utilizando 4500 revoluções por minuto quando comparado aos comprimentos obtidos com 500 rpm.⁶

Os resultados médios de comprimento, espessura de parede e conteúdo de finos estatisticamente não demonstraram ter sido impactados pelas diferentes rotações de rotor de desfibramento e não apresentaram correlações de *Pearson* relevantes para rpm. Uma das possíveis razões em não se ter obtido o mesmo comportamento pode ser devido as altas rotações industriais envolvidas no experimento, além da utilização de equipamento de porte industrial, servindo de indicativo de que, a partir de 4800 rotações por minuto, o impacto nessas propriedades morfológicas já não é intensificado e, portanto, não pode ser atribuído a esse parâmetro em situações industriais.

5.1.4 Análise Morfológica por GAP entre Faca e Contra-Faca

O espaçamento entre faca e contra-faca do moinho foi o parâmetro de maior impacto em correlações de *Pearson* e com tendências mais evidentes em *boxplot* para as propriedades morfológicas das fibras evidenciados pela Figura 30.

FIGURA 30 – Análises morfológicas das celuloses Fluff processadas em diferentes condições de espaçamento entre faca e contra-faca (gap)



Fonte: O Autor.

Correlação forte e positiva de 0,55 foi obtida entre gap e comprimento de fibra, em que, quanto maior o espaçamento utilizado, maior será o comprimento, relacionando-se com a manutenção da integridade do conteúdo fibroso quando utilizados espaçamentos mais largos. Para gaps mais estreitos e intermediários de 0,8 a 1,0 mm, os resultados foram similares entre eles para comprimento, o que indica que a manutenção do comprimento de fibra só pode ser constatada em espaçamentos relativamente elevados e a partir de 1,0 mm.

A espessura de parede apresentou correlação média e positiva de 0,34 com o gap e demonstrou ter sido mais impactada através da sua redução quando utilizado o menor espaçamento, de 0,8 mm. Espaçamentos estreitos nessa faixa favoreceram uma possível laminação da parede das fibras. Atrelada à espessura de parede e corroborando com o possível efeito de laminação está a forte correlação positiva encontrada de 0,58 para a área da seção transversal da fibra, onde, quanto mais estreito o gap, menor são os valores de CSA da fibra.

Apesar de o conteúdo de finos total não ter demonstrado tendência linear evidente na análise de *boxplot* e em teste de médias, o coeficiente médio e positivo de 0,33 encontrado para os finos B evidencia que essa fração de finos caracterizada pela fibrilação e laminação é mais evidente quando se utiliza maiores espaçamentos. Estes maiores espaçamentos, por consequência, reduzem os finos A (-0,22), o que contribui para a manutenção do comprimento.

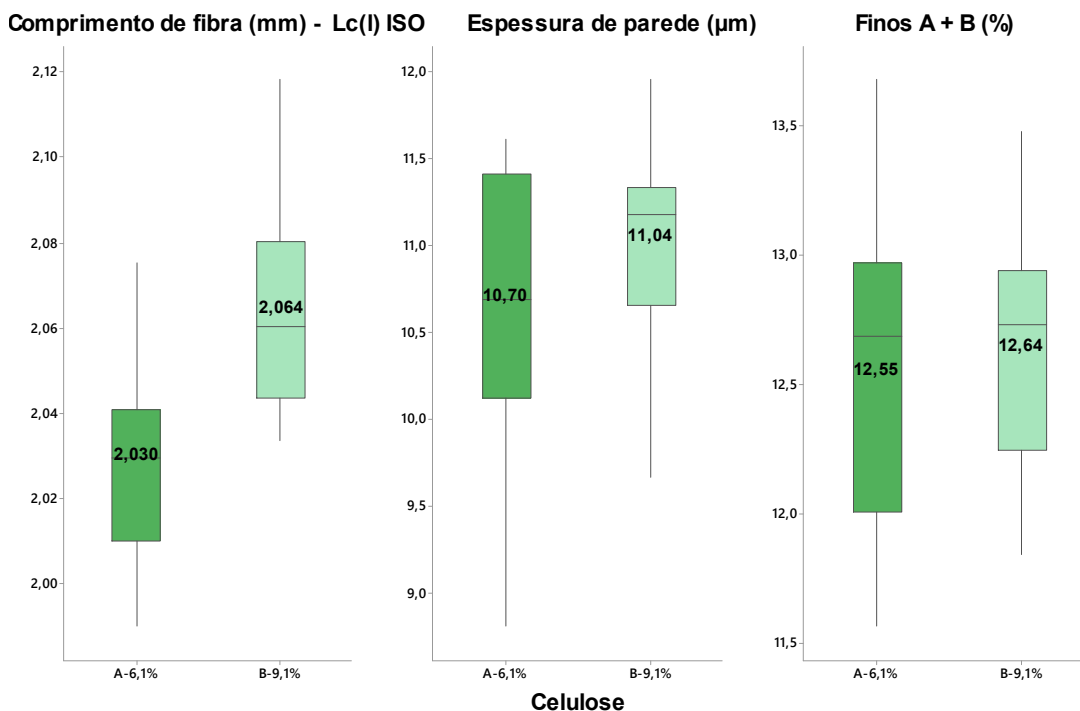
5.1.5 Análise Morfológica por Umidade de Celulose

As celuloses empregadas no experimental do trabalho, quando avaliadas através da correlação de *Pearson*, também foram parâmetros de alta significância para os resultados de morfologia. Embora as celuloses prévias ao desfibramento apresentem as mesmas características físicas de densidade seca de folha, espessura e gramatura conforme Tabela 1, elas variaram em umidade e houve uma pequena diferença morfológica relacionada ao comprimento de fibra evidenciada pela Tabela 4, sendo que em avaliações produtivas a variação ocorrida na segunda casa decimal não seria considerada relevante.

Quando os resultados foram agrupados por tipo de celulose, como pode ser visto na Figura 31, o comprimento de fibra ponderado em comprimento mostrou ter sido superior após processamento, porém foi influenciado pela morfologia pré-

desfibramento, que, para a celulose B, já apresentava um valor inicial superior de 2,083 mm *versus* 2,060 mm, apresentado pela celulose A.

FIGURA 31 – Análises morfológicas das celulosas Fluff agrupadas por celulose A e B posterior ao desfibramento



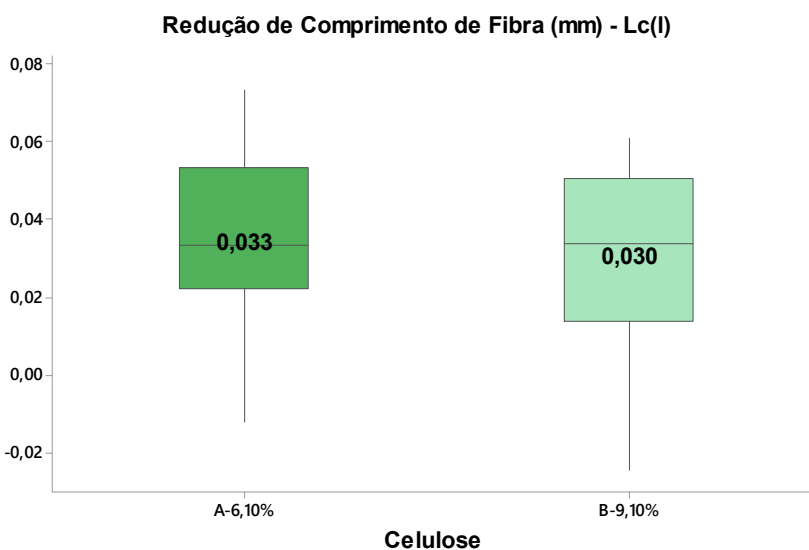
Fonte: O Autor.

Relacionando a propriedade de umidade da celulose, o comprimento de fibra quando ponderado em peso elevou o coeficiente de 0,58 para 0,81, tornando-o ainda mais forte e relevante, sendo influenciado pela maior umidade intrínseca da celulose, que faz com que a fibra possua um maior peso.

O conteúdo de finos “total” não foi afetado pela umidade da celulose utilizada, porém, através das tabelas de correlação de *Pearson*, foi verificado que o conteúdo de finos B apresentou forte correlação positiva de 0,87 com a celulose B, que possui umidade de 9,1% e apresenta um comprimento de fibra levemente superior previamente ao desfibramento. O fato de o conteúdo “total” de finos não ter sido afetado não significa que os conteúdos parciais de finos A e B não variam, e, portanto, devem ser considerados já que podem atribuir características diferenciadas ao conteúdo desfibrado.

A fim de comprovar se essa correlação com finos B se deve à umidade, que pode aumentar a fibrilação do material, ou ainda à maior incidência ao corte, sofrida por fibras de maiores dimensões e de menor umidades, foi avaliada a redução média do comprimento das fibras comparando o pré e o pós-desfibramento, demonstradas na Figura 32. Para as celuloses A e B, as fibras apresentaram redução média similar em milímetros, e, por isso, atrela-se a maior incidência de finos B à celulose de maior umidade; e que em alguns estudos facilitou a fibrilação.⁴⁰

FIGURA 32 – Avaliação da redução do comprimento de fibra da celulose A e B pós-desfibramento quando comparado à morfologia previamente ao processo



Fonte: O Autor.

Quanto à espessura de fibra quando comparada ao conteúdo pré-desfibramento, foi mantida quando utilizada a maior umidade da celulose B e reduzida em 6,8% quando utilizada a de menores. Nota-se que a espessura de parede pré-desfibramento encontrada na celulose de 9,1% de umidade é inferior à média encontrada no pós-desfibramento, demonstrando que o método de análise pode não ter sido efetivo para caracterização deste parâmetro.

5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica da celulose Fluff é frequentemente utilizada como um método para classificar o processo de desfibramento quanto à sua uniformidade e sua eficiência. O equipamento Nit Counter simula com maior fidelidade o processo

de fabricação de produtos absorventes que conta com o insuflamento de ar, formação de vórtice e revoluções da celulose Fluff desfibrada com o sistema de malhas para a formação do painel.

