

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

MODESTO FERNAL FILHO

INFLUÊNCIA DA HIGROSCOPIA NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL
DO PAPEL CARTÃO

PONTA GROSSA

2023

F362 Fernal, Modesto Filho
Influência da higroscopia na estabilidade dimensional do papel cartão /
Modesto Filho Fernal. Ponta Grossa, 2023.
64 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. Planicidade. 2. Papel cartão. 3. Higroscopia. 4. Encanoamento. I.
Carvalho, Benjamim de Melo. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. III.T.

CDD: 620.11

MODESTO FERNAL FILHO

INFLUÊNCIA DA HIGROSCOPIA NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL
DO PAPEL CARTÃO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa. Área de concentração: Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Benjamim de Melo Carvalho.

PONTA GROSSA

2023

MODESTO FERNAL FILHO

INFLUÊNCIA DA HIGROSCOPIA NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL
DO PAPEL CARTÃO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa. Área de concentração: Caracterização de Materiais.

Ponta Grossa, 12 de julho de 2023.

Documento assinado digitalmente
 BENJAMIM DE MELO CARVALHO
Data: 15/03/2024 08:32:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 ADRIANE BASSANI SOWEK
Data: 17/03/2024 20:24:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr^a Adriane Bassani Soweck
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 OSVALDO VIEIRA
Data: 17/03/2024 20:05:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Osvaldo Vieira
Doutor em Engenharia Química
KLABIN SA – Telêmaco Borba PR

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão bem-sucedida desta dissertação na Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Em primeiro lugar, desejo agradecer ao meu orientador, Dr. Benjamin de Melo Carvalho, pela sua orientação, apoio e incentivo ao longo de todo o processo. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação em compartilhar insights valiosos e orientação acadêmica foram essenciais para a conclusão deste estudo.

Também gostaria de expressar minha profunda gratidão aos membros da banca examinadora, Dra. Adriane B. Soweck e Dr. Osvaldo Vieira, por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar e contribuir para a melhoria desta pesquisa. Suas sugestões e críticas construtivas foram inestimáveis e ajudaram a aprimorar a qualidade deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer a todos os meus colegas, amigos e familiares que me apoiaram ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento, apoio emocional e suporte logístico foram fundamentais para superar os desafios encontrados e manter a motivação ao longo do caminho.

Também sou grato às instituições, principalmente a Klabin e organizações que forneceram recursos, dados ou acesso a informações necessárias para a realização deste estudo. Sua contribuição foi de grande importância e enriqueceu significativamente minha pesquisa.

Por fim, quero agradecer à Universidade Estadual de Ponta Grossa por fornecer um ambiente acadêmico inspirador e por investir em recursos e infraestrutura que tornaram possível a realização deste trabalho.

A todos os mencionados e a todos os que de alguma forma contribuíram para esta tese, meu mais profundo agradecimento. Seu apoio e envolvimento foram fundamentais para o sucesso deste estudo.

Atenciosamente,

Modesto Fernal Filho.

RESUMO

O papel é fabricado com fibras celulósicas, as quais são depositadas em uma tela, tendo uma orientação preferencial. O papel cartão é normalmente formado por mais de uma camada, o que torna essa orientação ainda mais complexa. Diferentes orientações podem gerar tensões residuais, o que leva o material a perder sua planicidade. Como complicador as fibras celulósicas são higroscópicas, e sua umidade final de equilíbrio depende da constituição de cada tipo de fibra em questão. Ao absorver ou perder umidade, o tamanho das fibras é modificado e, portanto, as tensões residuais resultantes mudam. O objetivo desse estudo é analisar os efeitos da umidade nas diferentes camadas do papel, e seu efeito na planicidade do cartão. Para isso, um estudo do dimensional, após delaminação das camadas, possibilitou a avaliação de cada camada em diferentes umidades de equilíbrio foram executados. Foi encontrado um comportamento higroscópico muito diferente entre a camada cobertura e a camada base, sendo a camada cobertura menos hidrofílica que a camada base. Também há uma maior estabilidade dimensional no papel revestido em comparação com o papel não revestido, o que contribui para a estabilidade dimensional do produto final.

Palavras-chave: Papel cartão, umidade, temperatura, higroscopia, encanoamento, estabilidade dimensional.

ABSTRACT

The paper is manufactured with cellulose fibers, which are deposited on a fabric, having a preferential orientation. Board paper is typically formed by multiple layers, making this orientation even more complex. Different orientations can generate residual stresses, causing the material to lose its flatness. Making everything more complicated, cellulose fibers are hygroscopic, and their final equilibrium moisture content depends on the composition of each fiber type in question. As they absorb or lose moisture, the size of the fibers is modified, and therefore the resulting residual stresses change. The aim of this study is to analyze the effects of moisture on the different layers of paper and its effect on the flatness of the paper. To achieve this, a dimensional study was conducted after delamination of the layers, enabling the evaluation of each layer at different equilibrium moisture contents. A significantly different hygroscopic behavior was found between the top layer and the base layer, with the top layer being less hydrophilic than the base layer. There is also greater dimensional stability in coated paper compared to uncoated paper, which contributes to the dimensional stability of the final product.

Keywords: Board paper, moisture, temperature, hygroscopicity, curl, dimensional stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Consumo de embalagens por material no Reino Unido.	12
Figura 2 — Principais seções de uma máquina de fabricação de papel.	16
Figura 3 — A - Cartão com uma camada; B – Cartão multicamadas.....	17
Figura 4 — Perfil de espessura do papel cartão com destaque para as camadas cobertura, meio e base. Imagem obtida via MEV com aumento de 150x.	18
Figura 5 — Estrutura do papel cartão utilizado neste trabalho.....	19
Figura 6 — Encanoamento consiste de três componentes individuais.	24
Figura 7 — Histerese do papel.....	31
Figura 8 — Umidade de equilíbrio para UR de 50%.	33
Figura 9 — Composição do cartão.....	35
Figura 10 — Fluxograma do procedimento de delaminação.	36
Figura 11 — Corte da amostra no formato 30x30cm.	37
Figura 12 — Amostras no banho maria.....	37
Figura 13 — (a) Seleção da aresta para início da delaminação, (b) amostra parcialmente delaminada.	38
Figura 14 — Exemplos de delaminação.....	38
Figura 15 — Cilindro secador.....	39
Figura 16 — Amostras na estufa.....	39
Figura 17 — Amostras na sala climatizada.....	40
Figura 18 — Gráfico de histerese do papel para camada base, papel revestido.	45
Figura 19 — Gráfico de histerese do papel para camada cobertura, papel revestido.	46
Figura 20 — Gráfico comprimento das camadas base e cobertura papel revestido.	48
Figura 21 — Gráfico largura das camadas base e cobertura, papel revestido.....	49
Figura 22 — Gráfico de histerese do papel para camada base, papel não revestido.	51
Figura 23 — Gráfico de histerese do papel para camada cobertura, papel não revestido.....	51
Figura 24 — Gráfico comprimento das camadas base e cobertura, papel não revestido.....	53
Figura 25 — Gráfico largura das camadas base e cobertura, papel não revestido... ..	54
Figura 26 — Resultados do trabalho de A. de Ruvo et al. (1973).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — As amostras foram condicionadas a 25°C durante todo o ciclo de variação de umidade.	41
Tabela 2 — Amostras “Sem revestimento” numeradas de 1 a 12.....	41
Tabela 3 — Amostras “Com revestimento” numeradas de 1 a 12.....	42
Tabela 4 — Umidade de equilíbrio das camadas, em várias umidades relativas, papel revestido.	44
Tabela 5 — Dimensional das amostras em várias umidades relativas, papel revestido.....	47
Tabela 6 — Medidas das amostras individuais da base, papel revestido.	47
Tabela 7 — Medida das amostras individuais da cobertura, papel revestido.....	47
Tabela 8 — Coeficientes de expansão da umidade, papel revestido.....	50
Tabela 9 — Umidade de equilíbrio das camadas, em várias umidades relativas, papel não revestido.	50
Tabela 10 — Dimensional das amostras em várias umidades relativas, papel não revestido.....	52
Tabela 11 — Medidas das amostras individuais da base, papel não revestido.	52
Tabela 12 — Medida das amostras individuais da cobertura, papel não revestido...	52
Tabela 13 — Coeficientes de expansão da umidade, papel não revestido.	55
Tabela 14 — Diferença entre a umidade de equilíbrio para papel revestido e não revestido, camada base.	56
Tabela 15 — Diferença entre a umidade de equilíbrio para papel revestido e não revestido, camada base.	56
Tabela 16 — Resultados do trabalho de Per A. Larsson (2010).	58

LISTA DE SIGLAS

AKD	Dímero alquil ceteno (alkyl ketene dimer)
CD	Direção transversal da máquina (<i>cross-machine direction</i>)
CTMP	Polpação quimiotermodinâmica
ECF	Livre de Cloro Elementar (Elemental Chlorine Free)
FBB	Folding Boxboard
LPB	Liquid Packaging Board
MD	Direção longitudinal da máquina (<i>machine direction</i>)
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	FABRICAÇÃO DE PAPEL CARTÃO	15
3.2	PAPEL CARTÃO	17
3.3	ESTRUTURA DO PAPEL CARTÃO	18
3.4	QUÍMICOS EMPREGADOS NO PAPEL CARTÃO	19
3.4.1	Carga mineral	19
3.4.2	Agentes de colagem interna	20
3.4.3	Agentes de resistência a seco	22
3.5	MORFOLOGIA	23
3.6	PLANICIDADE DO CARTÃO	24
3.7	UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	28
3.8	EFEITO DA UMIDADE NO PAPEL CARTÃO	29
3.9	HISTERESE	29
3.10	COEFICIENTE DE EXPANSÃO DA UMIDADE	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	MATERIAIS	35
4.1.1	Seleção e coleta de amostras	35
4.2	MÉTODOS	36
4.2.1	Preparo das camadas individuais: delaminação.....	36
4.2.2	Preparo da Amostra.....	36
4.2.3	Delaminação.....	37
4.2.4	Condicionamento.....	40
4.2.5	Testes de Alteração Dimensional	40
5	RESULTADOS	43
5.1	CARTÃO REVESTIDO	44
5.2	CARTÃO NÃO REVESTIDO	50
5.3	CARTÃO REVESTIDO X CARTÃO NÃO REVESTIDO	55

5.4	COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS.....	57
6	CONCLUSÃO.....	59
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A embalagem desempenha um papel crítico na vida de um produto. Para começar, o objetivo de uma embalagem é proteger o produto ou o conteúdo da embalagem do meio ambiente, educar o cliente sobre o produto ou conteúdo da embalagem, como usá-lo, racionalizar a distribuição e produção, reduzir perdas e deterioração do produto, para melhorar a higiene e a segurança e, claro, vender o produto. (KUUSIPALO; LINDELL, 2013)

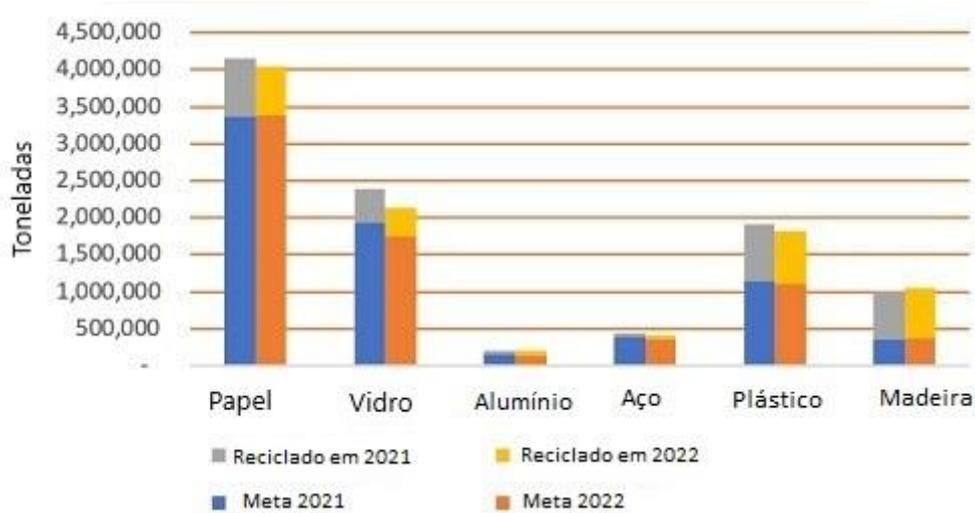
De acordo com Smithers Pira, o mercado global de embalagens está se expandindo em um ritmo acelerado e atingiu US \$ 975 bilhões em vendas em 2018. É sabido que papel, papelão, plástico, metal e vidro são os materiais de embalagem mais usados hoje. Para ilustrar a variação no uso de certos tipos de embalagens ao longo do tempo, a Figura 1 mostra o consumo do Reino Unido de embalagens por material. (REPIC, 2023)

Conforme mostrado na Figura 1, as embalagens de papel dominam o mercado. No entanto, a embalagem de plástico possui a indústria de expansão mais rápida, devido à crescente demanda por refeições preparadas e uma gama diversificada de outras embalagens de alimentos.