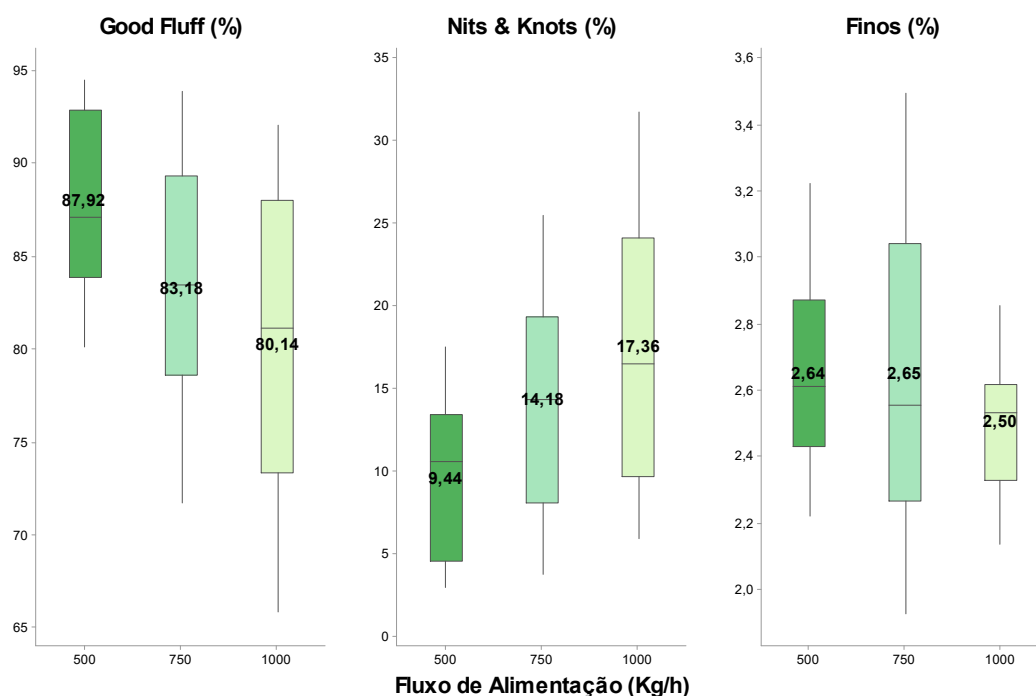
5.2.1 Análise Granulométrica por Fluxo de Alimentação

Ao avaliar a classificação granulométrica obtida com processamentos em diferentes fluxos de alimentação, foi possível verificar ganhos de até 8% em conteúdo de *Good Fluff* e quando utilizado o menor fluxo de 500 kg/h, consequência da redução do conteúdo de *Nits & Knots* na mesma magnitude.

A maior efetividade, com relação ao aumento do conteúdo bem desfibrado quando utilizados menores fluxos de alimentação e coeficiente de -0,41, está relacionada à menor massa de celulose entrando no sistema para um mesmo número de ações mecânicas de desfibramento e mesmo tempo de retenção dentro do moinho.

O conteúdo de finos granulométrico não mostrou ter sido impactado com as variações de fluxo de alimentação.

FIGURA 33 – Análise granulométrica das celuloses Fluff processadas em diferentes fluxos de alimentação (kg/h)



Fonte: O Autor.

Levando em conta a realidade dos fabricantes e velocidades de máquina em escala de produção, nem sempre a redução dos fluxos de alimentação visando à uniformidade de desfibramento é possível, já que muitas vezes é necessário um montante de celulose Fluff específico disponível para manter a gramatura e estabilidade nos painéis dos produtos. As gramaturas envolvidas nos painéis variam de acordo com o tipo de produto a ser fabricado e a tecnologia de máquina. Protetores diários, por exemplo, possuem gramaturas baixas, requerendo menos celulose no painel, já fraldas geriátricas utilizam maiores percentuais.

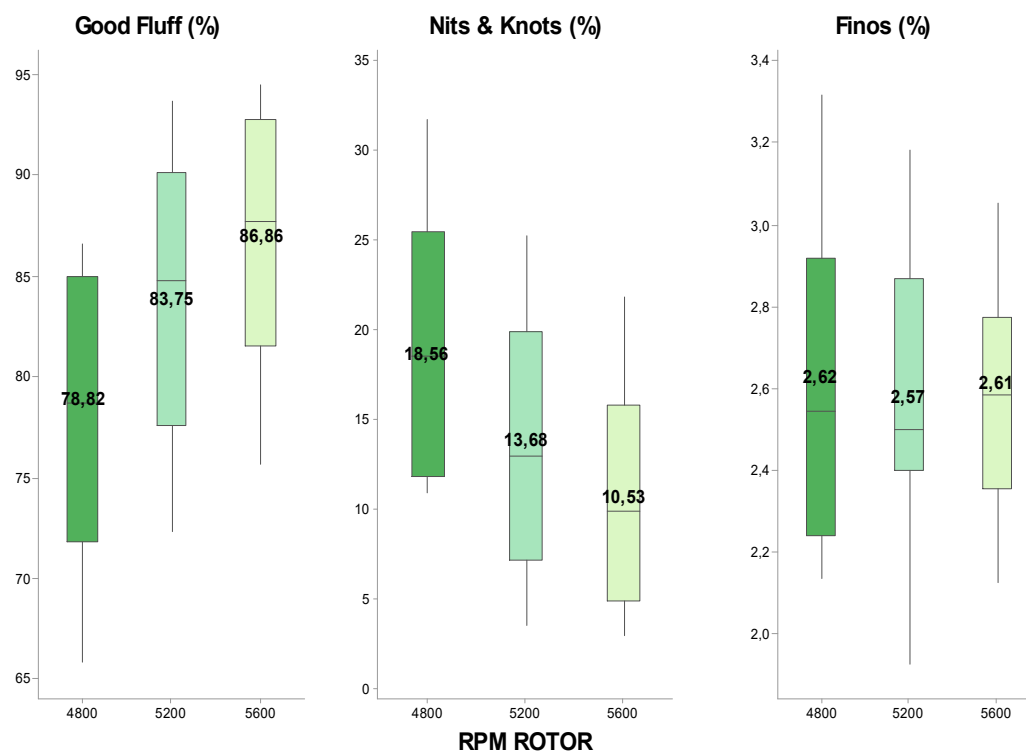
5.2.2 Análise Granulométrica por RPM de Rotor

Maiores velocidades de rotor contribuem com um maior número de contatos físicos e mecânicos entre os componentes do moinho e a celulose. Conforme os resultados expressos na Figura 34, para 5600 revoluções por minuto, foi possível obter maior uniformidade de desfibramento através do aumento aproximado de 8% em *Good Fluff* comparativamente à menor rotação de 4800 rpm. Essa maior proporção obtida e atrelada à redução no conteúdo de *Nits & Knots* do material apresenta correlações médias de *Pearson* na mesma proporção de $\pm 0,43$ conforme a Tabela 13 do Anexo C.

O conteúdo de finos granulométrico não mostrou ter sido impactado pelas diferentes rotações. Este comportamento também foi obtido na análise morfológica para o mesmo parâmetro descrita no tópico 5.1.3. Diferentemente do que se esperava, o maior número de rotações não afetou a geração de finos. Em trabalhos anteriores com desfibramento laboratorial utilizando moinho de martelos e rotações de 500 a 4500 rpm através de análise granulométrica convencional, obtiveram comportamento diferente do encontrado neste experimento, em que as maiores rotações proporcionaram incrementos de até 31% em finos granulométricos.⁶

Mostrando ser uma alternativa para melhorar a uniformidade do desfibramento da celulose sem afetar a geração de finos em processo, o aumento de rotações do rotor tem impacto direto no consumo de energia do maquinário, o que muitas vezes é um parâmetro otimizado pelo fabricante na linha de produção e que deve ser levado em consideração quanto a gargalos e custos produtivos.

FIGURA 34 – Análise granulométrica das celuloses Fluff processadas em diferentes rotações de rotor (rpm)



Fonte: O Autor.

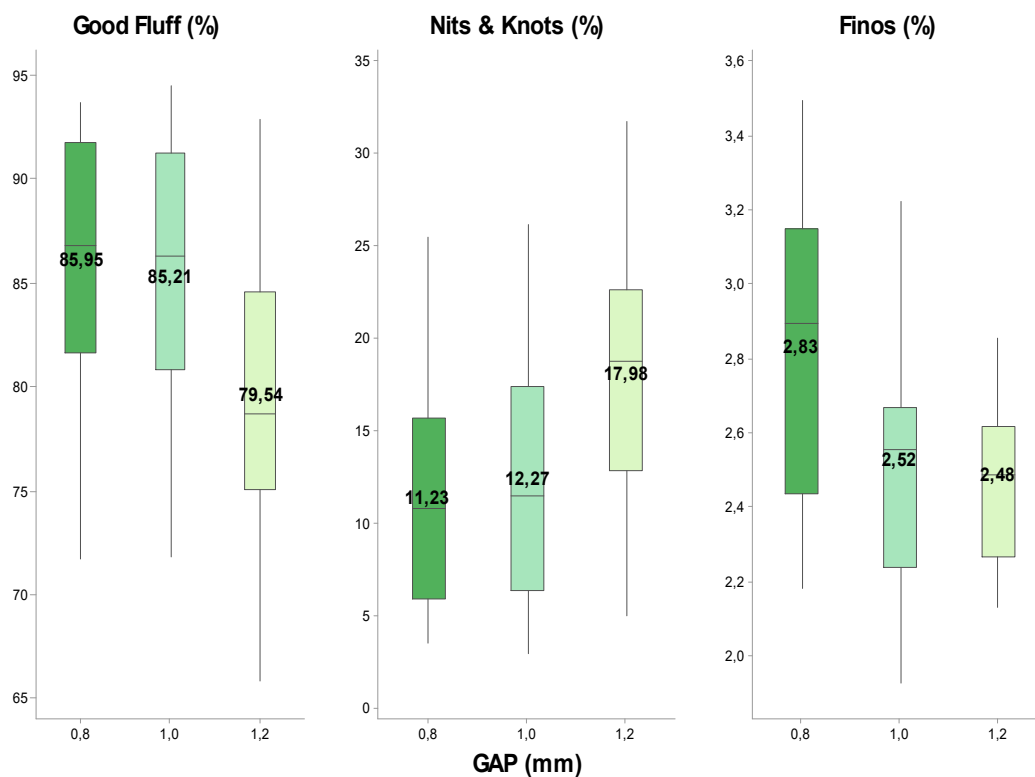
5.2.3 Análise Granulométrica por GAP entre Faca e Contra-faca

A Figura 35 mostra algumas relações interessantes para o parâmetro de maior controvérsia do mundo operacional devido à resistência da operação em realizar ajustes em parâmetros de máquina.

Ao avaliar diferentes espaçamentos conclui-se, através da análise de boxplot e coeficientes de *Pearson*, que os gaps mais estreitos de 0,8 e de 1,0 mm apresentaram a melhor uniformidade de desfibramento, justificada pela maior proporção de *Good Fluff* e menor conteúdo de *Nits & Knots*, porém, para o gap de 0,8, também foi obtido o maior conteúdo de finos de 2,83%. Com este cenário, recomenda-se utilização de gap intermediário de 1,0 mm, podendo unir a maior uniformidade e menor geração de finos.

O espaçamento de 1,2 mm reduziu o conteúdo de *Good Fluff* em 6,4% com impacto de mesma proporção em *Nits & Knots*, junto ao menor conteúdo de finos de 2,48%.

FIGURA 35 – Análise granulométrica das celuloses Fluff processadas em diferentes espaçamentos entre face e contra-face (gap)



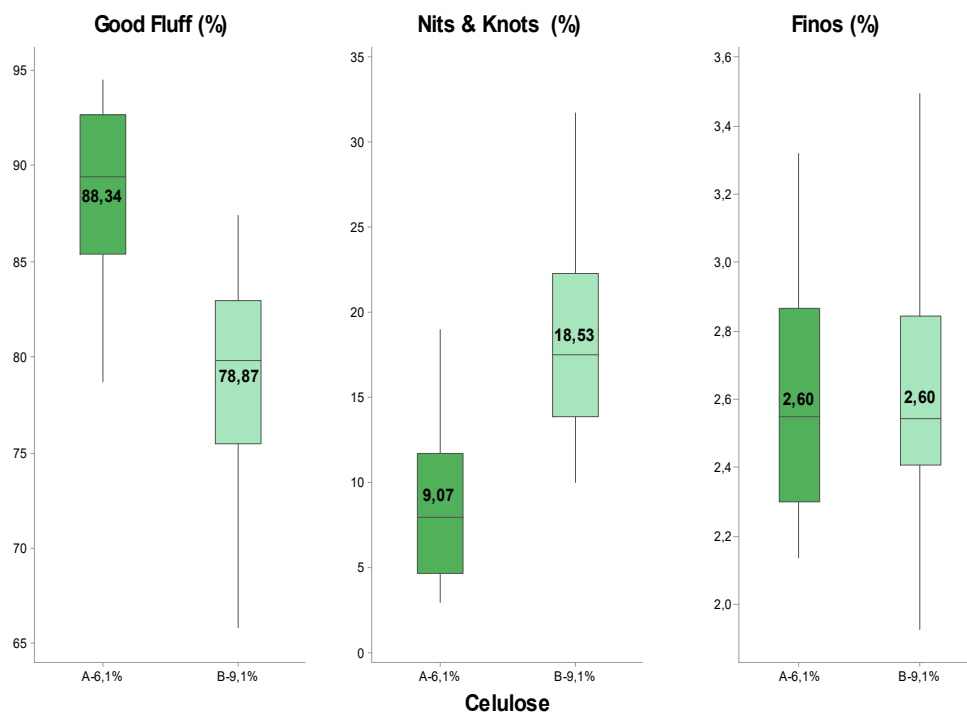
Fonte: O Autor.

A alteração em gap é uma das poucas mudanças que não impactam parâmetros de custo em máquinas de conversão, porém apresenta impacto relevante na uniformidade do desfibramento, devendo ser ajustada sempre que possível de acordo com o fornecedor e especificações da celulose, como espessura, gramatura, umidade de folha, além da morfologia da fibra, decorrentes de cada espécie, localização e processo produtivo.

5.2.4 Análise Granulométrica por Umidade de Celulose

Os parâmetros de moinho anteriores, se otimizados em conjunto, representam um ganho potencial de até 8% em uniformidade de desfibramento atribuído ao aumento do conteúdo de *Good Fluff*, já a utilização de celuloses com menores umidades demonstrou sozinha um potencial de contribuição de até 9,5% e sem impactar a proporção de finos, conforme Figura 36.

FIGURA 36 – Análise granulométrica das celulosas Fluff agrupadas por umidade de celulose



Fonte: O Autor.

Maiores umidades em celulose favorecem o aumento das ligações de ponte de hidrogênio localizadas nas fibras e fibrilas da celulose, podendo justificar o maior conteúdo de *Nits & Knots* ou grumos obtidos. Celulosas com maior teor de umidade possuem maior tendência à formação de *Nits & Knots*,¹⁸ como alternativa para a melhoria da uniformidade do desfibramento, o tempo de retenção dentro do sistema de desfibramento é aumentado, porém essa retenção pode vir a danificar as fibras celulósicas através da maior incidência de cortes ou ainda prejudicar a performance da linha.

Os resultados de finos granulométricos na mesma proporção de 2,6% também demonstram que as diferenças morfológicas de finos provenientes da madeira (pré-desfibramento) ou do corte de fibras durante o processamento não afetaram o conteúdo de finos da análise granulométrica. Esse comportamento indica que, embora os parâmetros do moinho como fluxo de alimentação, celulose e gap tenham apresentado alguma correlação com os finos “morfológico”, não necessariamente esse mesmo comportamento ocorrerá quando na produção de painéis absorventes.

Uma das maiores correlações de *Pearson* encontradas neste experimento está relacionada ao conteúdo de finos B característico de fibrilação e ao conteúdo de *Good Fluff* (0,84) e *Nits & Knots* (-0,84). Experimentos que apresentaram maiores conteúdos de finos B reduziram o conteúdo bem desfibrado e, por consequência, aumentaram o conteúdo de grumos da celulose Fluff. Quando se avalia, através da Tabela 9, a fim de verificar qual parâmetro de processo influenciou a geração de finos B, obtém-se a celulose, que variou em umidade com coeficiente de correlação de 0,87. Uma vez que os finos B previamente ao desfibramento eram morfologicamente similares entre as celuloses, conclui-se que as maiores umidades favorecem significativamente a geração de finos B, fibrilação e laminação do material no processo de desfibramento e, com isso, impactaram consideravelmente os conteúdos de *Good Fluff* (-0,84) e *Nits & Knots* (0,83).

Em análise sobre a teoria de refino, o aumento da área da superfície através da fibrilação do material por meio de um tratamento mecânico é um método importante para melhorar a força de ligação da fibra e da rede fibrosa e é verificado frequentemente em fabricação de papéis através do processamento mecânico de refinação.⁴¹

5.3 ANÁLISE FÍSICO-MECÂNICA DE PAINÉIS ABSORVENTES POR DIFERENTES CONDIÇÕES DE DESFIBRAMENTO

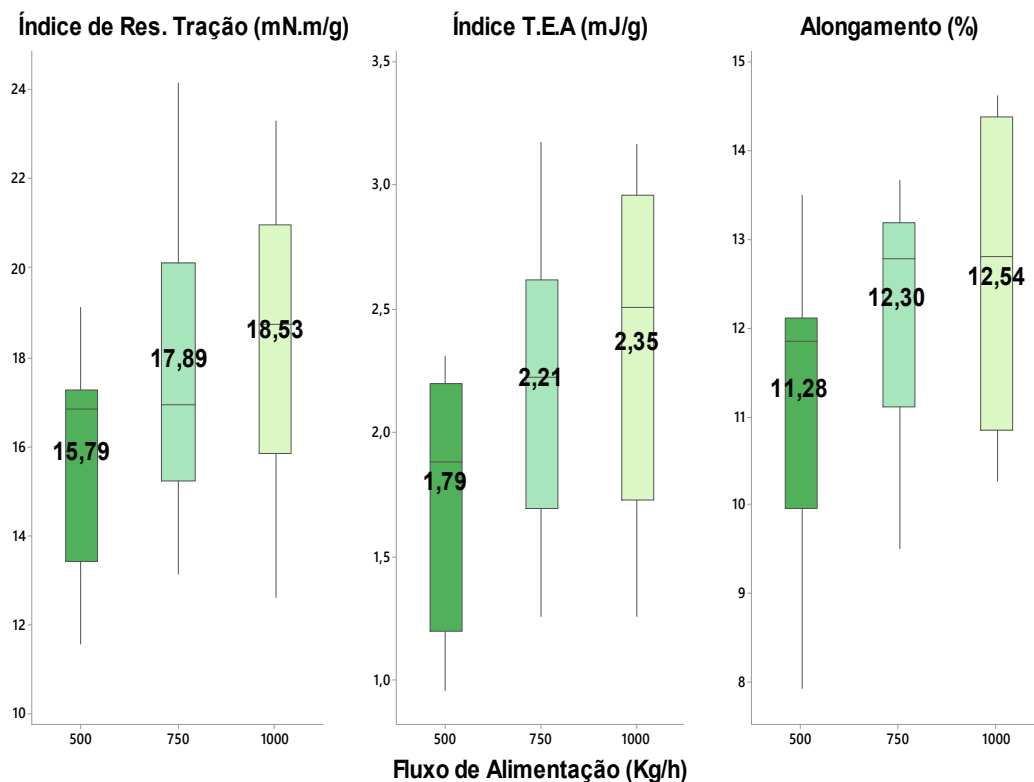
Um vez que as características morfológicas e granulométricas são obtidas com diferentes parâmetros de processamento responsáveis pelas propriedades mecânicas de painéis absorventes, pode-se então obter as relações e indicar as melhores configurações de moinho para as propriedades pretendidas pelo fabricante, que devem ser avaliadas de acordo com seu gargalo de qualidade do produto final e processo.

5.3.1 Análise Físico-Mecânica do Painel por Fluxo de Alimentação

Através das correlações de *Pearson* presentes na Tabela 17 do Anexo D, todas as propriedades mecânicas dos painéis absorventes apresentaram correlação média e positiva com o fluxo de alimentação.

Conforme a Figura 37, os resultados em propriedades mecânicas dos painéis absorventes apresentaram ganhos de até 14,8% em resistência à tração, 23,8% em TEA e 10% em alongamento através do aumento do fluxo de alimentação.

FIGURA 37 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes em diferentes condições de fluxo de alimentação (kg/h)



Fonte: O Autor.

Correlacionando os melhores resultados mecânicos encontrados com os parâmetros granulométricos obtidos na condição de 1000 kg/h (Figura 35), pode-se inferir que as melhores resistências foram obtidas quando a celulose desfibrada continha menores conteúdos de *Good Fluff* com correlação de -0,80 e maiores conteúdos de *Nits & Knots* de 0,87.