Não há dúvida de que os materiais de embalagem à base de fibra apresentam uma falta de estabilidade dimensional quando expostos a mudanças nas condições ambientais, como flutuações de temperatura e umidade, que são desvantagens significativas quando comparados aos plásticos. Como consequência, a atratividade e a utilidade das embalagens de papel em aplicações alimentícias são reduzidas.

A qualidade e longevidade de um produto podem ser estendidas por meio da seleção adequada de materiais de embalagem e tecnologia. Hoje em dia, as embalagens de alimentos contemporâneas costumam combinar diversos materiais de forma a maximizar as características funcionais de cada um.

Figura 1 — Consumo de embalagens por material no Reino Unido.



Fonte: (REPIC, 2023).

O papel cartão é um material comumente utilizado em diversas aplicações, como embalagens, impressão e papelaria, devido às suas propriedades físicas e versatilidade. No entanto, o papel cartão é conhecido por ser higroscópico, o que significa que ele tem a capacidade de absorver e liberar umidade do ambiente circundante. A higroscopicidade é uma propriedade fundamental do papel cartão, pois pode afetar sua estabilidade dimensional, resistência e aparência, bem como sua interação com tintas, adesivos e outros materiais.

Esta dissertação tem como objetivo analisar a higroscopicidade do papel cartão e como isso afeta a estabilidade dimensional desse material. Foi realizada uma revisão da literatura existente sobre o tema, destacando pesquisas anteriores sobre a higroscopicidade do papel cartão e suas implicações em estabilidade dimensional. Com base nesta revisão de literatura, foram planejados e realizados experimentos para avaliar a absorção e liberação de umidade do papel cartão sob diferentes condições de umidade relativa.

Ao realizar experimentos em um papel cartão de três camadas, esse estudo traz alguns aspectos difíceis de encontrar nas literaturas disponíveis, e utilizando técnicas de delaminação desenvolvidas pela empresa produtora do papel, o estudo também obteve resultados para as camadas individuais do papel.

Por meio dessas análises e experimentos, buscou-se compreender os mecanismos envolvidos na higroscopicidade do papel cartão, bem como identificar estratégias para controlar e minimizar os efeitos adversos da umidade na

estabilidade dimensional do material. Os resultados deste estudo podem fornecer dados importantes para a indústria de papel cartão, auxiliando na melhoria da qualidade e desempenho do material em diversas aplicações, fornecendo dados do comportamento individual das camadas do cartão e comparando o papel com e sem revestimento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de diferentes umidades relativas na estabilidade dimensional do papel cartão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Avaliar as propriedades higroscópicas de cada camada do papel cartão;
- b) Avaliar a estabilidade dimensional das camadas base e cobertura do papel cartão;
- c) Comparar a estabilidade dimensional de um cartão com revestimento e outro sem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FABRICAÇÃO DE PAPEL CARTÃO

A tecnologia de fabricação de papel é desenvolvida desde que foi testada pela primeira vez pelos chineses, há mais de 2.000 anos. O processo básico de fabricação de papel é comum independentemente de a celulose ser química, mecânica ou reciclada, fibra longa ou curta, celulose marrom ou celulose branqueada. (BERNIE, 2010; EK; GELLERSTED; HENRIKSEN, 2009).

A suspensão de celulose passa por processos de refino e purificação. O refino é um tratamento mecânico cujo objetivo é alterar a estrutura da fibra para obter a qualidade de papel necessária. O processo de purificação visa dividir o fluxo de fibra em dois fluxos: rejeito, que deve conter a maior parte dos materiais indesejados, e aceite, que deve conter materiais para fabricação de papel. (ANDRIONI, 2009).

Para cada tipo de papel, produtos químicos específicos são adicionados à suspensão para obter a qualidade e as propriedades ópticas, mecânicas e químicas necessárias para cada aplicação. Adiciona-se ácidos e bases para controlar o pH. A resistência a seco do papel é melhorada com a adição de amido, por outro lado, a resistência a úmido é afetada pela adição de resina. As propriedades ópticas são elhoradas usando argila, talco, pigmentos e dióxido de titânio. (EK; GELLERSTED; HENRIKSEN, 2009)

A polpa e os aditivos são liberados e misturados na caixa de entrada para formar uma pasta com consistência de 0,3% a 1,2%. A pasta é então lançada sobre a tela de formação em forma de jato, onde a água é retirada por gravidade e aplicação de vácuo. (ANDRIONI, 2009).

A máquina de papel pode ter mais de uma mesa de formação, que pode produzir mais de uma camada, como em geral ocorre para o papel cartão. (TWEDE; SELKE; SHIRES, 2015).

No final da seção de formação, o papel suporta seu próprio peso até que seja transferido para a seção de prensagem. Nessa área, por meio da estrutura porosa do rolo inferior, a retirada da umidade ocorre por meio da ação combinada de

compressão mecânica e sucção. O resultado é um papel com teor de sólidos entre 40% e 45%. (TWEDE; SELKE; SHIRES, 2015).

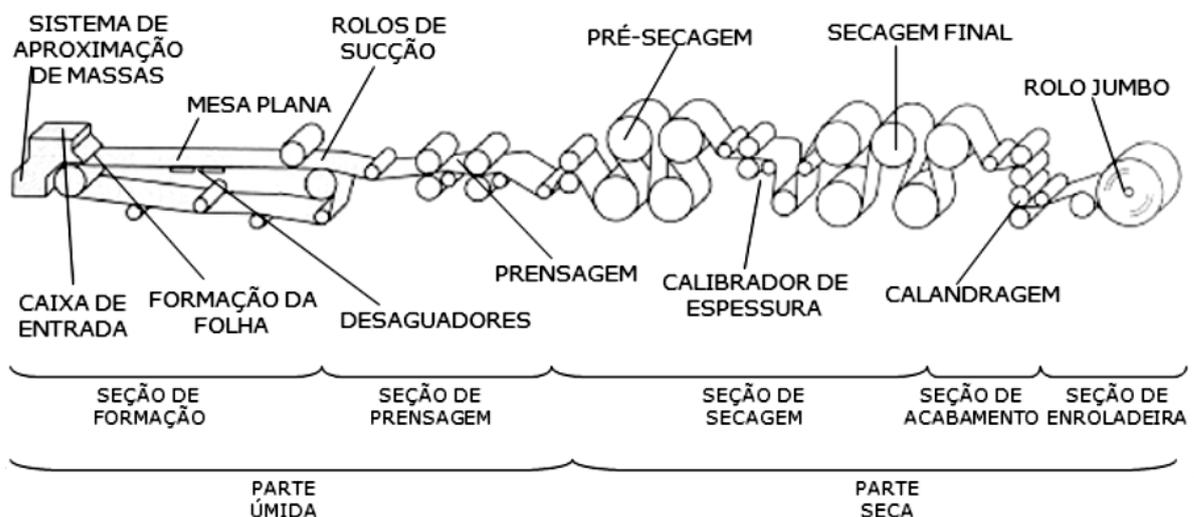
Após a prensagem, toda a umidade da superfície do papel é removida e o que resta é a umidade contida nas fibras do papel. Durante a fase de secagem, o papel entra em contato com um secador aquecido internamente a vapor. A água intrínseca nas fibras é então removida por um processo de evaporação. (IGGESUND, 2010; DEGANUTTI, 2001).

O acabamento superficial do papel é obtido por meio de um processo de calandragem, onde a espessura do papel é uniformizada. Além disso, na parte de revestimento, a tinta é aplicada na superfície do papel para conferir ao produto as características de resistência à umidade, maciez, brilho e propriedades de impressão. (ANDRIONI, 2009; IGGESUND, 2010).

O último processo na indústria de papel é chamado de enrolamento e envolve a formação de grandes rolos chamados rolos jumbo. Os rolos jumbo são rebobinados e divididos em rolos menores para atender aos requisitos do cliente. (ANDRIONI, 2009; BERNI; BAGGIO; GORLA, 2010).

A Figura 2 mostra um exemplo gráfico de fabricação de papel, que destaca a parte úmida do processo, que inclui as partes de formação e prensagem, e a parte seca, composta pelas partes de secagem, acabamento e enrolamento.

Figura 2 — Principais seções de uma máquina de fabricação de papel.



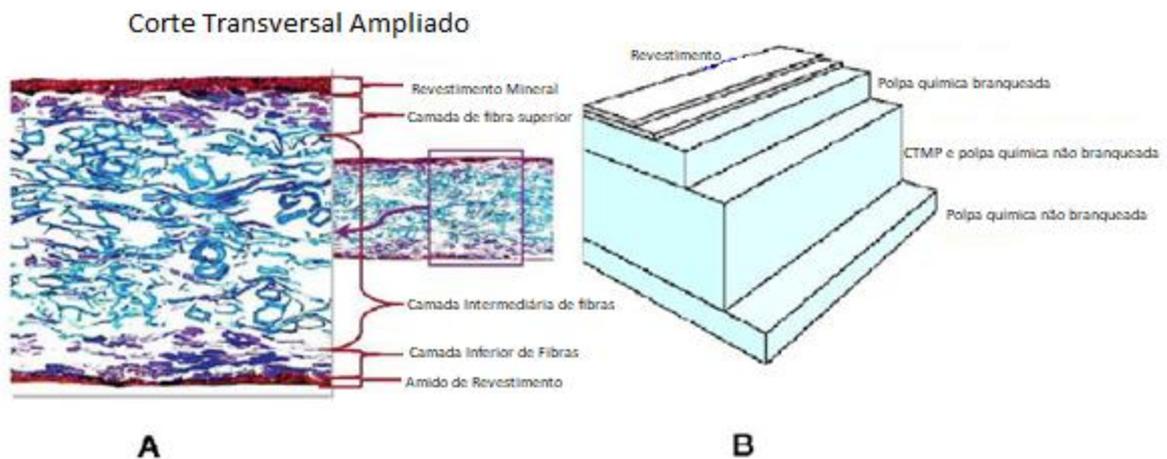
Fonte: (TWEDE; SELKE; SHIRES, 2015).

3.2 PAPEL CARTÃO

O papel é classificado como um material composto, que consiste em fibras conectadas entre si. Durante a sua produção, as fibras são preferencialmente orientadas na direção da máquina, o que dá uma distribuição desigual da orientação. Portanto, as características do cartão diferem na direção da máquina (direção da máquina-MD) e na direção transversal (direção transversal-CD) e na direção perpendicular ao plano (ZD). Essas diferenças nas propriedades caracterizam o papel cartão como um material ortotrópico. (HUANG, 2011; PERSSON, 1991).

Os cartões são mais espessos do que o papel e têm um peso maior por unidade de área. Normalmente, consiste em várias camadas, com duas camadas externas e uma a três camadas internas, conforme Figura 3.

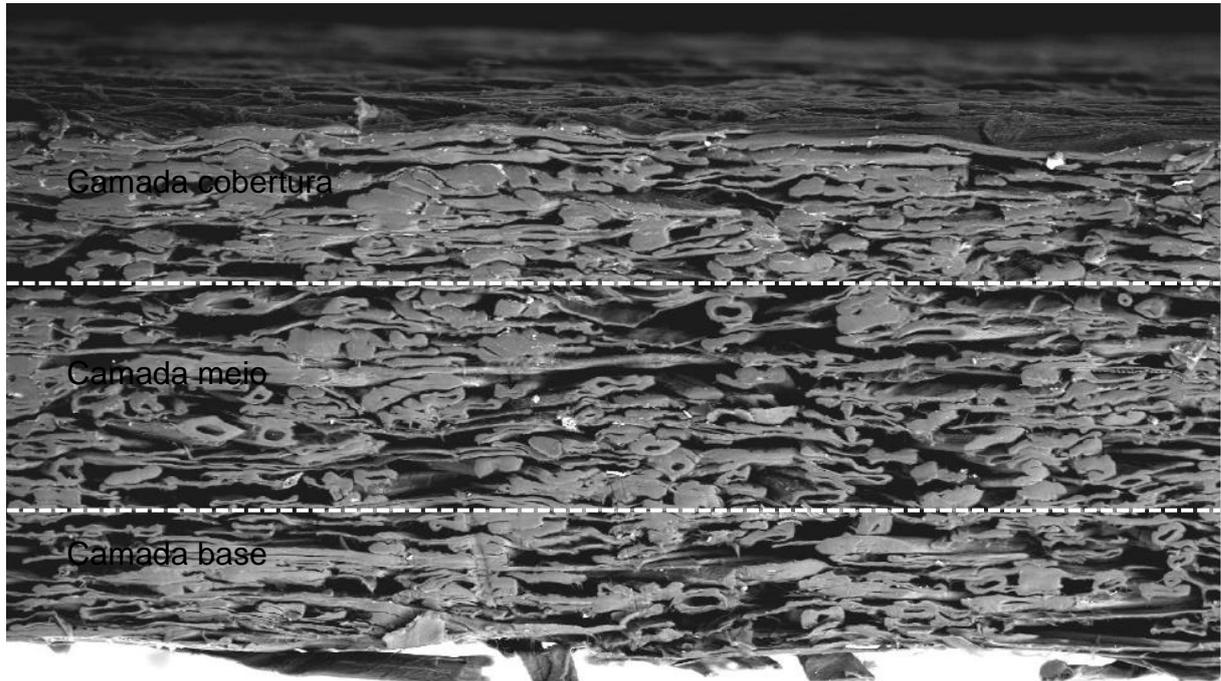
Figura 3 — A - Cartão com uma camada; B – Cartão multicamadas.