Avaliando o material e a diferença entre os conteúdos granulométricos, pode-se observar que o conteúdo bem desfibrado provê fibras mais individualizadas, enquanto, no conteúdo mal desfibrado e com maior teor de grumos, as fibras permanecem unidas e, portanto, além de estarem ligadas fortemente umas às

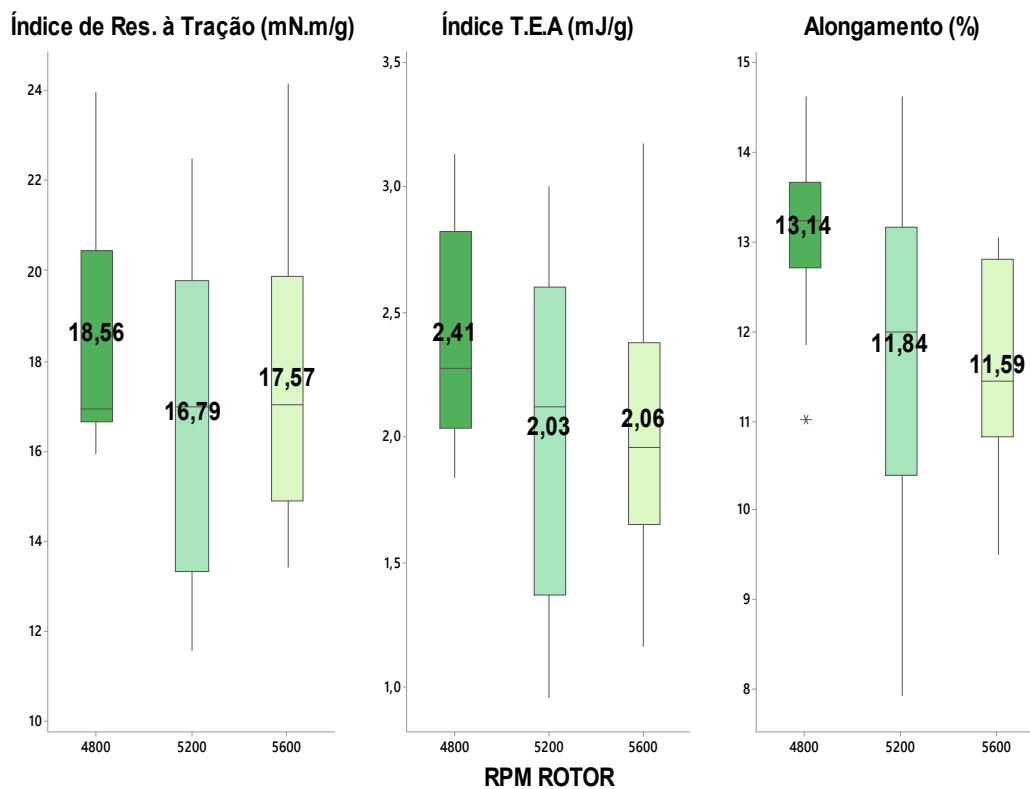
outras, também são menos danificadas pelo processo de desfibramento, contribuindo para as maiores resistências encontradas.

Com relação às propriedades morfológicas, o aumento do fluxo de alimentação aumenta o conteúdo de finos (0,34) mais especificamente os finos A (0,33), com isso pode-se atribuir as maiores resistências aos impactos granulométricos do material e não a aspectos morfológicos das fibras.

5.3.2 Análise Físico-Mecânica do Painel por RPM de Rotor

Os resultados das propriedades mecânicas do painel formado por celuloses Fluff desfibradas em diferentes rotações de rotor não apresentaram tendências e correlações para resistência à tração e TEA, porém foi obtida correlação inversa e média com o alongamento (-0,38).

FIGURA 38 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes em diferentes condições de rotação de rotor



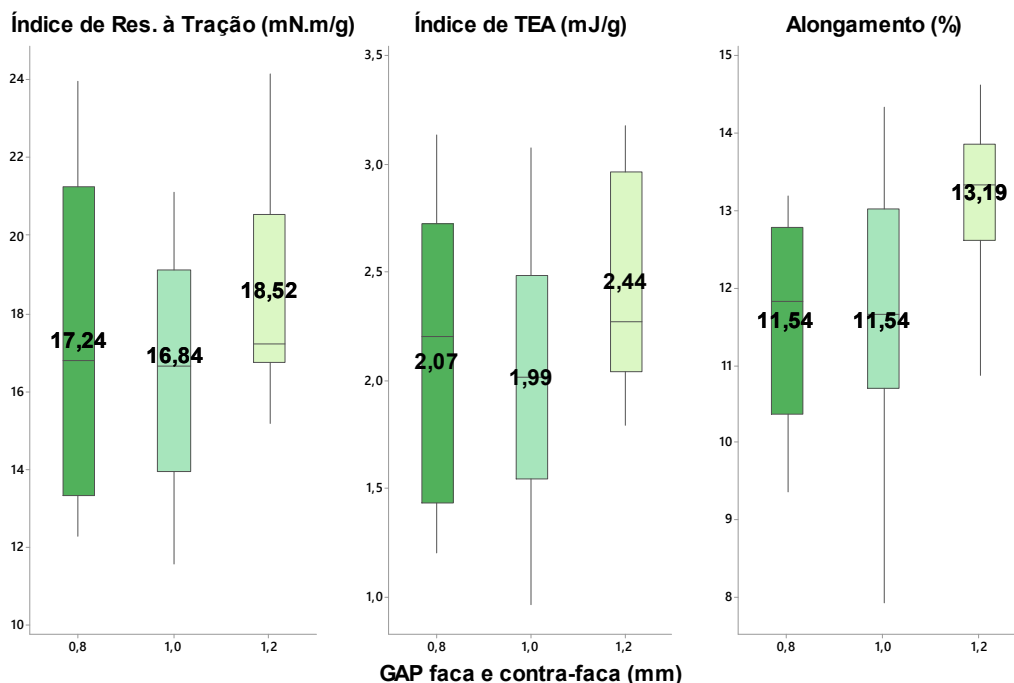
Fonte: O Autor.

Avaliadas as características morfológicas e granulométricas das celuloses Fluff processadas em diferentes condições de rpm (Figuras 31 e 36), apenas a granulometria do material desfibrado mostrou ter sido impactada pela rotação de rotor, sendo que, para a maior velocidade de 5600 rpm, o conteúdo bem desfibrado foi 8% superior, o que pode ter afetado negativamente o alongamento devido à maior individualização das fibras contidas nessa fração celulósica e discutido no tópico anterior.

Do ponto de vista da aplicação em usuário final, pode-se utilizar o alongamento do painel como uma medida indireta da elasticidade do material, que pode contribuir para que o painel não rompa sob ciclos de movimentos causados pelo usuário.

5.3.3 Análise Físico-Mecânica do Painel por GAP entre Faca e Contra-Faca

FIGURA 39 – Propriedades mecânicas dos painéis de absorventes em diferentes condições de espaçamento entre faca e contra-faca (gap)



Fonte: O Autor.

Não foram obtidas correlações e impactos relevantes nas propriedades mecânicas de resistência à tração e TEA atribuídas ao espaçamento em faca e

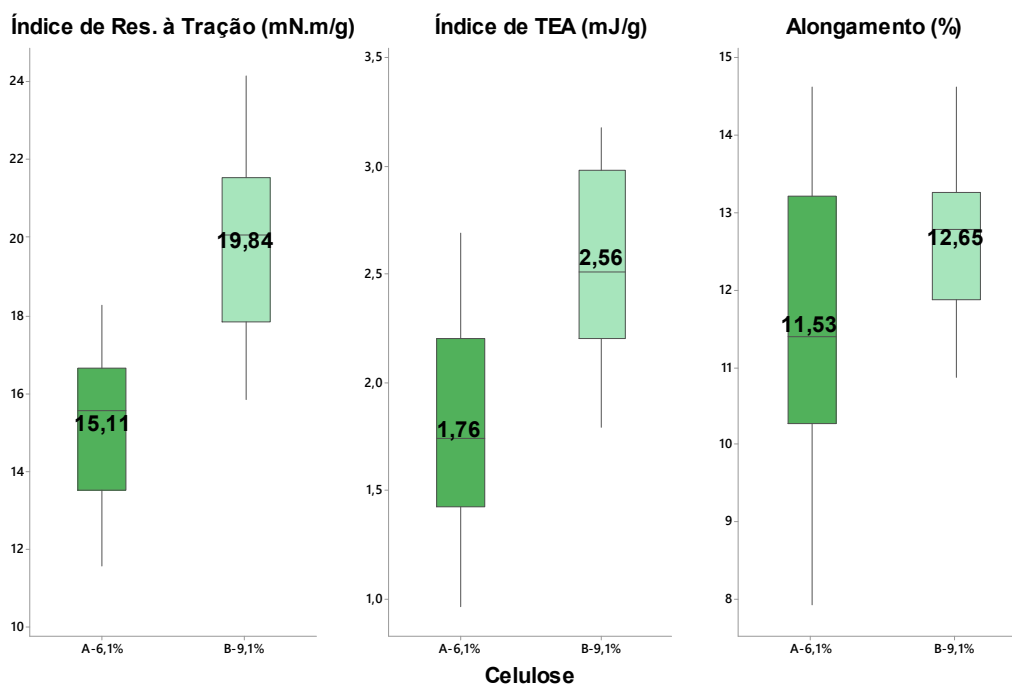
contra-faca. Já o alongamento apresenta correlação média e positiva (Tabela 17), em que, quanto maior o espaçamento entre as facas, maior o conteúdo de *Nits & Knots* e menor o conteúdo de *Good Fluff*. Morfologicamente os maiores espaçamentos também favorecem a manutenção do comprimento de fibra e espessura de parede (Figura 32), contribuindo com os maiores resultados de alongamento obtidos.

5.3.4 Análise Físico-Mecânica do Painel por Umidade de Celulose

De acordo com os índices de correlação de *Pearson* para as propriedades mecânicas dos painéis, depois dos resultados da análise granulométrica que apresentaram correlações na faixa de $\pm 0,8$, o tipo de celulose foi o parâmetro de maior impacto (0,74), conforme Tabela 17.

Quando utilizada a celulose B, caracterizada pela maior umidade e consequente fibrilação, resultou em ganhos relativos no índice de resistência à tração de 23,8%, 31,25% em TEA e de 8,85%.

FIGURA 40 – Propriedades mecânicas dos painéis absorventes por celuloses de diferentes umidades



Fonte: O Autor.

O fato de os painéis absorventes serem formados à seco, nos quais o ar é o meio de formação, faz com que pontes de hidrogênio permanentes não se formem entre as fibras da rede fibrosa.⁵ Essa insuficiência de ligações interfibrilares em painéis formados à seco resulta em baixas resistências mecânicas do painel, e essa teoria pode também ser aplicada para a umidade intrínseca da celulose utilizada.

Adicionalmente ao parâmetro de umidade da celulose, em análise granulométrica, a celulose B apresentou redução de 9,5% em conteúdo bem desfibrado de *Good Fluff* e um aumento de 9,5% em *Nits & Knots*, sendo que o conteúdo de finos não foi impactado.

Do ponto de vista morfológico e visualizado na Tabela 4, a celulose B teve o comprimento inicial levemente superior ao da celulose A em 0,023 mm, porém mesmo grau de redução do comprimento (-0,03 mm). Essa pequena variação inicial não pode ser descartada quando obtidas maiores resistências à tração, TEA e alongamento encontradas.

6 CONCLUSÃO

Através da experimentação utilizando escala industrial de produção, com este trabalho foi possível comprovar os parâmetros e níveis do desfibramento em moinho que afetam as características da celulose Fluff e dos painéis absorventes. Além disso, conseguiu-se quantificar o potencial impacto e o possível ganho atrelado à otimização dos parâmetros de desfibramento.

Dentre os parâmetros avaliados, a utilização de maiores fluxos de alimentação favoreceu o aumento de finos na celulose em até 3,6%, em especial o finos A, caracterizado por cortes de fibra, porém não foi verificada redução considerável em comprimento de fibra nos três níveis avaliados. Para a análise de espessura de parede, não foi obtida tendência evidente ao longo dos diferentes fluxos aplicados.

Menores fluxos de alimentação uniformizaram o desfibramento através do aumento aproximado de até 7,8% em *Good Fluff*, contudo esse aumento afetou as resistências mecânicas dos painéis, reduzindo a resistência à tração do painel em 14,8 %, TEA em 23,8%, e alongamento em 10%.

Rotações de rotor entre 4800 e 5600 rpm não apresentaram impactos significativos em comprimento de fibra, espessura de parede e geração de finos. Quanto à granulometria e uniformidade do conteúdo desfibrado, as maiores rotações favoreceram o incremento de até 8,16% em *Good Fluff* devido à redução de *Nits & Knots*. Essa redução, por sua vez, influenciou negativamente as propriedades mecânicas dos painéis, chegando a reduções de 5,3% em resistência à tração, 14,5% em TEA, e 11,8% em alongamento.

Espaçamentos de 0,8 e 1,0mm entre faca e contra-faca morfologicamente apresentaram impacto em redução de comprimento de fibra, e os ganhos atrelados à manutenção do comprimento de fibra e redução de finos só puderam ser visualizados em espaçamento de 1,2 milímetros. Granulometricamente os espaçamentos de 0,8 e 1,0 milímetros apresentaram resultados semelhantes para *Good Fluff* de 85,85% e 85,21%, e *Nits & Knots* de 11,23% e 12,27% respectivamente, porém, para o gap de 0,8 mm, o teor de finos absoluto foi 0,31% maior, o que relativamente representa 12,36%. As propriedades mecânicas dos painéis também foram similares para celulosas processadas em 0,8 e 1,0 mm, já o maior espaçamento de 1,2 mm resultou num incremento de 7% em resistência à

tração, 15,16% em TEA, e 12,5% em alongamento, consequência do maior teor de *Nits & Knots* e maior percentual de finos B no material.

A maior umidade da celulose favoreceu a maior geração de *Nits & Knots* em 9,46% e a maior fibrilação da celulose através do aumento de Finos B durante o processo de desfibramento, contribuindo para as propriedades mecânicas superiores em resistência à tração de 23,8%, TEA de 31,25%, e alongamento de 8,8%.

O conteúdo de finos morfológico não demonstrou impacto no conteúdo de finos granulométrico, sendo este último classificado como o finos similar ao visualizado em processos de fabricação de produtos absorventes. Este finos de processo muitas vezes é considerado perda de processo.

Embora em teoria sempre se busque uniformidade de desfibramento através do aumento em *Good Fluff*, as propriedades mecânicas dos painéis foram inferiores em desfibramentos com maior uniformidade. Sendo que, as maiores resistências estão atreladas ao maior percentual de *Nits & Knots* na celulose Fluff desfibrada, que é consequência da celulose de maior umidade, dos maiores fluxos de alimentação, menores rotações de rotor e gap mais largo.

A depender do gargalo produtivo de cada fabricante, as configurações de parâmetros deverão ser otimizadas diferentemente, e, se realizadas em conjunto, têm um potencial de entregar o máximo resultado obtido para o conjunto.

Para perdas de processo como finos pelo sistema de exaustão ou problemas como pó em máquina, recomenda-se fluxos de alimentação intermediários, menores rotações de rotor visando à economia de energia e ao gap mais espaçado, chegando a um potencial conjunto de redução de 12,4% em finos granulométrico.

Quanto a desfibramentos desuniformes com problemas de instabilidade do peso de produtos, má formação de painel e vazamentos, a recomendação é de que sejam utilizadas celulosas com menores umidades, menores fluxos de alimentação, maiores rotações de rotor e espaçamento intermediário de faca e contra-faca, com potencial de incremento de 9,47% em conteúdo bem desfibrado e uniformidade de distribuição.

Rupturas de painéis com consequentes vazamentos e embolamentos podem ser evitadas graças a celulosas com maiores umidades, maiores fluxos de alimentação, menores rotações de rotor e gap mais espaçado com um potencial de

ganho de 23,8% em resistência à tração, 31,25% em TEA, e 12,5% em alongamento relativamente.

REFERÊNCIAS

- ¹ CLARK, J. D. A. Some thoughts on fiber classification and length. **Tappi Journal**, v. 68, n. 8, p. 119-121, 1985.
- ² XIE, Y.; TONG, Q.; CHEN, Y.; LIU, J.; LIN, M. Manufacture and properties of a novel ultra-low density fiberboard from wood fiber. **BioResources**, v. 6, n. 4, p. 4055-4066, 2011. DOI: 10.15376/biores.6.4.4055-4066.
- ³ NONNI, A. J.; COURCHENE, C. E.; SLONE, C. M.; ABITZ, P. R. **Modified cellulose from chemical kraft fiber and methods of making and using the same**. Depositante: GP Celulose GmbH. US 2012/0183772 A1. Depósito: 8 Dec. 2011. Concessão: 19 July 2012.
- ⁴ MOORE, D. Fiber Fundamentals. Fluff Pulp. INDA, Association of the Nonwoven Fabrics Industry Conference. St Petersburg. **Anais**. St Petersburg: INDA-TEC 95 Association of the Nonwoven Fabrics Industry, 1995. p. 91-104.
- ⁵ ASKLING, C.; WÅGBERG, L.; RIGDAHL, M. Rheological characterization of dry-formed networks of rayon fibres. **Journal of Materials Science**, 33, p. 1517-1527, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1017527901644>. Acesso em: 8 Aug. 2019.
- ⁶ ASKLING, C.; WÅGBERG, L.; RIGDAHL, M. Effects of the process conditions during dry-defibrillation on the properties of cellulosic networks. **Journal of Materials Science**, 33, p. 2005-2012, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1004342429922>. Acesso em: 8 Aug. 2019.
- ⁷ ASKLING, C.; WÅGBERG, L.; RIGDAHL, M. The effect of additives on the mechanical properties of dry-formed fibre networks. **Journal of Materials Science**, 33, p. 1997-2003, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1004390313084>. Acesso em: 8 Aug. 2019.
- ⁸ LUND, K.; SJÖSTRÖM, K.; BRELID, H. Alkali Extraction of Kraft Pulp Fibers: Influence on Fiber and Fluff Pulp Properties. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, ano 2012, v. 7, n. 2, p. 30-39, 1 June 2012. DOI 10.1177/155892501200700206. Disponível em: <https://www.jeffjournal.org/papers/Volume7/7.2.5K.Lund.pdf>. Acesso em: 10 Sept. 2019.
- ⁹ SCHLUSAZ, M. *et al.* Effect of Different Mill Setups in Fluff Pulp Yield. *In*: ABTCP International Pulp and Paper Congress, 52, 2019, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 2019.
- ¹⁰ HON, D. N. S. Celulose: Chemistry and Technology. *In*: **ENCYCLOPEDIA of Materials: Science and Technology**, 2001.
- ¹¹ VIEIRA, O. Tópicos Especiais em Tecnologia Orgânica, Celulose e Papel. *In*: **APOSTILA de Celulose**, 2010.

¹² MANGO, P. **The Future of Fluff Pulp to 2022**. United States: Smithers Pira, 2017.

¹³ KRZYSIK, D. G.; MUSIL, D. C.; ROSCH, F. A.; SHAW, G. A.; UNDERHILL, D. M.; HOCKERSMITH, J. M. **Absorbent article having a lotionized bodyside liner**. Depositante: Kimberly-Clark Worldwide, Inc. 6,149,934. Depósito: 23 Apr. 1999. Concessão: 21 Nov. 2000.

¹⁴ EDANA (ed.). **Baby Diapers and Nappies infographic**: A look inside your diaper. 2019. Infográfico. Disponível em: <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/absorbent-hygiene-products/baby-diapers>. Acesso em: 14 May 2019.

¹⁵ SORVARI, J.; PIRINEN, P.; HYVARINEN, P.; MALMSTEN, E.; JARKKO, L. **Fluff pulp, method to produce Fluff pulp, use of Fluff pulp and a product produced of Fluff pulp**. Depositante: UPM kimmene corporation. WO 0157/313 A1. Depósito: 6 Feb. 2001. Concessão: 9 Aug. 2001.

¹⁶ PINKERT, A.; MARSH, K. N.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Ionic Liquids and Their Interaction with Celulose. **Chemical Reviews**, ano 2009, v. 109, ed. 2009, 16 Sept. 2009. DOI 10.1021/cr9001947. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26815593_Ionic_Liquids_and_Their_Interaction_with_Celulose. Acesso em: 8 May 2019.

¹⁷ JOKINEN, K. O.; KETTUNEN, J.; NIEMI, M. T.; LAINE, K. J. E. **Method of producing Fluff pulp with improved defibration properties**. Titular: Cultor Ltd. US 5,068,009. Depósito: 22 Mar. 1990. Concessão: 26 Nov. 1991.

¹⁸ MOORE *et al.* **Flow-through moist pulp fiberizing device**. Buckeye Celulose Corporation. 3,987.968, 10-26-76, Cl. 241-28.000.

¹⁹ CHAMPIONS INDUSTRY CO (ed.). **Automatic Baby Diaper Manufacturing Machine**. 2019. Diagrama. Disponível em: <https://www.diaperindustry.com/diaper-machine/baby-diaper-machine/automatic-baby-diaper-manufacturing-machine.html>. Acesso em: 7 Aug. 2019.

²⁰ MILAGRES, F. R. *et al.* **Technological Evaluation of Pinus maximinoi Wood for Industrial Use in Kraft Pulp Production**. *In*: Pulping, Engineering, Environmental, Recycling and Sustainability (PEERS) Conference. Portland, 2018.

²¹ VALMET. **Fiber Image Analyzer – Valmet FS5**: Owner's manual. K12690 V1.3 EN. ed. Kajaani, Finland: Valmet Automation, 2015. p. 86.

²² WESTERLIND, B. **Mechanical properties of dry-formed and other low-density papers**. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1985.

²³ KOMORI, T.; MAKISHIMA, K. Numbers of Fiber-to-Fiber Contacts in General Fiber Assemblies. **Text. Res. J.**, v. 47, p. 13-17, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004051757704700104>. Acesso em: 9 May 2019.