Fonte: (KUUSIPALO; LINDELL, 2013)

Múltiplas camadas conferem diferentes propriedades mecânicas ao cartão. A Figura 4 identifica as diferentes camadas de um papel cartão fabricado com três camadas: cobertura, meio e base. (HUANG, 2011; PERSSON, 1991).

Figura 4 — Perfil de espessura do papel cartão com destaque para as camadas cobertura, meio e base. Imagem obtida via MEV com aumento de 150x.

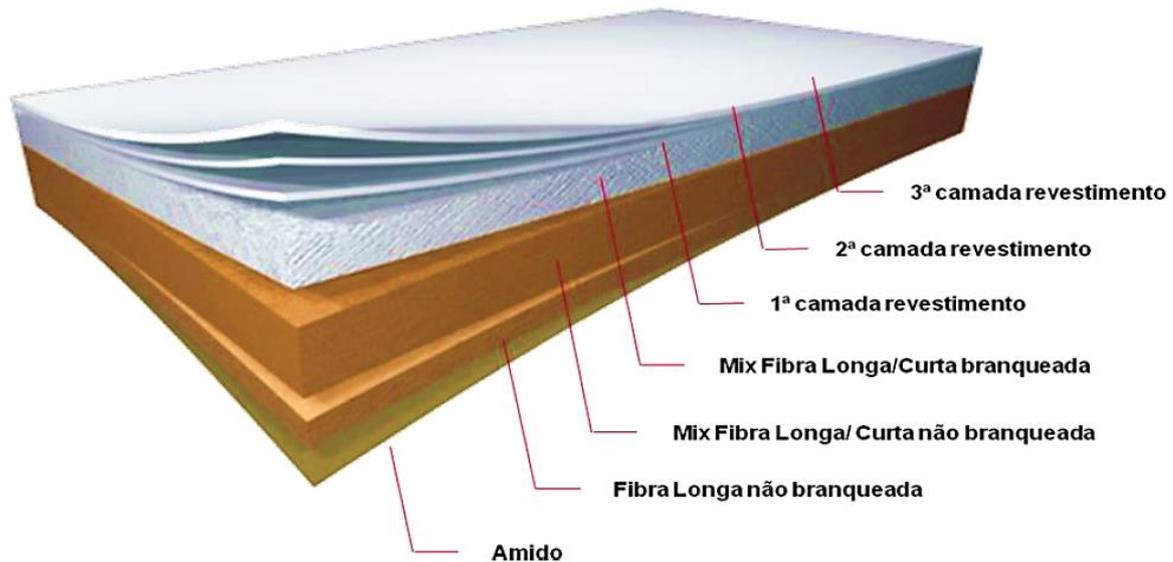


Fonte: O autor.

3.3 ESTRUTURA DO PAPEL CARTÃO

A estrutura geral do cartão em estudo é mostrada na Figura 5. O papel é feito com fibras virgens e celulose de alto rendimento obtida pelo processo Kraft. A camada de cobertura consiste em uma mistura de fibras curtas e longas branqueadas pelo processo ECF (Elemental Chlorine Free). A camada intermediária é uma mistura de fibras curtas, fibras longas e fibras do processo CTMP (Chemical Thermomechanical Pulping). A base é composta por fibras longas não branqueadas.

Figura 5 — Estrutura do papel cartão utilizado neste trabalho.



Fonte: O autor.

3.4 QUÍMICOS EMPREGADOS NO PAPEL CARTÃO

3.4.1 Carga mineral

Antes da formação do papel, é comum adicionar uma carga mineral à massa de fibras. Essa carga mineral consiste em partículas de tamanho reduzido e é adicionada em uma proporção que varia de 5% a 40% em relação à massa total da fibra.

A adição da carga mineral tem vários objetivos e benefícios para o papel. Uma das principais finalidades é proporcionar uma superfície mais uniforme ao papel. As partículas de carga mineral preenchem as irregularidades da superfície da fibra, tornando-a mais lisa e nivelada. Isso resulta em um papel com uma superfície mais homogênea, o que é importante para a qualidade de impressão.

Além disso, a carga mineral contribui para melhorar a alvura do papel. Minerais como o caulim e o carbonato de cálcio são brancos e têm a capacidade de aumentar a opacidade do papel, ou seja, sua capacidade de bloquear a passagem de luz. Isso resulta em um papel mais branco e com uma aparência mais atraente.

A opacidade do papel é particularmente importante em aplicações de impressão, pois contribui para evitar que a tinta transpareça do outro lado da folha,

garantindo uma qualidade de impressão nítida e vibrante. Além disso, a carga mineral também contribui para melhorar a suavidade do papel, conferindo uma textura mais agradável ao toque. (CAMPOS, 2010).

O caulim e o carbonato de cálcio são dois minerais comumente utilizados como carga mineral na fabricação de papel. O caulim (silicato de alumínio) é utilizado em formulações de revestimentos e é responsável pela lisura e opacidade da camada superficial dos cartões. O carbonato de cálcio também é usado em revestimentos de cartão para conferir brancura ao cartão e promover melhor absorção de tinta durante o processo de impressão. Ambos os preenchimentos minerais são quimicamente estáveis. (EK; GELLERSTED; HENRIKSEN, 2009).

É importante ressaltar que a escolha do tipo e da proporção da carga mineral a ser utilizada depende do tipo de papel a ser produzido e das propriedades desejadas. Os fabricantes de papel ajustam a formulação da carga mineral de acordo com suas necessidades específicas, buscando encontrar o equilíbrio ideal entre uniformidade, alvura, opacidade, suavidade e efeito de impressão.

3.4.2 Agentes de colagem interna

A colagem interna ocorre durante a preparação da fibra para formar o cartão, também conhecida como colagem úmida. Além de promover melhor retenção de cargas, fibras e outros materiais adicionados durante o preparo da massa, os agentes químicos aqui utilizados tornam a estrutura da fibra impermeável. (CAMPOS, 2010).

Existem duas formas de ligação interna: ácida e básica. A ácida usa um agente químico chamado cola de breu, enquanto a alcalina usa AKD (dímero de alquil ceteno) e ASA (anidrido de alkenilsuccínico). (CAMPOS, 2010).

A cola breu é uma substância utilizada em diversas aplicações, como na indústria de papel e celulose, na fabricação de adesivos, vernizes e tintas, entre outros. Ela é composta por ácidos resinosos, como o ácido abiético e o ácido pimárico, e apresenta uma coloração branca e uma estrutura amorfa.

Em condições normais de armazenamento, a cola breu não é reativa. No entanto, em condições oxidantes, sua estabilidade pode ser afetada, o que significa que ela pode sofrer alterações químicas e perder suas propriedades desejáveis.

Além disso, temperaturas acima de 100 °C também podem impactar a estabilidade da cola breu.

Uma das características importantes da cola breu é sua alta impermeabilidade, o que significa que ela possui uma baixa capacidade de absorção de água ou de outros líquidos. Além disso, o formato das partículas da cola breu facilita sua aderência à superfície das fibras.

Quando o sulfato de alumínio é adicionado à solução aquosa contendo cola breu, ocorre uma reação química em que o sulfato de alumínio se liga à superfície das fibras. Isso resulta em uma mudança na polaridade da superfície da fibra, tornando-a mais propícia à aderência da resina de alumínio presente na solução. Esse processo é conhecido como precipitação da resina de alumínio na fibra.

A precipitação da resina de alumínio na fibra pode ter diversas finalidades, dependendo da aplicação específica. Por exemplo, em alguns casos, essa precipitação pode ser desejada para melhorar as propriedades adesivas da fibra ou para conferir propriedades de resistência a líquidos ou proteção contra a umidade.

Fibra, alterando a polaridade da superfície da fibra e conferindo propriedades desejáveis. (EK; GELLERSTED; HENRIKSEN, 2009; KEMIRA, 2017).

O reagente químico AKD é um material líquido à temperatura ambiente e é amplamente utilizado na indústria de papel e celulose. Ele é conhecido por sua capacidade de formar uma camada impermeável e aderente à celulose das fibras.

O AKD é considerado estável em condições normais de armazenamento, o que significa que não sofre reações químicas significativas ou degradação em circunstâncias usuais. No entanto, é importante ressaltar que sua estabilidade química pode ser afetada em temperaturas acima de 170 °C. Nessas condições elevadas de temperatura, o AKD pode sofrer alterações em sua estrutura molecular e perder suas propriedades desejáveis.

A ligação básica entre o reagente químico AKD e a celulose ocorre por meio de uma reação de ligação covalente. A cadeia alifática do AKD reage com os grupos hidroxila presentes na celulose, formando ligações químicas estáveis. Essa reação de ligação covalente permite que o AKD se fixe firmemente à superfície da fibra de celulose.

O AKD possui um grupo hidrofóbico externo, o que significa que essa região da molécula é repelente à água. Por outro lado, o grupo hidrofílico do AKD é responsável por se ligar à celulose. Essa combinação de características hidrofóbicas

e hidrofílicas do AKD resulta na formação de uma camada impermeável na fibra de celulose.

Essa camada impermeável, formada pela aderência do AKD à celulose, impede a penetração de líquidos e confere resistência a umidade ao papel. Além disso, a camada de AKD ancorada firmemente à fibra de celulose também contribui para melhorar a qualidade da impressão e a resistência à tração do papel. (EK; GELLERSTED; HENRIKSEN, 2009; KEMIRA, 2017).

3.4.3 Agentes de resistência a seco

Os agentes de resistência a seco desempenham um papel crucial na fabricação de papel, contribuindo para fortalecer a estrutura do papel seco e melhorar sua resistência à tração, ao rasgo e ao estouro. Esses aditivos são adicionados durante o processo de fabricação do papel, ajudando a aumentar sua resistência e durabilidade.

Existem diferentes tipos de agentes de resistência a seco disponíveis, sendo os polímeros catiônicos e os agentes de ligação química os mais comumente utilizados. Esses agentes têm a capacidade de reagir com as fibras de celulose presentes no papel, formando ligações químicas que fortalecem a estrutura do papel seco.

A escolha do agente de resistência a seco adequado depende do tipo de papel que está sendo produzido e das propriedades desejadas. Os fabricantes de papel buscam um equilíbrio entre a resistência a seco e outras características do papel, como maciez e absorção de tinta, para atender às necessidades específicas de cada aplicação.

O amido é um exemplo de agente de resistência a seco que é frequentemente utilizado na fabricação de papel. O amido é um produto natural que pode ser extraído de fontes como raiz de mandioca, batata ou milho. Possui uma temperatura de transição vítrea (T_g) em torno de $55,37^\circ\text{C}$ e temperatura de fusão (T_f) de $65,38^\circ\text{C}$.

A aplicação de amido na fabricação de papel tem vários objetivos. Um deles é aumentar a resistência à tração do papel, tornando-o mais resistente a tensões mecânicas. Além disso, o amido ajuda a evitar o fenômeno de encanoamento, que é

o enrugamento do papel, e previne a formação de fibras soltas na superfície do papel. Outra vantagem é tornar o papel mais resistente à penetração de líquidos, tornando-o menos suscetível a manchas e danos causados por umidade.

O amido pode ser aplicado em diferentes fases do processo de produção de papel, como na colagem alcalina em forma de emulsão, como agente de revestimento (coating) para melhorar a superfície do papel e como agente de colagem superficial para unir as fibras. Essas aplicações ajudam a melhorar as propriedades mecânicas do papel e sua resistência geral. (JANE, 2003).

3.5 MORFOLOGIA

A morfologia da fibra é um fator crucial que influencia diretamente as características e propriedades do papel cartão. A morfologia se refere à forma, tamanho e estrutura das fibras de celulose que compõem o papel cartão. As características da fibra, como comprimento, diâmetro, espessura da parede e relação aspecto, desempenham um papel fundamental na determinação das propriedades físicas, mecânicas e de processamento do papel cartão.

As características do cartão são afetadas pela qualidade da madeira, que pode ser avaliada pelas características das fibras utilizadas no processo. (BABOSA, 2010). A morfologia da fibra tem impacto direto na formação da folha de papel, na resistência mecânica, na opacidade, na lisura da superfície e em outras propriedades do papel cartão. Diferentes características da fibra afetam a estrutura interna e a densidade do papel cartão, influenciando sua rigidez, flexibilidade e resistência à tração.

Fibras mais longas e finas tendem a formar uma estrutura mais coesa e uniforme na folha de papel, resultando em maior resistência e rigidez. Por outro lado, fibras mais curtas e grossas podem levar a um papel cartão mais macio e menos resistente. A relação aspecto, que é a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, também desempenha um papel importante nas propriedades do papel cartão. Fibras com uma relação aspecto alta podem contribuir para a formação de uma estrutura mais densa e resistente.

Além disso, a morfologia da fibra afeta a capacidade de absorção de água do papel cartão. Fibras com paredes mais espessas podem ter menor capacidade

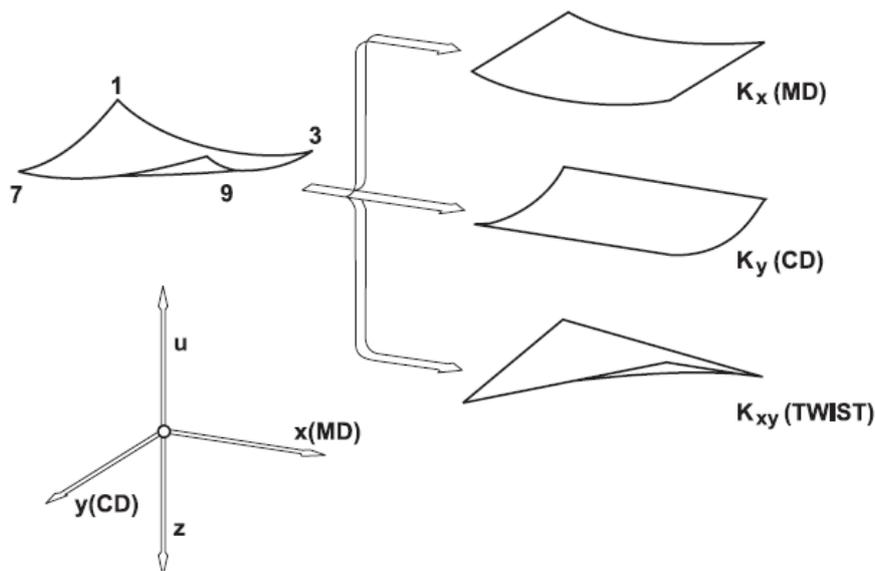
de absorção de água, enquanto fibras com paredes mais finas podem ter maior capacidade de retenção de água. Isso afeta diretamente as propriedades de umidade do papel cartão, incluindo sua resistência à umidade e comportamento de expansão. (COLODETE, 2005).

3.6 PLANICIDADE DO CARTÃO

A planicidade e a estabilidade dimensional são características importantes do cartão. A planicidade ou "forma" da folha de papel, bem como a folha de papel cortada, é crítica para o processamento eficiente do papel, incluindo a eficiência da linha de embalagem.

Encanoamento é um termo que se refere a um desvio em grande escala da planura do papel. O papel pode ser distorcido na forma de uma tigela ou cilindro. A ondulação é composta por três componentes separados, K_x , K_y e K_{xy} , que se combinam para criar a ondulação geral, conforme mostrado na Figura 6. A ondulação é geralmente produzida por não homogeneidades na direção z da expansão ou do encolhimento do papel.

Figura 6 — Encanoamento consiste de três componentes individuais.



Fonte: (LEVLIN; S ODERHJELM, 1999).

O encanoamento da folha é composto por três componentes distintos: o MD-Encanoamento K_x , o CD – encanoamento K_y , e o encanoamento diagonal K_{xy} , este último comumente chamado de “twist”. (LEVLIN; S ODERHJELM, 1999). Como consequência, são criadas tensões internas, que são liberadas pela curvatura da folha em direção ao lado que encolhe. Esses efeitos são frequentemente causados por dois fatores distintos: secagem ou umedecimento não homogêneo e por diferenças na higroexpansividade na direção z. Quando o papel é seco em apenas um lado, os dois lados não encolhem em sincronia. Como consequência, o papel dobra em direção à superfície onde a umidade da folha foi drenada por último (KAJANTO; NISKANEN, 1998). Umedecimento não homogêneo ocorre frequentemente durante a impressão ou revestimento e conversão do papel, resultando em problemas de ondulação. As fibras são higroexpansivas, o que significa que se expandem e contraem em resposta às mudanças na umidade relativa. Assim, quaisquer variáveis que aumentem a higroexpansividade do papel tendem a exacerbar os problemas de ondulação. Essas variáveis incluem o grau de refino, o teor de carga mineral e o tipo de fibra (fibras com alto teor de lignina têm menos alterações dimensionais). A contração por secagem é outro elemento significativo que afeta a higroexpansividade. Sem estresse, o papel seco encolhe. Quanto maior o encolhimento da secagem, maior a mudança dimensional causada pelas flutuações de umidade (KAJANTO; NISKANEN, 1998). O aumento do estiramento na fase de secagem resulta em maior retração da folha e, portanto, instabilidade dimensional. Ainda assim, o encolhimento é consideravelmente maior nas bordas da folha, o que torna o papel das zonas de borda da folha mais propensos a encanoar (SHANDS; 2 U. HIRN e W. BAUER - Conferência EUCEPA 'Desafios 06' - Bratislava de 8 a 9 de novembro de 2006 GENCO, 1988). Além do encolhimento geral, que contribui para o encanoamento, as variações na direção z também contribuem para o encanoamento. O cenário, por outro lado, é completamente diferente para a curvatura diagonal e a curvatura CD. Encanoamento diagonal está sempre associado à orientação da fibra. Niskanen (1993) fornece uma equação de modelo quantitativo.

$$K_{xy} = \frac{2(\phi_{TS} - \phi_{BS})(H_{MD} + H_{CD})}{t} \quad (1)$$

K_{xy} denota a intensidade da curvatura diagonal, enquanto TS e BS denota o ângulo da orientação da fibra entre os lados superior e inferior. H_{MD} e H_{CD} indicam a higroexpansividade MD e CD, respectivamente. De acordo com a equação 1, o encanoamento diagonal é causado por dois fatores distintos: orientação de fibra nos dois lados do papel e a higroexpansividade. A razão fundamental para isso é que quando a umidade relativa aumenta, as fibras encolhem cerca de 1% longitudinalmente, mas até 20% lateralmente. Como resultado, se as fibras não estiverem orientadas no mesmo ângulo nos lados superior e inferior da folha, as duas metades da folha se expandirão / contrairão em direções opostas. Isso resulta em tensões internas e uma curvatura diagonal. Embora a anisotropia da orientação da fibra não apareça na expressão (1), deve haver alguma anisotropia em pelo menos metade da folha; caso contrário, a folha se expande isotropicamente e não forma ondulações.

Para produtos gráficos, como cartões, capas de livros e pastas, a planicidade é fundamental para a apresentação do produto acabado.

O papel cartão é frequentemente exposto a circunstâncias que influenciam seu teor de umidade durante as operações de conversão e embalagem. A forma ou dimensões da folha de papelão variam de acordo com o tipo de papel, a composição de suas matérias-primas e o método de produção.

Nesses casos, a forma é uma descrição mais adequada do que planicidade. Na prática, a forma na fase de fabricação desvia da planicidade absoluta para levar em conta a mudança de forma que pode ocorrer como resultado da impressão e conversão.

O teor de umidade do papel é representado como uma porcentagem do peso total do papel. Devido à natureza higroscópica do cartão, todos os testes devem ser conduzidos em um ambiente controlado de 23° C e 50% de umidade relativa. Além disso, é fundamental que a exposição ocorra sob condições reguladas de temperatura e umidade relativa ao longo do processamento subsequente.

O teor de umidade da folha de papel é constantemente monitorado e ajustado on-line na máquina de papel usando tecnologia que fornece um alto grau de definição na direção da máquina (MD) e na direção transversal (CD) da folha de

papel. Os testes de laboratório são realizados regularmente para verificar se a calibração on-line é precisa.

Como muitas propriedades do cartão são afetadas pelo teor de umidade, é fundamental produzir em um nível que atenda aos requisitos dos processos de impressão, conversão e embalagem.

O teor de umidade é monitorado e regulado em todo o processo de secagem da máquina de papel cartão. É fundamental ter controle independente sobre o lado de impressão e o verso do cartão para garantir secagem uniforme e controle de ondulação. Além disso, o monitoramento e o controle na máquina podem ser usados para garantir um perfil de umidade igual em toda a largura da tela.

Na máquina de papel cartão, o processo sempre favorece a orientação das fibras na direção da máquina papel (MD). Isso implica que a maior parte das fibras são orientadas paralelamente à direção da máquina.

Junto com a orientação da fibra, a capacidade relativamente alta de mudança dimensional na direção transversal da fibra amplia a mudança dimensional e, portanto, a forma da folha na direção transversal (CD).

Se os dois lados da folha de papelão forem equivalentes em termos de mudança de dimensional relativa, qualquer mudança na umidade irá influenciar apenas as dimensões da folha, ou seja, expansão ou contração. Estes tipos de papel são tão próximos da folha simétrica ideal quanto possível, isto é, produtos de papel revestidos ou não revestidos de ambos os lados com composição, construção e tratamento simétricos.

Uma folha de papel com expansão relativa variável nas superfícies se flexionará em resposta a uma mudança na umidade. Produtos revestidos de uma face ou cartão revestido ou não revestido de duas faces com uma composição, estrutura ou tratamento assimétrico do cartão de base, são exemplos de tais produtos. Quase todos os cartões enquadram-se nessa categoria na prática.

Devido à alta higroscopicidade do papel cartão, várias de suas características são significativamente afetadas pela umidade relativa do ar circundante e, portanto, pelo teor de umidade do papel cartão. Como resultado da mudança no teor de umidade, as dimensões do cartão variam.

3.7 UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A umidade de equilíbrio é um parâmetro importante que descreve a quantidade de umidade que o papel retém em determinadas condições ambientais. É o ponto em que o papel atinge um equilíbrio com o ambiente circundante em termos de teor de umidade.

O teor de umidade do papel é altamente influenciado pela umidade relativa do ar. Quando o papel está exposto a um ambiente com uma determinada umidade relativa, ele absorve ou libera umidade até atingir um equilíbrio com o ambiente.

A umidade de equilíbrio em papel pode variar dependendo das características do papel, como a composição das fibras, o processo de fabricação, a presença de aditivos e o acabamento de superfície. Diferentes tipos de papel têm capacidades de adsorção e dessorção de umidade distintas, o que afeta sua umidade de equilíbrio.

A determinação da umidade de equilíbrio em papel é essencial para diversas aplicações. Na indústria gráfica e de embalagens por exemplo, o conhecimento da umidade de equilíbrio é fundamental para garantir a estabilidade dimensional do papel durante processos de impressão, evitando problemas como enrugamento, distorção de cores e dificuldade na fixação da tinta, e posteriormente no processo de conversão, onde o papel impresso será convertido em uma embalagem.

Vários estudos científicos têm sido conduzidos para investigar a umidade de equilíbrio em papel e suas influências. Um estudo relevante é o de Sapieha et al. (1985), que investigou a umidade de equilíbrio em papéis. O estudo examinou as propriedades de absorção e desabsorção de umidade do papelão e relacionou essas propriedades com o desempenho estrutural do material.

Outro estudo interessante é o de Moropoulou et al. (2003), que analisou a umidade de equilíbrio em papéis de filtro de celulose. O estudo investigou a influência de diferentes parâmetros, como a densidade do papel, a umidade relativa e a temperatura, na umidade de equilíbrio. Os resultados forneceram informações importantes sobre a relação entre a estrutura do papel e sua capacidade de retenção de umidade.