- ²⁴ SEARS, K. D.; ABITZ, P. R. **Method of softening pulp and pulp products produced by same**. Depositante: Rayonier Research Center. US 5,776,308. Depósito: 10 Oct. 1996. Concessão: 7 July 1998.
- ²⁵ CAMPOS, E. S. **Curso básico de fabricação de papel com ênfase nas propriedades dos papeis de fibra curta**. Aracruz, 2010.
- ²⁶ TWEDE, D.; SELKE, S. E. M.; SHIRES, D. **Cartons, Crates and Corrugated Board**. 2. ed. Pensilvania: DEStech Publications, 2015.
- ²⁷ HEDBERG, D. A. O. **In-plane fracture analysis of paperboard using x-ray tomography**. Dissertação (Division of Solid Mechanics), Lund University, 2018.
- ²⁸ PFI-Method of 1981, Measurement of network strength in dry Fluffed pulps. The **Norwegian Pulp and Paper Res**. Inst. Box 250, Vinderen, Oslo 3, Norway, 1981.
- ²⁹ TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus)**. ANSI T 494 om-13, 2013.
- ³⁰ CELULOSE. Klabin. Negócios e Produtos. Disponível em: <https://klabin.com.br/negocios-e-produtos/celulose/>. Acesso em: 9 maio 2019.
- ³¹ ISO – INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Pulps — Determination of fibre length by automated optical analysis — Part 2: Unpolarized light method**. ISO 16065-2:2014.
- ³² MTS NIT COUNTER. **Fluff Pulp Defibration Test Instrument**. NA. [S. I.]: MTS Equipments. Manual Técnico do Equipamento, 2015.
- ³³ SCAN – SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD TESTING COMITEE. **Fluff: Knot Content**. SCAN-CM 37:85, 1985.
- ³⁴ SIGMA ALDRICH. Technical Library. **Particle Size Conversion Table**. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/chemistry/stockroom-reagents/learning-center/technical-library/particle-size-conversion.html>. Acesso em: 15 May 2019.
- ³⁵ DE RUVO, A.; HOLLMARK, H.; HARTOG, S.; FELLERS, C. Dry-formed vs wet-formed – a comparison of mechanical properties (in Swedish). **Sv. Papperstidn**, v. 85, n. 7, 1982, 16.
- ³⁶ ISO – INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Paper, board and pulps - Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples**. ISO 187:1990.
- ³⁷ INSTRON (ed.). **3360 Series Universal Testing Systems up to 50 kN (11,250 lbf) Force Capacity**. 2019. Fotografia. Disponível em: <https://www.instron.us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/3300/3360-dual-column>. Acesso em: 2 Dec. 2019.

- ³⁸ PEARSON'S CORRELATION COEFFICIENT. **Statistics Solutions**. Disponível em: <https://www.statisticssolutions.com/pearsons-correlation-coefficient/>. Acesso em: 9 May 2019.
- ³⁹ DAN-WEB. **Hammer mill**. 2019. Fotografia. Disponível em: http://www.dan-web.com/pages/billeder/vis_billede.asp?billedenummer=3739140. Acesso em: 23 Oct. 2019.
- ⁴⁰ SILVA, A. P. Considerações sobre a refinação de fibras. **O Papel**, p. 29-34, 1969.
- ⁴¹ CHEN, T.; XIE, Y.; WEI, Q.; WANG, X.; HAGMAN, O.; KARLSSON, O.; LIU, J. Effect of refining on physical properties and paper strength of *Pinus massoniana* and China fir cellulose fibers. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7839-7848, 2016.
- ⁴² BAJPAI, P. Paper and Its Properties. *In*: BIERMANN'S Handbook of Pulp and Paper, 3. ed. 2018.
- ⁴³ MARIANO, M.; KISSI, N. EI.; DUFRESNE, A. Cellulose nanocrystals and related nanocomposites: Review of some properties and challenges. **Journal of Polymer Science**, part B, 52, p. 791-806, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/polb.23490>. Acesso em: 9 Aug. 2019.
- ⁴⁴ EK, M.; GELLERSTED, G.; HENRIKSSON, G. **Pulp and Paper Chemistry and Technology: Pulping Chemistry and Technology**. Suécia, Gruyter, 2009.
- ⁴⁵ ALPES EQUIPAMENTOS. **Rotor Desintegrador de Celulose**. 2019. Fotografia. Disponível em: <http://www.alpesequipamentos.com.br/site/index.php/maquinas-e-equipamentos/2-conteudo>. Acesso em: 8 Aug. 2019.
- ⁴⁶ POURMOHAMMADI, A. **Fibre dynamics in air-laid nonwoven process**. Ph.D. Thesis, Leeds University, 1998.
- ⁴⁷ MINITAB. **Interpretar os principais resultados para o Boxplot**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/graphs/how-to/boxplot/interpret-the-results/key-results/>. Acesso em: 30 abr. 2020.
- ⁴⁸ ROBERTS, J. C. The Chemistry of Paper. **Royal Society of Chemistry**, 1996. p. 11-25. ISBN 1847552064, 9781847552068.

ANEXO A – DOE DO EXPERIMENTO

TABELA 5 – DOE para análise dos 54 diferentes *setups* contemplando as variáveis de processamento

(continua)

Setup	Umidade	Alimentação (kg/h)	RPM Motor	GAP (mm)
1	Celulose A - 6,1%	500	4800	0,8
2	Celulose A - 6,1%	500	4800	1,0
3	Celulose A - 6,1%	500	4800	1,2
4	Celulose A - 6,1%	500	5200	0,8
5	Celulose A - 6,1%	500	5200	1,0
6	Celulose A - 6,1%	500	5200	1,2
7	Celulose A - 6,1%	500	5600	0,8
8	Celulose A - 6,1%	500	5600	1,0
9	Celulose A - 6,1%	500	5600	1,2
10	Celulose A - 6,1%	750	4800	0,8
11	Celulose A - 6,1%	750	4800	1,0
12	Celulose A - 6,1%	750	4800	1,2
13	Celulose A - 6,1%	750	5200	0,8
14	Celulose A - 6,1%	750	5200	1,0
15	Celulose A - 6,1%	750	5200	1,2
16	Celulose A - 6,1%	750	5600	0,8
17	Celulose A - 6,1%	750	5600	1,0
18	Celulose A - 6,1%	750	5600	1,2
19	Celulose A - 6,1%	1000	4800	0,8
20	Celulose A - 6,1%	1000	4800	1,0
21	Celulose A - 6,1%	1000	4800	1,2
22	Celulose A - 6,1%	1000	5200	0,8
23	Celulose A - 6,1%	1000	5200	1,0
24	Celulose A - 6,1%	1000	5200	1,2
25	Celulose A - 6,1%	1000	5600	0,8
26	Celulose A - 6,1%	1000	5600	1,0
27	Celulose A - 6,1%	1000	5600	1,2
28	Celulose B - 9,1%	500	4800	0,8
29	Celulose B - 9,1%	500	4800	1,0
30	Celulose B - 9,1%	500	4800	1,2
31	Celulose B - 9,1%	500	5200	0,8
32	Celulose B - 9,1%	500	5200	1,0
33	Celulose B - 9,1%	500	5200	1,2

(conclusão)

Setup	Umidade	Alimentação (kg/h)	RPM Motor	GAP (mm)
34	Celulose B - 9,1%	500	5600	0,8
35	Celulose B - 9,1%	500	5600	1,0
36	Celulose B - 9,1%	500	5600	1,2
37	Celulose B - 9,1%	750	4800	0,8
38	Celulose B - 9,1%	750	4800	1,0
39	Celulose B - 9,1%	750	4800	1,2
40	Celulose B - 9,1%	750	5200	0,8
41	Celulose B - 9,1%	750	5200	1,0
42	Celulose B - 9,1%	750	5200	1,2
43	Celulose B - 9,1%	750	5600	0,8
44	Celulose B - 9,1%	750	5600	1,0
45	Celulose B - 9,1%	750	5600	1,2
46	Celulose B - 9,1%	1000	4800	0,8
47	Celulose B - 9,1%	1000	4800	1,0
48	Celulose B - 9,1%	1000	4800	1,2
49	Celulose B - 9,1%	1000	5200	0,8
50	Celulose B - 9,1%	1000	5200	1,0
51	Celulose B - 9,1%	1000	5200	1,2
52	Celulose B - 9,1%	1000	5600	0,8
53	Celulose B - 9,1%	1000	5600	1,0
54	Celulose B - 9,1%	1000	5600	1,2

Fonte: O Autor.

ANEXO B - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA

TABELA 6 – Análise de Variância das Propriedades Morfológicas

Parâmetro		Análise de Variância											
		Comprimento de fibra - Lc(l)				Espessura de parede				Finos (A+B)			
		SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fluxo de Alimentação (kg/h)		0,000439	0,00022	0,24	0,790	1,187	0,5937	1,23	0,303	1,658	0,8289	3,13	0,055
	Erro	0,035119	0,000924			16,835	0,481			10,077	0,2652		
RPM Rotor		0,000035	0,000018	0,02	0,981	0,3667	0,1833	0,36	0,698	0,3457	0,1729	0,58	0,567
	Erro	0,035524	0,000935			17,656	0,5045			11,389	0,2997		
GAP faca e contra-faca (mm)		0,01513	0,007566	14,08	0,000	3,594	1,7972	4,36	0,020	2,924	1,4622	6,31	0,004
	Erro	0,02043	0,000538			14,428	0,4122			8,81	0,2319		
Celulose – Umidade (%)		0,01227	0,012268	20,54	0,000	1,124	1,1244	2,4	0,130	0,0781	0,0781	0,26	0,612
	Erro	0,02329	0,000597			16,898	0,4694			11,657	0,2989		

TABELA 7 – Sumário de Modelo das Propriedades Morfológicas

Conteúdo		Sumário do Modelo															
		Fluxo de Alimentação (kg/h)				RPM de Rotor				GAP (mm)				Celulose – Umidade (%)			
		S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)
Comprimento de fibra - Lc(l)	0,0304	1,24%	0,00%	0,00%	0,0306	0,10%	0,00%	0,00%	0,0232	42,56%	39,53%	32,88%	2,44%	34,50%	32,82%	27,61%	
Espessura de parede	0,6935	6,59%	1,25%	0,00%	0,7102	2,03%	0,00%	0,00%	0,6421	19,94%	15,37%	5,39%	68,51%	6,24%	3,63%	0,00%	
Finos (A+B)	0,515	14,13%	9,61%	0,10%	0,5475	2,95%	0,00%	0,00%	0,4815	24,92%	20,97%	12,47%	0,546708	0,67%	0,00%	0,00%	

TABELA 8 – Método de *Tukey* das Propriedades MorfológicasInformações de Agrupamento Usando Método de *Tukey* e Confiança de 95%