A umidade de equilíbrio em papel é o ponto em que o papel atinge um equilíbrio com o ambiente circundante em termos de teor de umidade. Sua determinação é essencial para garantir a estabilidade dimensional do papel em

várias aplicações. Estudos científicos têm investigado a umidade de equilíbrio em papel, fornecendo informações valiosas sobre as propriedades de absorção e desabsorção de umidade e suas influências nas características do papel.

3.8 EFEITO DA UMIDADE NO PAPEL CARTÃO

As fibras de celulose que compõem o papelão responderão às mudanças na umidade do ambiente. Existem duas formas de responder: a primeira é a expansão da fibra, quando a umidade é absorvida, e a segunda é o encolhimento da fibra, quando a umidade é perdida. A direção transversal da fibra é a direção na qual o tamanho muda mais. (MARK et al., 2002; ROSCOAT; BLOCH; WEIBULL, 1939).

As propriedades físicas e mecânicas do papel são muito afetadas pela umidade. Isso se deve às mudanças na força de união entre as fibras, preferencialmente formadas por ligações de hidrogênio, e às mudanças internas em sua estrutura. A circulação da água prejudica a capacidade do papel de entrar no equilíbrio de absorção de umidade, fenômeno denominado histerese. Esse efeito é devido à cristalização da superfície da fibra durante o processo de secagem. O aumento da umidade não reabrirá todos os locais que antes tinham água. A absorção de água ocorre preferencialmente nas regiões não cristalinas das fibras. Portanto, quanto maior o número de regiões amorfas com locais que podem ser usados para formar ligações de hidrogênio, maior a quantidade de absorção de água. Comparada com a polpa química, a polpa mecânica tem maior capacidade de absorção de água. (TWEDE; SELKE; SHIRES, 2015).

3.9 HISTERESE

A histerese em papel é um fenômeno complexo que ocorre quando o teor de umidade do material apresenta um comportamento não linear durante o processo de absorção e desabsorção de umidade.

Durante a absorção de umidade, o papel cartão entra em equilíbrio com o ambiente úmido ao seu redor. Nesse processo, as fibras de celulose presentes no papel cartão têm a capacidade de absorver a umidade do ar, o que faz com que as

fibras inchem e aumentem seu volume. Esse aumento de volume é acompanhado por um aumento no teor de umidade do papel cartão.

No entanto, quando o ambiente fica seco, o papel cartão não perde toda a umidade absorvida anteriormente, a Figura 7 demonstra uma curva típica de histerese do papel. Isso ocorre devido a diversos fatores, como a formação de ligações de hidrogênio entre as moléculas de água e as fibras de celulose do papel. Essas ligações de hidrogênio são estruturas intermoleculares que contribuem para a retenção da umidade no material, mesmo quando o ambiente não é mais úmido.

Essa capacidade do papel cartão de reter uma parte da umidade absorvida é a principal causa da histerese de umidade. Durante o processo de desumidificação, o papel cartão não libera toda a umidade de forma imediata, resultando em um comportamento de curva de resposta diferente durante a desumidificação em comparação com a umidificação. Mesmo em um ambiente controlado de 50% UR, um teor de umidade variável será alcançado dependendo se o cartão veio de uma região seca ou úmida. Para evitar esse problema, todos os testes devem ser conduzidos em um ambiente padronizado com umidade relativa de 50% e temperatura de +23°C. Desta forma, o material de teste será sempre avaliado nas mesmas condições de umidade. (IGGESUND)

A histerese de umidade pode ter implicações significativas no desempenho do papel cartão em diferentes aplicações. Por exemplo, em embalagens, o teor de umidade do papel cartão pode afetar sua resistência e rigidez, levando a problemas como deformação e falhas estruturais. Em produtos impressos, a histerese de umidade pode causar problemas de qualidade de impressão, como o enrugamento do papel e a distorção das cores.

A compreensão da histerese em papel cartão é fundamental para otimizar sua utilização e minimizar os efeitos adversos desse fenômeno. Pesquisas científicas têm sido realizadas para investigar os mecanismos envolvidos na histerese de umidade e desenvolver estratégias para controlar e minimizar seus efeitos.

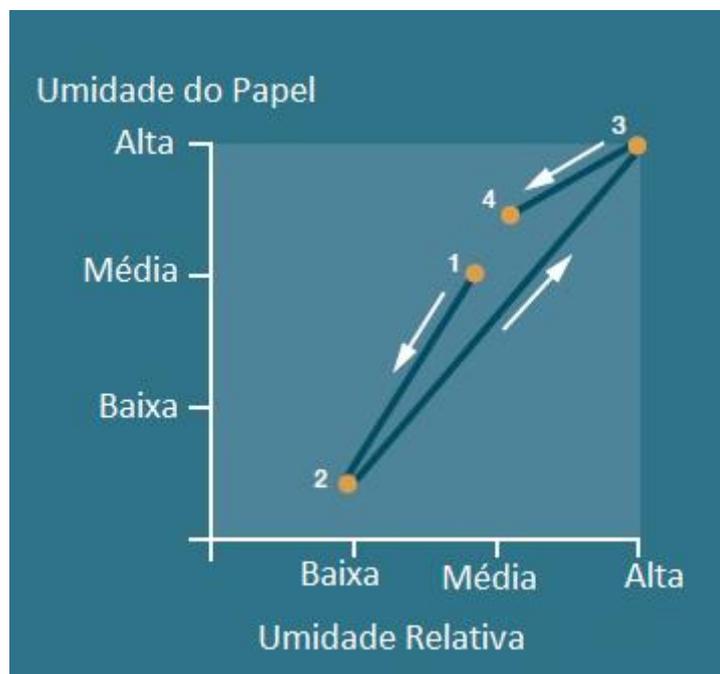
Estudos como o de Hill et al. (2009) analisaram a influência da histerese de umidade nas propriedades das fibras naturais, explorando os efeitos da umidade nas propriedades físicas e mecânicas do material.

Outros trabalhos, como o de Hubbe et al. (2009), discutem a histerese de umidade em materiais de celulose, incluindo o papel cartão, abordando os

mecanismos envolvidos nesse fenômeno e as estratégias para mitigar seus efeitos indesejados.

Em resumo, a histerese de umidade em papel cartão é um fenômeno complexo em que o material não libera toda a umidade absorvida durante a desumidificação. Compreender esse comportamento é crucial para garantir a qualidade e a durabilidade do papel cartão em diversas aplicações e desenvolver estratégias para minimizar os efeitos adversos da histerese de umidade.

Figura 7 — Histerese do papel.



Fonte: (IGGESUND).

3.10 COEFICIENTE DE EXPANSÃO DA UMIDADE

O coeficiente de expansão de umidade em papel é uma medida que descreve a resposta dimensional do papel às variações no teor de umidade. Essa propriedade é especialmente relevante em aplicações onde a estabilidade dimensional do papel é crucial, como na indústria gráfica, em impressões de alta qualidade e em papéis para embalagem.

Quando o papel absorve umidade do ambiente, suas fibras de celulose têm a tendência de se expandir, resultando em um aumento nas dimensões do papel. Por outro lado, quando o papel perde umidade, as fibras se contraem, o que leva a

uma diminuição nas dimensões. Esse comportamento de expansão e contração é governado pelo coeficiente de expansão de umidade do papel.

O coeficiente de expansão de umidade é uma medida da mudança percentual nas dimensões do papel em relação à mudança no teor de umidade. É expresso em porcentagem por porcentagem. Por exemplo, um coeficiente de expansão de umidade de 0,1%/1% indica que para cada aumento de 1% no teor de umidade, espera-se um aumento de 0,1% nas dimensões do papel.

A variação dimensional do papel devido à umidade pode ter impactos significativos em várias aplicações. Na indústria gráfica, por exemplo, uma variação dimensional excessiva pode causar problemas de registro de impressão, resultando em imagens borradas ou distorcidas. Em papéis para embalagem, a estabilidade dimensional é importante para garantir um encaixe preciso e funcionalidade adequada dos produtos embalados.

O coeficiente de expansão de umidade pode variar dependendo do tipo de papel, do método de fabricação e da composição da fibra. Papéis com alta proporção de fibras naturais, como celulose, tendem a ter coeficientes de expansão de umidade maiores do que papéis com aditivos ou fibras sintéticas. Além disso, o coeficiente de expansão de umidade pode ser afetado por fatores ambientais, como temperatura e umidade relativa.

Para garantir a estabilidade dimensional do papel em diferentes condições de umidade, os fabricantes podem adotar medidas como a aplicação de revestimentos à base de polímeros ou o uso de aditivos específicos que reduzem a absorção de umidade pelas fibras de celulose.

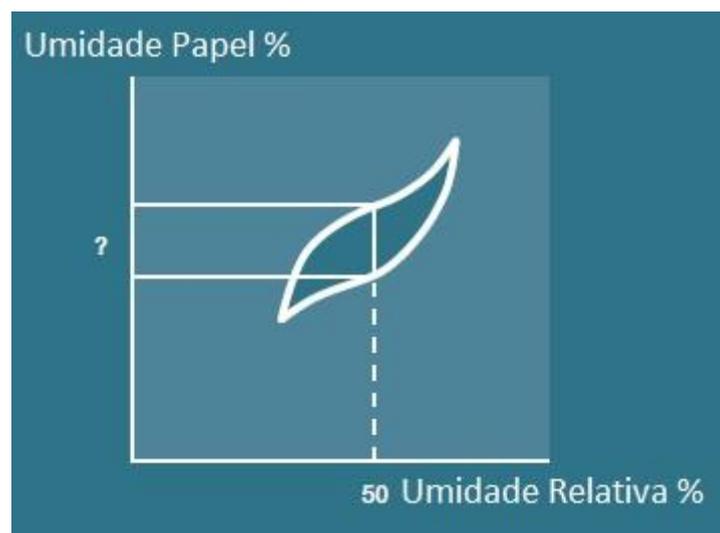
Pesquisas científicas têm sido conduzidas para investigar e compreender o coeficiente de expansão de umidade em papel. Um estudo relevante é o de Rodrigues Fioritti. (2021), que analisou a influência da umidade relativa nas propriedades dimensionais do papel. O estudo investigou diferentes tipos de papel e identificou correlações entre as características do papel e suas variações dimensionais com a umidade. Essas informações são úteis para selecionar o papel mais adequado para aplicações específicas, considerando as demandas de estabilidade dimensional.

Outro estudo importante é o de Lindström et al. (2005), que abordou as propriedades mecânicas e dimensionais do papel em relação à umidade. O estudo explorou os efeitos da umidade relativa na deformação do papel e no coeficiente de

expansão de umidade. Os resultados forneceram informações valiosas sobre a influência da umidade no comportamento dimensional do papel.

O coeficiente de expansão de umidade (β) em papel descreve a variação dimensional do papel em resposta a mudanças no teor de umidade, Equação 2. Sua magnitude depende das características do papel, como a composição das fibras e o processo de fabricação. O coeficiente de expansão de umidade de um cartão típico é três vezes maior na direção transversal (CD) do que na direção da máquina (MD). É 10 vezes maior na direção da espessura do que na direção transversal. Novamente, o efeito de histerese está em ação aqui, uma vez que o teor de umidade do papelão depende se ele foi levado ao equilíbrio climático em um ambiente seco ou úmido.

Figura 8 — Umidade de equilíbrio para UR de 50%.



Fonte: (IGGESUND).

A 50% de umidade relativa, o teor de umidade de equilíbrio do cartão pode variar entre as partes superior e inferior da curva de histerese, conforme Figura 8. Uma embalagem à prova de umidade protege o cartão da exposição ao tempo e mudanças de umidade.

É fundamental que o papel cartão seja manuseado e mantido adequadamente durante todo o processo, desde a impressão e conversão até a embalagem e uso.

$$\beta_{MC} = \frac{\Delta L}{L\Delta MC(\%)} \times 100(\%) \quad (2)$$

β_{MC} = Coeficiente de expansão de umidade.

ΔL = Mudança de comprimento devido a expansão por absorção de umidade.

ΔMC = Mudança no conteúdo de umidade da amostra.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

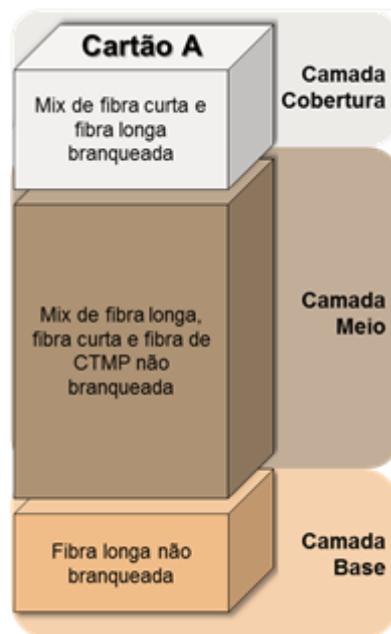
4.1 MATERIAIS

4.1.1 Seleção e coleta de amostras

Um tipo de papel cartão foi escolhido para análise, sendo a gramatura nominal do produto de 276 g/m². Duas condições desse produto foram coletadas, com revestimento e sem revestimento. O revestimento é composto por látex, caulim e carbonato e possui uma gramatura nominal de 20g/m².

A Figura 9 apresenta a composição do cartão alvo do estudo.

Figura 9 — Composição do cartão.



Fonte: O autor.

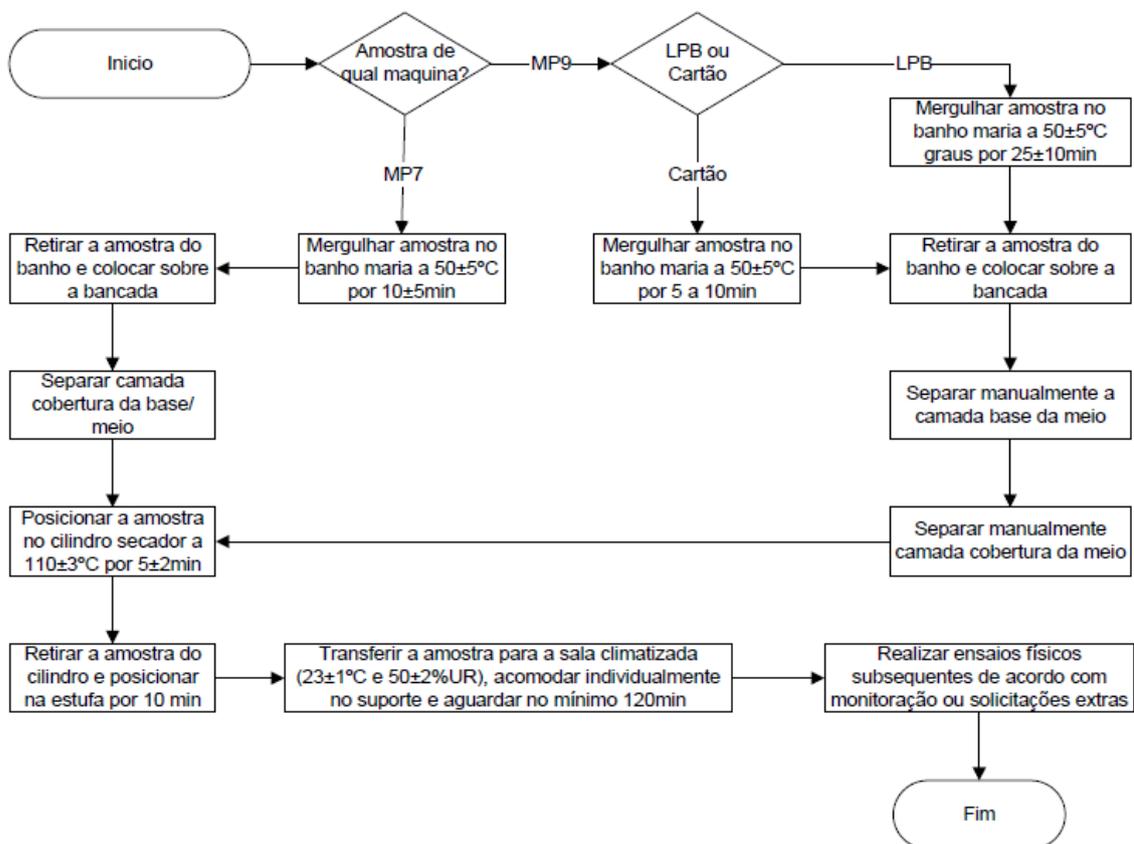
Como o objetivo do trabalho é determinar a influência da umidade na higroexpansividade do papel, as diferenças de composição das camadas podem influenciar em como o papel se expande ou contrai quando sujeito a mudanças de umidade. Por esse motivo, além de testar o papel composto com as 3 camadas, as camadas foram delaminadas para serem testadas individualmente e seu comportamento será posteriormente analisado.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Preparo das camadas individuais: delaminação

A fim de tornar possíveis as análises, cada camada que compõe o cartão foi separada uma da outra. A separação foi realizada via processo de delaminação a úmido, procedimento desenvolvido pela Klabin. O procedimento segue o fluxograma da Figura 10, os passos serão descritos nesta seção.

Figura 10 — Fluxograma do procedimento de delaminação.



Fonte: O autor.

4.2.2 Preparo da Amostra

Amostras foram cortadas com auxílio de um formato de metal, com dimensão de 30x30cm (Figura 11). A posição da amostra deve ser preparada de acordo com o procedimento a ser ensaiado.

Figura 11 — Corte da amostra no formato 30x30cm.

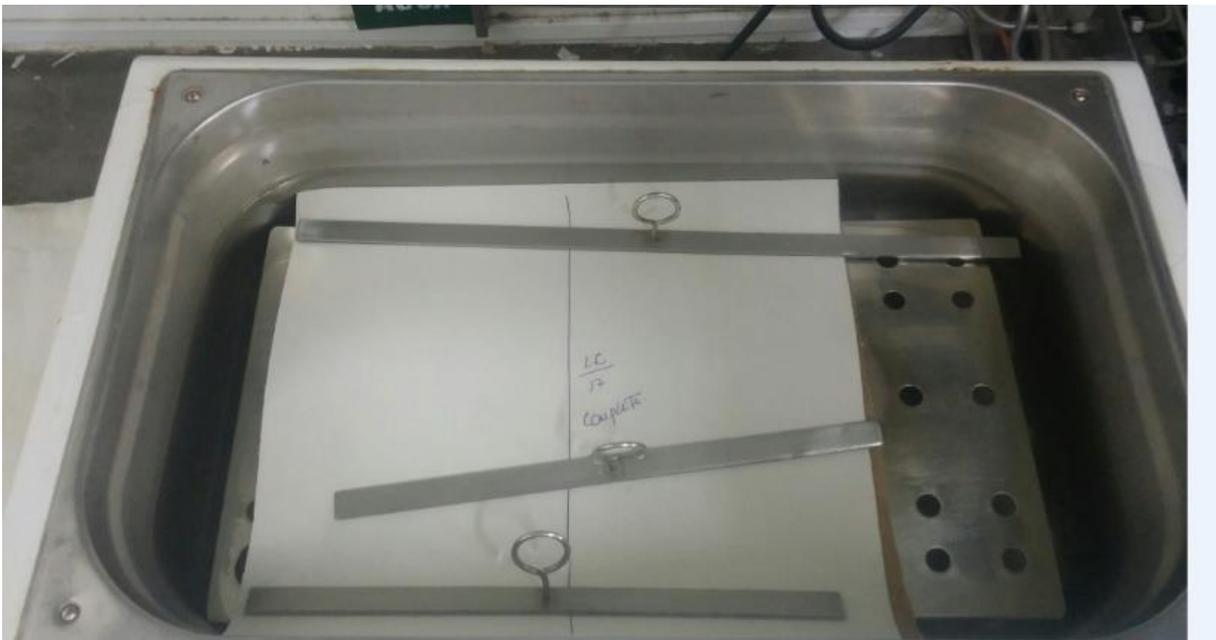


Fonte: O autor.

4.2.3 Delaminação

Para realizar a delaminação, a amostra de papel cartão no formato 30x30cm foi posicionada no banho maria, conforme Figura 12.

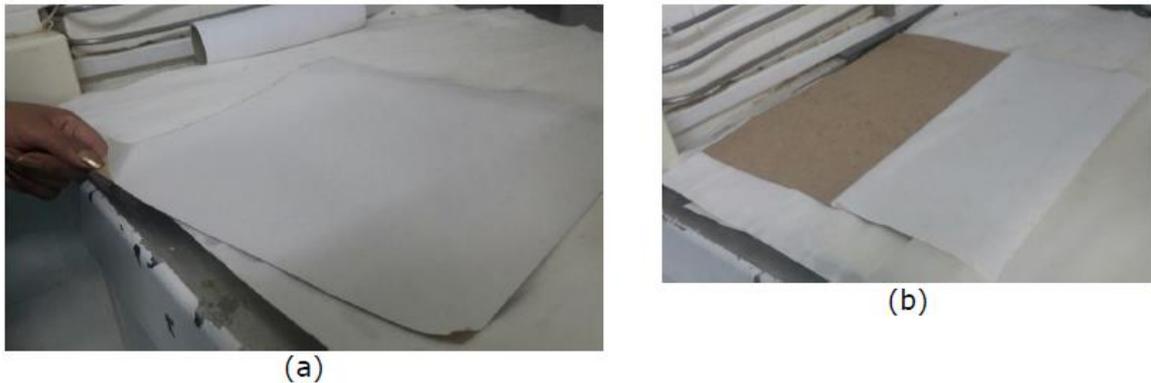
Figura 12 — Amostras no banho maria.



Fonte: O autor.

A seguir, foi selecionada a aresta da amostra a qual possuía maior facilidade para separação das camadas para iniciar a separação, conforme indicado na Figura 13.

Figura 13 — (a) Seleção da aresta para início da delaminação, (b) amostra parcialmente delaminada.



Fonte: O autor.

Figura 14 — Exemplos de delaminação.



Fonte: O autor.

Após delaminação, avaliava-se a integridade da camada delaminada (Figura 14) e, caso necessário, ajustava-se o tempo de banho para não danificar a camada. Caso a amostra delaminada não estivesse danificada, era seca no cilindro secador conforme Figura 15.

Figura 15 — Cilindro secador.



Fonte: O autor.

As amostras secas no cilindro eram então colocadas em estufa à temperatura de 105 ± 2 °C, conforme Figura 16.

Figura 16 — Amostras na estufa.



Fonte: O autor.

Após secagem em estufa, as amostras eram ambientadas em sala climatizada, conforme Figura 17.

Figura 17 — Amostras na sala climatizada.



Fonte: O autor.

4.2.4 Condicionamento

Devido ao comportamento higroscópico do papel, as folhas de papel cartão e as camadas individuais foram climatizadas conforme especificado em norma TAPPI 402, 2013. Todas as análises experimentais foram realizadas em ambiente controlado a $23,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ e $50,0\% \pm 2,0\%$ de umidade relativa.

4.2.5 Testes de Alteração Dimensional

Após o condicionamento, realizou-se a medição inicial de cada corpo-de-prova amostrado e identificado. Os corpos-de-prova foram levados à câmara climática, ajustada previamente conforme Tabela 1, que ilustra as condições climáticas a que os conjuntos de amostras foram expostos. Cada conjunto de prova é composto por 12 amostras, sendo 3 amostras da camada cobertura, 3 amostras da camada base, 3 amostras da camada meio e 3 amostras do cartão como um todo. Os conjuntos de amostras, após 24h de climatização, foram medidos em termos de largura, comprimento e espessura e determinada sua massa. Após as medições em todos os corpos-de-prova, a câmara climática foi ajustada para o próximo valor de ensaio para climatizar as amostras durante 24h e novas medidas

de dimensões e massa. Repetindo até que todas as condições climáticas fossem atingidas. As dimensões dos corpos-de-prova estão na Tabela 2 e Tabela 3.

Os dados dimensionais e de massa foram registrados para realizar cálculos de variações de área e volume, além de umidade. Os gráficos de histerese serão construídos com base na variação da umidade dos corpos-de-prova.

Após o ciclo completo de incremento e redução de umidade relativa para uma determinada temperatura fixa 25°C, a câmara climática foi ajustada para o valor imediatamente superior, começando de valor menor.

Tabela 1 — As amostras foram condicionadas a 25°C durante todo o ciclo de variação de umidade.

Umidade Relativa	Temperatura	Tempo Residência
30%	25°C	24h
40%	25°C	24h
50%	25°C	24h
60%	25°C	24h
70%	25°C	24h
80%	25°C	24h
70%	25°C	24h
60%	25°C	24h
50%	25°C	24h
40%	25°C	24h
30%	25°C	24h

Fonte: O autor.

Tabela 2 — Amostras “Sem revestimento” numeradas de 1 a 12.

Identificação	Amostra	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Sem Revestimento	1	100	150
Sem Revestimento	2	100	150
Sem Revestimento	3	100	150
Sem Revestimento	4	100	150
Sem Revestimento	5	100	150
Sem Revestimento	6	100	150
Sem Revestimento	7	100	150
Sem Revestimento	8	100	150
Sem Revestimento	9	100	150
Sem Revestimento	10	100	150
Sem Revestimento	11	100	150
Sem Revestimento	12	100	150

Fonte: O autor.