Parâmetro	Comprimento de fibra - Lc(l)				Espessura da parede				Finos			
	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento
Fluxo de Alimentação (kg/h)												
500	2,0529	0,0355	(2,0343; 2,0714)	A	11,081	0,513	(10,636; 11,526)	A	12,42	0,557	(12,106; 12,735)	A
750	2,0453	0,02295	(2,03037; 2,06022)	A	10,685	0,797	(10,344; 11,027)	A	12,484	0,55	(12,231; 12,737)	A
1000	2,0458	0,03424	(2,02875; 2,06289)	A	10,993	0,655	(10,568; 11,417)	A	12,888	0,422	(12,598; 13,177)	A
DesvPad	DesvPad Combinado = 0,0304005				DesvPad Combinado = 0,693543				DesvPad Combinado = 0,514959			
RPM Rotor												
4800	2,049	0,02962	(2,03035; 2,06768)	A	10,778	0,71	(10,344; 11,213)	A	12,664	0,594	(12,330; 12,998)	A
5200	2,0468	0,02836	(2,03134; 2,06229)	A	11,005	0,514	(10,619; 11,390)	A	12,659	0,52	(12,382; 12,936)	A
5600	2,0471	0,03361	(2,03055; 2,06364)	A	10,827	0,875	(10,427; 11,227)	A	12,467	0,541	(12,171; 12,764)	A
DesvPad	DesvPad Combinado = 0,0305750				DesvPad Combinado = 0,710247				DesvPad Combinado = 0,547459			
GAP faca e contra-faca (mm)												
0,8	2,0339	0,02623	(2,02031; 2,04741)	A	10,431	0,896	(10,055; 10,807)	A	12,536	0,509	(12,255; 12,818)	A
1,0	2,0335	0,01791	(2,02139; 2,04563)	A	11,146	0,389	(10,770; 11,522)	A	B 12,923	0,449	(12,671; 13,175)	A B
1,2	2,0742	0,02537	(2,06163; 2,08672)	B	11	0,55	(10,684; 11,381)	B	B 12,294	0,491	(12,033; 12,554)	B
DesvPad	DesvPad Combinado = 0,0231850				DesvPad Combinado = 0,642050				DesvPad Combinado = 0,481512			
Celulose – Umidade (%)												
A	2,0298	0,02414	(2,01872; 2,04083)	A	10,697	0,769	(10,370; 11,025)	A	13	0,631	(12,303; 12,797)	A
B	2,0644	0,02472	(2,05359; 2,07517)	B	11,042	0,601	(10,731; 11,352)	A	12,638	0	(12,3962; 12,8788)	A
DesvPad	DesvPad Combinado = 0,0244377				DesvPad Combinado = 0,685120				DesvPad Combinado = 0,546708			

TABELA 9 – Coeficiente de Correlação de *Pearson* entre Propriedades Morfológicas e Parâmetros de Processamento

Parâmetros	Coeficiente de Correlação de <i>Pearson</i>						
	Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	Espessura de parede da fibra (μm)	CSA Área transversal da parede (μm^2)	Finos A (%)	Finos B (%)	Finos Total A+ B (%)
Fluxo de Alimentação (kg/h)	-0,08804	-0,0712	-0,0393	4,54E-04	0,33269	0,16839	0,34185
RPM Rotor	-0,02379	-0,06802	0,02099	-0,10199	-0,13442	-0,21351	-0,14922
GAP faca e contra-faca (mm)	0,55971	0,42319	0,34852	0,58075	-0,22938	0,33757	-0,20131
Celulose – Umidade (%)	0,58737	0,81247	0,24978	0,14981	0,01522	0,87456	0,08156

ANEXO C - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

TABELA 10 – Análise de Variância das Propriedades Granulométricas

Parâmetro		Análise de Variância											
		<i>Good Fluff</i>				Nits & Knots				Finos			
		SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fluxo de Alimentação (kg/h)		363,4	181,72	4,02	0,026	376,2	188,11	4,13	0,024	0,1917	0,09585	0,76	0,473
	Erro	1719,8	45,26			1732,4	45,59			47.692	0,12551		
RPM Rotor		399,6	199,82	4,51	0,017	398,0	199,02	4,42	0,019	0,01896	0,009479	0,07	0,930
	Erro	1683,6	44,30			1710,6	45,01			494.196	0,130052		
GAP faca e contra-faca (mm)		335,6	167,79	3,65	0,036	359,0	179,50	3,90	0,029	0,9129	0,4565	4,28	0,021
	Erro	1747,6	45,99			1749,6	46,04			40.480	0,1065		
Celulose – Umidade (%)		918,1	918,14	30,73	0,000	917,5	917,54	30,04	0,000	0,00010	0,000099	0,00	0,978
	Erro	1165,1	29,87			1191,0	30,54			496.082	0,127200		

TABELA 11 – Sumário de Modelo das Propriedades Granulométricas

Conteúdo		Sumário do Modelo															
		Fluxo de Alimentação (kg/h)				RPM de Rotor				GAP (mm)				Celulose – Umidade (%)			
		S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)
<i>Good Fluff</i>	6,72736	17,45%	13,10%	4,16%	6,65617	19,18%	14,93%	5,89%	6,78163	16,11%	11,69%	2,44%	5,46567	44,07%	42,64%	38,20%	
Nits & Knots	6,75194	17,84%	13,52%	4,66%	6,70929	18,88%	14,61%	5,55%	6,78541	17,03%	12,66%	3,52%	5,52628	43,51%	42,07%	37,58%	
Finos	0,354268	3,86%	0,00%	0,00%	0,360627	0,38%	0,00%	0,00%	0,326384	18,40%	14,11%	4,61%	0,356652	0,00%	0,00%	0,00%	

TABELA 12 – Método de *Tukey* das Propriedades Granulométricas

Informações de Agrupamento Usando Método de <i>Tukey</i> e Confiança de 95%													
Parâmetro	<i>Good Fluff</i>				Nits & Knots				Finos				
Fluxo de Alimentação (kg/h)	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	
500	87,92	4,86	(83,81; 92,03)	A	9,44	4,86	(5,32; 13,56)	A	2,64	0,2945	(2,4263; 2,8588)	A	
750	83,18	6,53	(79,87; 86,48)	A	14,18	6,64	(10,86; 17,49)	A	2,65	0,454	(2,472; 2,820)	A	
1000	80,14	8,17	(76,36; 83,92)	B	17,36	8,12	(13,57; 21,15)	B	2,50	0,2235	(2,2986; 2,6964)	A	
DesvPad	DesvPad Combinado = 6,72736				DesvPad Combinado = 6,75194				DesvPad Combinado = 0,354268				
RPM Rotor													
4800	78,82	6,85	(74,76; 82,88)	A	18,56	6,90	(14,46; 22,65)	A	2,62	0,400	(2,402; 2,842)	A	
5200	83,75	6,90	(80,38; 87,12)	A	13,68	7,00	(10,29; 17,08)	A	2,57	0,3310	(2,3891; 2,7542)	A	
5600	86,86	6,20	(83,26; 90,46)	B	10,53	6,20	(6,90; 14,16)	B	2,61	0,3618	(2,4138; 2,8041)	A	
DesvPad	DesvPad Combinado = 6,65617				DesvPad Combinado = 6,70929				DesvPad Combinado = 0,360627				
GAP faca e contra-faca (mm)													
0,8	85,95	6,36	(81,98; 89,91)	A	11,23	6,30	(7,26; 15,19)	A	2,83	0,410	(2,638; 3,019)	A	
1,0	85,21	6,90	(81,66; 88,75)	A	12,27	7,00	(8,72; 15,82)	A	2,52	0,3331	(2,3511; 2,6923)	A	B
1,2	79,54	7,00	(75,87; 83,20)	A	17,98	6,94	(14,31; 21,65)	B	2,48	0,2235	(2,3052; 2,6584)		B
DesvPad	DesvPad Combinado = 6,78163				DesvPad Combinado = 6,78541				DesvPad Combinado = 0,326384				
Celulose – Umidade (%)													
A	88,34	5,35	(85,86; 90,81)	A	9,07	5,40	(6,57; 11,57)	A	2,60	0,3454	(2,4349; 2,7575)	A	
B	78,87	5,57	(76,46; 81,28)	B	18,53	5,64	(16,09; 20,97)	B	2,60	0,3670	(2,4419; 2,7568)	A	
DesvPad	DesvPad Combinado = 5,46567				DesvPad Combinado = 5,52628				DesvPad Combinado = 0,356652				

TABELA 13 – Coeficiente de Correlação de *Pearson* entre Propriedades Granulométricas e Parâmetros de Processamento

Coeficiente de Correlação de <i>Pearson</i>			
Análise Granulométrica			
Parâmetros	Conteúdo de <i>Good Fluff</i> (%)	Conteúdo de Nits & Knots (%)	Conteúdo de Finos (%)
Celulose – Umidade (%)	-0,66388	0,65965	0,00446
Fluxo de Alimentação (kg/h)	-0,41352	0,41902	-0,16497
RPM Rotor	0,43358	-0,4305	-0,00965
GAP faca e contra-faca (mm)	-0,36516	0,38174	-0,38733
Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	-0,56078	0,56769	-0,21219
Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	-0,65955	0,66391	-0,1719
Espessura de parede da fibra (μm)	-0,13264	0,14004	-0,16804
CSA Área transversal da parede (μm^2)	-0,24248	0,25754	-0,33805
Finos A (%)	-0,05781	0,05097	0,13375
Finos B (%)	-0,84191	0,83749	-0,01374
Total Finos FS5 A+B (%)	-0,12116	0,11406	0,13129

ANEXO D - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DE ANÁLISES MECÂNICAS

TABELA 14 – Análise de Variância das Propriedades Mecânicas

Análise de Variância													
Parâmetro	Índice de Resistência à Tração				Índice de TEA				Alongamento				
	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Fluxo de Alimentação (kg/h)		48,63	24,314	2,53	0,093	1,944	0,9719	3,06	0,059	10,58	5,292	2,39	0,105
	Erro	365,8	9,626			12,084	0,318			84,21	2,216		
RPM Rotor		20,54	10,27	0,99	0,381	1,062	0,531	1,5	0,236	16,63	8,316	4,04	0,026
	Erro	393,89	10,37			13,459	0,3542			78,16	2,057		
GAP faca e contra-faca (mm)		22,04	11,02	1,07	0,354	1,586	0,7929	2,42	0,102	25,16	12,581	6,87	0,003
	Erro	392,39	10,33			12,442	0,3274			69,63	1,832		
Celulose – Umidade (%)		229,6	229,576	48,44	0,000	6,443	6,4432	33,13	0,000	12,96	12,961	6,18	0,017
	Erro	184,8	4,74			7,585	0,1945			81,83	2,098		