Tabela 3 — Amostras “Com revestimento” numeradas de 1 a 12.

Identificação	Amostra	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Com Revestimento	1	100	150
Com Revestimento	2	100	150
Com Revestimento	3	100	150
Com Revestimento	4	100	150
Com Revestimento	5	100	150
Com Revestimento	6	100	150
Com Revestimento	7	100	150
Com Revestimento	8	100	150
Com Revestimento	9	100	150
Com Revestimento	10	100	150
Com Revestimento	11	100	150
Com Revestimento	12	100	150

Fonte: O autor.

5 RESULTADOS

Esta dissertação tem como objetivo analisar a higroscopicidade do papel cartão, com foco nas camadas base e cobertura, tanto para o papel revestido comercializado pela Klabin unidade Monte Alegre quanto para o papel não revestido, o qual não é comercializado pela empresa. Além disso, será realizada uma comparação entre os dois papéis, buscando identificar as possíveis razões para o comportamento observado em cada condição.

A primeira seção do trabalho abordará os resultados obtidos para o papel revestido comercializado pela Klabin unidade Monte Alegre. Serão discutidos os efeitos da umidade nas camadas base e cobertura, analisando sua influência na estabilidade dimensional e outras propriedades relevantes.

Na segunda seção, serão apresentados os resultados para o papel não revestido. Serão explorados os efeitos da umidade nas camadas base e cobertura, com foco na estabilidade dimensional e outras características importantes.

A terceira seção será dedicada à comparação entre os dois papéis, levando em consideração os resultados obtidos em cada condição. Serão discutidas as diferenças observadas nas propriedades de absorção e liberação de umidade, estabilidade dimensional e demais características relevantes. A partir dessas análises comparativas, serão sugeridas possíveis razões para o comportamento distinto dos papéis.

Os objetivos específicos deste trabalho são identificar o efeito da umidade nas camadas base e cobertura do cartão. Além disso, busca-se avaliar a estabilidade dimensional dessas camadas e, a partir desses dados, analisar a estabilidade dimensional do produto final, ou seja, o cartão com três camadas revestido.

Ao atingir esses objetivos, espera-se contribuir para o conhecimento sobre a higroscopicidade e estabilidade do papel cartão e suas implicações na qualidade e desempenho do material. Os resultados obtidos poderão auxiliar a indústria de papel cartão na compreensão dos fatores que influenciam a adsorção e liberação de umidade, bem como na melhoria dos processos de fabricação e desenvolvimento de produtos mais estáveis dimensionalmente.

5.1 CARTÃO REVESTIDO

Para o cartão revestido, três amostras de cada camada foram submetidas a variação de umidade relativa e após a estabilização da umidade nas camadas, os resultados das médias das três camadas, são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 — Umidade de equilíbrio das camadas, em várias umidades relativas, papel revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Umidade Equilíbrio Base %	4,628	4,785	5,103	6,081	7,762	9,671	8,247	7,067	6,221	5,445	4,750
Umidade Equilíbrio Cobertura %	1,640	2,015	2,140	2,977	3,995	5,311	4,212	3,441	2,612	2,298	1,559
Diferença %	2,987	2,770	2,963	3,104	3,767	4,360	4,035	3,626	3,609	3,147	3,191

Fonte: O autor.

Nos resultados obtidos nas análises da higroscopicidade do papel cartão, observa-se uma diferença significativa na umidade de equilíbrio entre a camada base e a camada de cobertura. Essa discrepância pode ser atribuída à composição fibrosa distinta de cada camada e ao processo de colagem interna do papel, que também apresenta características diferentes.

No caso do papel revestido comercializado pela Klabin unidade Monte Alegre, a empresa utiliza um processo de colagem interna mais intensivo na camada cobertura em comparação com a camada base. Essa estratégia de fabricação tem um impacto significativo na umidade de equilíbrio alcançada por cada camada. A camada cobertura, devido à sua maior colagem interna, tende a restringir a absorção e a liberação de umidade, resultando em uma umidade de equilíbrio menor em comparação com a camada base.

Essas diferenças na colagem interna e composição fibrosa entre as camadas do papel cartão podem explicar as variações observadas nos resultados. A camada cobertura, com maior densidade e maior colagem interna, apresenta uma menor taxa de absorção e liberação de umidade, proporcionando maior estabilidade dimensional em relação à camada base.

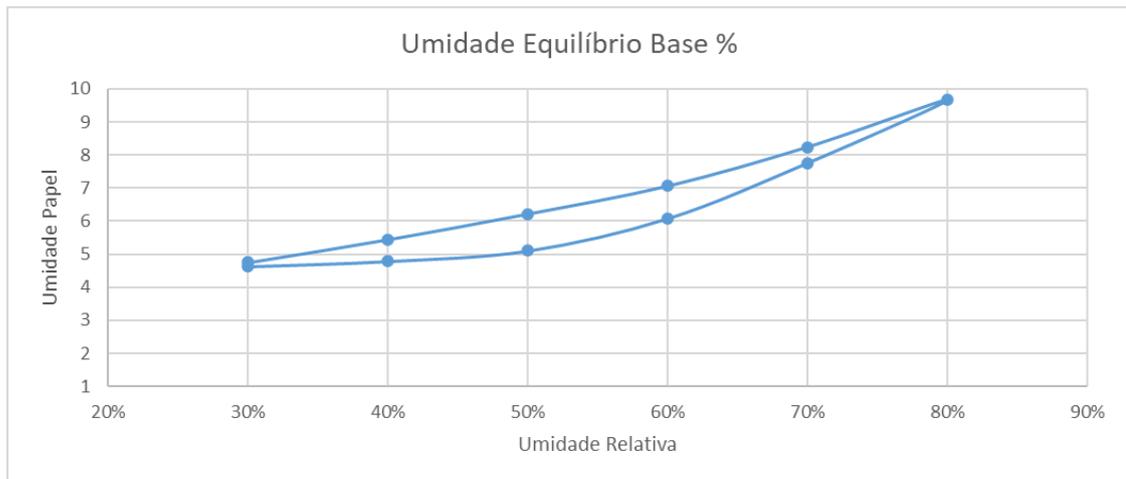
Essas informações são relevantes tanto para a empresa fabricante dos papéis quanto para a compreensão dos fatores que influenciam a higroscopicidade do papel cartão. Ao reconhecer a influência da colagem interna nas propriedades de adsorção e dessorção, a indústria poderá otimizar seus processos de fabricação,

bem como desenvolver estratégias mais eficazes para controlar a estabilidade dimensional do produto final.

A compreensão dessas diferenças entre as camadas do papel cartão e seus efeitos na higroscopicidade é fundamental para a seleção adequada do material em diferentes aplicações.

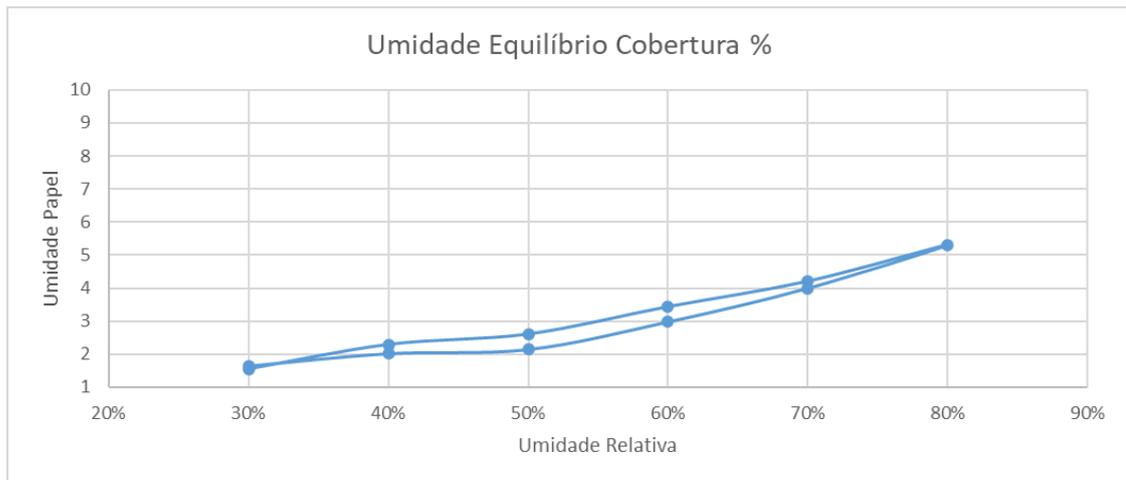
A Figura 18 e a Figura 19 representam os dados da Tabela 4 em formato gráfico. Nesses gráficos é possível observar a histerese das camadas base e cobertura, também nota-se a média de umidade de equilíbrio mais elevada para camada base. Apesar da média da umidade de equilíbrio ser diferente para ambas as camadas, a diferença entre o mínimo e máximo para a base é de aproximadamente 5% e para a camada cobertura é de aproximadamente 4,5% o que podemos considerar bem próximo para materiais diferentes e com médias discrepantes.

Figura 18 — Gráfico de histerese do papel para camada base, papel revestido.



Fonte: O autor.

Figura 19 — Gráfico de histerese do papel para camada cobertura, papel revestido.



Fonte: O autor.

Após a coleta das amostras, procedeu-se à medição do comprimento e da largura de cada uma delas. A média dessas medidas foi calculada e está apresentada na Tabela 5. No entanto, a interpretação direta dos valores numéricos na tabela pode ser cansativa e complexa, uma vez que as variações dimensionais são mínimas. Nesse sentido, uma abordagem mais visual e intuitiva por meio de análises gráficas pode ser extremamente útil.

A fim de facilitar a compreensão dos resultados, a Tabela 6 e a Tabela 7 foram elaboradas para apresentar os dimensionais de cada uma das três amostras das camadas base e cobertura, respectivamente. Essas tabelas fornecem uma visão mais detalhada das variações dimensionais dentro de cada conjunto de amostras, permitindo uma análise mais precisa e comparativa.

Ao examinar os dados contidos nessas tabelas, é possível observar de forma clara e concisa as diferenças dimensionais entre as amostras das camadas base e cobertura. Essas informações são essenciais para compreender a estabilidade dimensional de cada camada e, posteriormente, avaliar a estabilidade dimensional do produto final, o cartão com três camadas revestido.

Além disso, as tabelas fornecem uma base sólida para a análise gráfica dos resultados, possibilitando a identificação de tendências, padrões e eventuais discrepâncias nas dimensões das amostras. Essa abordagem visual facilita a comparação entre os diferentes conjuntos de amostras e auxilia na identificação de possíveis fatores que influenciam a estabilidade dimensional do papel cartão.

Tabela 5 — Dimensional das amostras em várias umidades relativas, papel revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Base (mm)	99,397	99,529	99,554	99,634	99,727	99,744	99,214	99,081	98,992	98,823	98,672
Comprimento - Base (mm)	148,430	148,507	148,641	148,820	148,847	149,064	148,337	148,162	147,961	147,818	147,579
Largura - Cobertura (mm)	99,043	99,069	99,206	99,263	99,262	99,274	98,938	98,874	98,840	98,676	98,618
Comprimento - Cobertura (mm)	149,053	149,073	149,079	149,117	149,201	149,302	149,173	149,087	149,000	148,996	149,006

Fonte: O autor.

Tabela 6 — Medidas das amostras individuais da base, papel revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Base (mm)	99,907	99,877	99,950	100,073	100,173	99,987	99,263	99,217	99,170	98,970	99,160
Comprimento - Base (mm)	148,393	148,457	148,400	148,400	148,573	148,880	147,723	147,523	147,390	147,170	147,227
Largura - Base (mm)	97,887	98,287	98,337	98,340	98,487	98,580	98,263	97,817	97,593	97,493	97,387
Comprimento - Base (mm)	148,600	148,680	148,577	148,887	148,747	148,820	148,320	148,310	148,020	147,990	147,810
Largura - Base (mm)	100,397	100,423	100,377	100,490	100,520	100,667	100,117	100,210	100,213	100,007	99,470
Comprimento - Base (mm)	148,297	148,383	148,947	149,173	149,220	149,493	148,967	148,653	148,473	148,293	147,700

Fonte: O autor.

Tabela 7 — Medida das amostras individuais da cobertura, papel revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Cobertura (mm)	97,913	97,333	97,567	97,727	97,703	97,700	97,497	97,383	97,747	97,083	97,030
Comprimento - Cobertura (mm)	149,247	148,603	148,843	148,837	148,897	149,227	149,180	149,043	148,907	148,720	148,687
Largura - Cobertura (mm)	99,667	100,427	100,443	100,417	100,400	100,420	100,103	100,028	99,487	99,827	99,793
Comprimento - Cobertura (mm)	149,350	149,163	149,317	149,553	149,757	149,657	149,410	149,372	149,333	149,407	149,383
Largura - Cobertura (mm)	99,550	99,447	99,607	99,645	99,683	99,703	99,213	99,212	99,287	99,117	99,030
Comprimento - Cobertura (mm)	148,563	149,453	149,077	148,962	148,950	149,023	148,930	148,845	148,760	148,860	148,947

Fonte: O autor.