TABELA 15 – Sumário de Modelo das Propriedades Mecânicas

Sumário do Modelo																	
Conteúdo	Fluxo de Alimentação (kg/h)				RPM de Rotor				GAP (mm)				Celulose – Umidade (%)				
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
Índice de Resistência à Tração	3,1026	11,73%	7,09%	0,00%	3,2196	4,96%	0,00%	0,00%	3,2134	5,32%	0,33%	0,00%	2,17709	55,40%	54,25%	50,73%	
Índice TEA	0,5639	13,86%	9,32%	0,00%	0,5951	7,31%	2,44%	0,00%	0,5722	11,30%	6,64%	0,00%	0,441	45,93%	44,54%	40,24%	
Alongamento	1,4887	11,16%	6,49%	0,00%	1,4342	17,55%	13,21%	4,95%	1,3537	26,54%	22,68%	14,57%	1,44855	13,67%	11,46%	4,48%	

TABELA 16 – Método de *Tukey* das Propriedades Mecânicas

Informações de Agrupamento Usando Método de <i>Tukey</i> e Confiança de 95%												
Parâmetro	Índice de Resistência à Tração				Índice TEA				Alongamento			
	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento	Média	DesvPad	IC de 95%	Agrupamento
Fluxo de Alimentação (kg/h)												
500	15,789	2,459	(13,895; 17,683)	A	1,822	0,469	(1,478; 2,167)	A	11,282	1,625	(10,374; 12,191)	A
750	17,89	3,431	(16,367; 19,414)	A	2,239	0,559	(1,962; 2,516)	A	12,303	1,238	(11,572; 13,033)	A
1000	18,533	3,121	(16,791; 20,275)	A	2,373	0,639	(2,056; 2,689)	A	12,541	1,666	(11,705; 13,377)	A
DesvPad	DesvPad Combinado = 3,10262				DesvPad Combinado= 0,563921				DesvPad Combinado= 1,48866			
RPM Rotor												
4800	18,563	2,568	(16,597; 20,528)	A	2,405	0,424	(2,042; 2,768)	A	13,141	1,033	(12,266; 14,017)	A
5200	16,789	3,358	(15,159; 18,418)	A	2,028	0,652	(1,726; 2,329)	A	11,841	1,814	(11,115; 12,567)	A B
5600	17,567	3,495	(15,825; 19,308)	A	2,061	0,638	(1,739; 2,383)	A	11,591	1,181	(10,815; 12,367)	B
DesvPad	DesvPad Combinado = 3,21955				DesvPad Combinado= 0,595139				DesvPad Combinado= 1,43419			
GAP faca e contra-faca (mm)												
0,8	17,24	4,03	(15,36; 19,11)	A	2,074	0,669	(1,740; 2,409)	A	11,537	1,372	(10,746; 12,328)	A
1,0	16,839	2,843	(15,159; 18,518)	A	1,995	0,56	(1,696; 2,294)	A	11,543	1,564	(10,835; 12,250)	B
1,2	18,524	2,781	(16,785; 20,262)	A	2,439	0,491	(2,130; 2,749)	A	13,192	1,062	(12,460; 13,925)	B
DesvPad	DesvPad Combinado= 3,21341				DesvPad Combinado= 0,572210				DesvPad Combinado= 1,35367			
Celulose – Umidade (%)												
A	15,106	1,908	(14,121; 16,090)	A	1,7635	0	(1,5640; 1,9629)	A	11,528	1,755	(10,873; 12,183)	A
B	19,84	2,405	(18,879; 20,800)	B	2,5565	0,4409	(2,3619; 2,7512)	B	12,653	1,080	(12,014; 13,293)	B
DesvPad	DesvPad Combinado= 2,17709				DesvPad Combinado= 0,441000				DesvPad Combinado= 1,44855			

TABELA 17 – Coeficiente de Correlação de *Pearson* entre Propriedades Mecânicas, Granulométricas e Morfológicas e Parâmetros de Processamento

Parâmetros	Coeficiente de Correlação de <i>Pearson</i>		
	Propriedades Mecânicas		
	Índice de Resistência à Tração (mN.m/g)	Índice de TEA (mJ/g)	Alongamento (%)
Celulose – Umidade (%)	0,74429	0,67773	0,36977
Fluxo de Alimentação (kg/h)	0,32341	0,35267	0,30928
RPM Rotor	-0,10704	-0,22708	-0,38369
GAP faca e contra-faca (mm)	0,16839	0,25805	0,44476
Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	0,4759	0,51122	0,48243
Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	0,61563	0,61288	0,46967
Espessura de parede da fibra (μm)	-1,26E-04	0,02575	0,09976
CSA Área transversal da parede (μm^2)	0,04495	0,12802	0,31944
Finos A (%)	-0,09062	-0,16823	-0,34313
Finos B (%)	0,77229	0,74091	0,49468
Finos Total A+B FS5 (%)	-0,03094	-0,11014	-0,30191
Conteúdo de <i>Good Fluff</i> (%)	-0,80404	-0,87015	-0,75364
Conteúdo de Nits & Knots (%)	0,80472	0,87265	0,76231
Conteúdo de Finos (%)	-0,11393	-0,15973	-0,27253

ANEXO E - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS COMPLETAS

TABELA 18 – Coeficiente de Correlação de *Pearson* entre Propriedades Mecânicas, Granulométricas e Morfológicas e Parâmetros de Processamento

(continua)

Tabela Completa											
Parâmetros	Parâmetros				Morfologia						
	Celulose Umidade (%)	Fluxo de Alimentação (Kg/H)	RPM Rotor	GAP faca e contra-faca (mm)	Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	Espessura de parede da fibra	CSA Área transversal da parede	Finos A (%)	Finos B (%)	Total Finos FS5 (%)
Celulose - Umidade (%)	1	-0,00156	-0,03368	0,05989	0,58737	0,81247	0,24978	0,14981	0,01522	0,87456	0,08156
Fluxo de Alimentação (kg/h)	-0,00156	1	-0,00601	-0,00392	-0,08804	-0,0712	-0,0393	4,54E-04	0,33269	0,16839	0,34185
RPM Rotor	-0,03368	-0,00601	1	-0,08472	-0,02379	-0,06802	0,02099	-0,10199	-0,13442	-0,21351	-0,14922
GAP faca e contra-faca (mm)	0,05989	-0,00392	-0,08472	1	0,55971	0,42319	0,34852	0,58075	-0,22938	0,33757	-0,20131
Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	0,58737	-0,08804	-0,02379	0,55971	1	0,92565	0,22696	0,38917	-0,38981	0,69707	-0,33261
Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	0,81247	-0,0712	-0,06802	0,42319	0,92565	1	0,25694	0,33289	-0,20641	0,84974	-0,13957
Espessura de parede da fibra	0,24978	-0,0393	0,02099	0,34852	0,22696	0,25694	1	0,89554	0,16987	0,21912	0,18437
CSA Área transversal da parede	0,14981	4,54E-04	-0,10199	0,58075	0,38917	0,33289	0,89554	1	-0,04829	0,222	-0,03091
Finos A (%)	0,01522	0,33269	-0,13442	-0,22938	-0,38981	-0,20641	0,16987	-0,04829	1	0,103	0,99714
Finos B (%)	0,87456	0,16839	-0,21351	0,33757	0,69707	0,84974	0,21912	0,222	0,103	1	0,17793
Total Finos FS5 (%)	0,08156	0,34185	-0,14922	-0,20131	-0,33261	-0,13957	0,18437	-0,03091	0,99714	0,17793	1
Índice de Res. à Tração (mN.m/g)	0,74429	0,32341	-0,10704	0,16839	0,4759	0,61563	-1,26E-04	0,04495	-0,09062	0,77229	-0,03094
Índice de TEA (mJ/G)	0,67773	0,35267	-0,22708	0,25805	0,51122	0,61288	0,02575	0,12802	-0,16823	0,74091	-0,11014
Alongamento (%)	0,36977	0,30928	-0,38369	0,44476	0,48243	0,46967	0,09976	0,31944	-0,34313	0,49468	-0,30191
Conteúdo de <i>Good Fluff</i> (%)	-0,66388	-0,41352	0,43358	-0,36516	-0,56078	-0,65955	-0,13264	-0,24248	-0,05781	-0,84191	-0,12116
Conteúdo de Nits & Knots (%)	0,65965	0,41902	-0,4305	0,38174	0,56769	0,66391	0,14004	0,25754	0,05097	0,83749	0,11406
Conteúdo de Finos (%)	0,00446	-0,16497	-0,00965	-0,38733	-0,21219	-0,1719	-0,16804	-0,33805	0,13375	-0,01374	0,13129

(conclusão)

Parâmetros	Propriedades Mecânicas			Análise Granulométrica		
	Índice de Resistência à Tração (mN.m/g)	Índice de TEA (mJ/g)	Alongamento (%)	Conteúdo de <i>Good Fluff</i> (%)	Conteúdo de Nits & Knots (%)	Conteúdo de Finos (%)
Celulose - Umidade (%)	0,74429	0,67773	0,36977	-0,66388	0,65965	0,00446
Fluxo de Alimentação (kg/h)	0,32341	0,35267	0,30928	-0,41352	0,41902	-0,16497
RPM Rotor	-0,10704	-0,22708	-0,38369	0,43358	-0,4305	-0,00965
GAP faca e contra-faca (mm)	0,16839	0,25805	0,44476	-0,36516	0,38174	-0,38733
Lc(L) ISO 0,2-7,0mm	0,4759	0,51122	0,48243	-0,56078	0,56769	-0,21219
Lc(W) ISO 0,2-7,0mm	0,61563	0,61288	0,46967	-0,65955	0,66391	-0,1719
Espessura de parede da fibra	-1,26E-04	0,02575	0,09976	-0,13264	0,14004	-0,16804
CSA Área transversal da parede	0,04495	0,12802	0,31944	-0,24248	0,25754	-0,33805
Finos A (%)	-0,09062	-0,16823	-0,34313	-0,05781	0,05097	0,13375
Finos B (%)	0,77229	0,74091	0,49468	-0,84191	0,83749	-0,01374
Total Finos FS5 (%)	-0,03094	-0,11014	-0,30191	-0,12116	0,11406	0,13129
Índice de Res. à Tração (mN.m/g)	1	0,95712	0,63284	-0,80404	0,80472	-0,11393
Índice de TEA (mJ/G)	0,95712	1	0,81224	-0,87015	0,87265	-0,15973
Alongamento (%)	0,63284	0,81224	1	-0,75364	0,76231	-0,27253
Conteúdo de <i>Good Fluff</i> (%)	-0,80404	-0,87015	-0,75364	1	-0,99883	0,10041
Conteúdo de Nits & Knots (%)	0,80472	0,87265	0,76231	-0,99883	1	-0,14831
Conteúdo de Finos (%)	-0,11393	-0,15973	-0,27253	0,10041	-0,14831	1