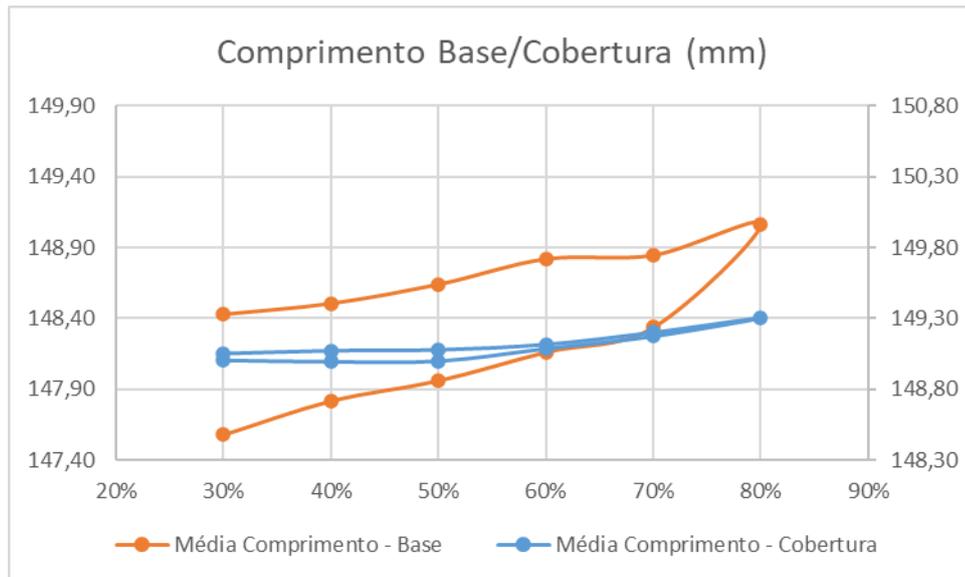
A análise comparativa das variações dimensionais entre a camada base e a camada de cobertura do papel cartão, quando expostas a mudanças na umidade relativa, revelou diferenças significativas. Isso pode ser observado claramente na Figura 20, que representa as alterações no comprimento das duas camadas.

De acordo com os resultados apresentados, a camada base do papel demonstrou uma maior susceptibilidade a variações na umidade relativa, resultando em uma expansão ou contração mais pronunciada em relação à camada de cobertura. Essa diferença na resposta dimensional das fibras pode ter implicações importantes para a estabilidade dimensional do papel final.

A variação assimétrica entre as camadas base e cobertura pode levar a problemas de instabilidade dimensional, como o encanoamento ou o encanoamento diagonal. Essas deformações indesejadas podem ocorrer devido às tensões internas geradas pelas diferentes respostas das camadas à umidade.

É importante destacar que a orientação das fibras do papel também desempenha um papel significativo nesse processo. Dependendo da orientação das fibras, o encanoamento pode ocorrer tanto na direção transversal quanto na diagonal, afetando a integridade e a qualidade do papel final.

Figura 20 — Gráfico comprimento das camadas base e cobertura papel revestido.



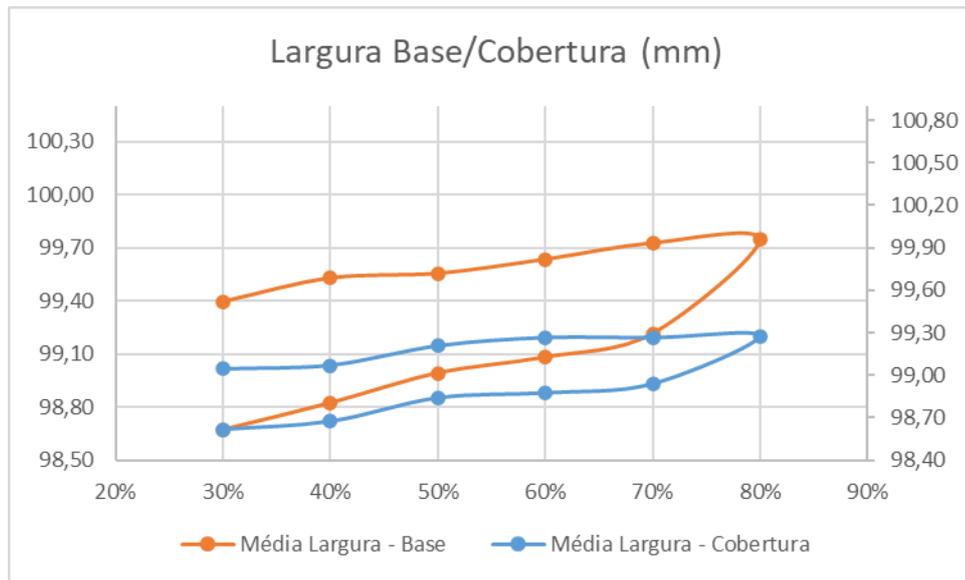
Fonte: O autor.

Ao analisar as variações dimensionais em relação à largura das camadas base e cobertura do papel cartão, expostas a mudanças na umidade relativa, pode-se observar um comportamento diferente em comparação com as variações no comprimento. Isso pode ser observado claramente Figura 21.

Conforme os resultados, nota-se que as alterações dimensionais tanto na camada base quanto na camada cobertura ocorreram de maneira mais semelhante em relação à largura. No entanto, ainda há uma diferença significativa entre as curvas, com a camada base apresentando uma dilatação dimensional ligeiramente maior em comparação com a camada cobertura.

Essa diferença no comportamento higroscópico entre as camadas do papel cartão tem um impacto direto na estabilidade dimensional do produto final. Variações dimensionais assimétricas entre as camadas podem resultar em distorções, deformações e instabilidades, comprometendo a qualidade e a aparência do papel.

Figura 21 — Gráfico largura das camadas base e cobertura, papel revestido.



Fonte: O autor.

Assumindo uma simplificação e considerando que o cartão final é composto por 3 planos constituídos de materiais e propriedades diferentes, e ainda assumindo-se que a camada meio não possui tanta influência sobre as tensões, por estar no meio dos planos exteriores, assume-se que a maior dilatação ou contração da camada base irá fletir a camada cobertura na forma de encanoamento, conforme Figura 6, a forma de encanoamento será definida também pela orientação das fibras nas camadas individuais do produto final. O coeficiente de expansão da umidade, conforme Equação 2 e dados da Tabela 5 foi calculado para a camada base e cobertura, para o ciclo de incremento de 30% de umidade relativa para 80% de umidade relativa.

Os resultados encontrados estão na Tabela 8, e reforçam a análise gráfica. Os coeficientes encontrados para alteração dimensional da largura são próximos, diferindo em 0,6% aproximadamente. Já o coeficiente para comprimento difere por aproximadamente 3,9%, gerando uma instabilidade dimensional no produto final quando exposto a diferentes umidades relativas.

Tabela 8 — Coeficientes de expansão da umidade, papel revestido.

Coeficiente Expansão	Valor
β Largura Base	0,069%
β Comprimento Base	0,085%
β Largura Cobertura	0,064%
β Comprimento Cobertura	0,045%

Fonte: O autor.

5.2 CARTÃO NÃO REVESTIDO

Para o cartão não revestido, três amostras de cada camada foram submetidas a variação de umidade relativa e após a estabilização da umidade nas camadas, os resultados das médias das três camadas, são exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 — Umidade de equilíbrio das camadas, em várias umidades relativas, papel não revestido.

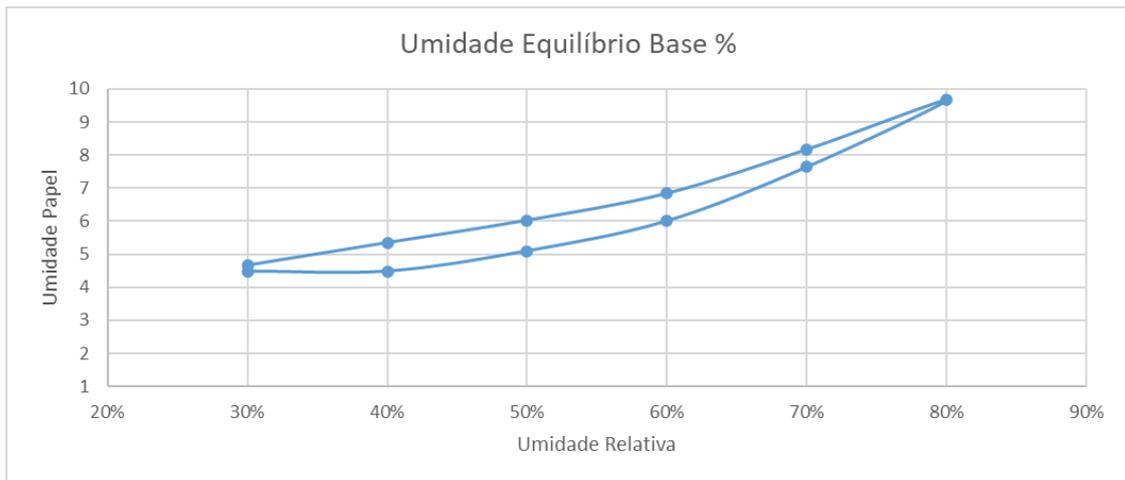
Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Umidade Equilíbrio Base %	4,482	4,484	5,098	6,010	7,647	9,676	8,179	6,846	6,028	5,349	4,661
Umidade Equilíbrio Cobertura %	1,59	2,29	2,74	3,65	5,16	7,62	5,57	4,09	3,5	2,76	1,75
Diferença %	2,889	2,190	2,355	2,357	2,486	2,053	2,606	2,758	2,530	2,585	2,909

Fonte: O autor.

Percebe-se que a umidade de equilíbrio da base e da cobertura diferem bastante, o que pode ser explicado pelos mesmos motivos do cartão não revestido, uma vez que se trata do mesmo papel base. A empresa fabricante dos papéis utiliza uma maior colagem interna na camada cobertura que na camada base de seu cartão, tendo forte influência na umidade de equilíbrio.

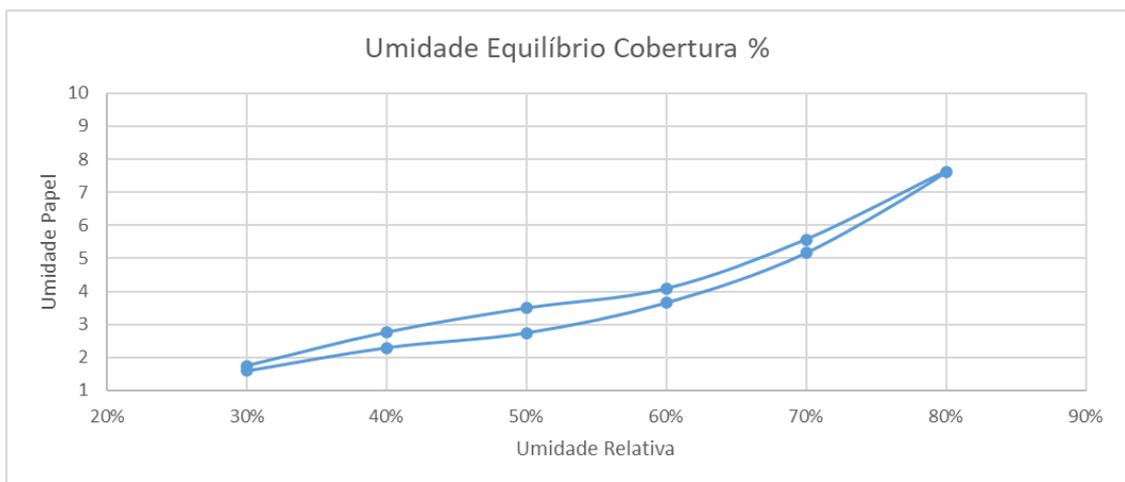
A Figura 22 e a Figura 23 representam os dados da Tabela 9 em formato gráfico. Nesses gráficos é possível observar a histerese das camadas base e cobertura, também nota-se a média de umidade de equilíbrio mais elevada para camada base. Apesar da média da umidade de equilíbrio ser diferente para ambas as camadas, a diferença entre o mínimo e máximo para a base é de aproximadamente 5,2% e para a camada cobertura é de aproximadamente 6,0% o que podemos considerar próximo para materiais diferentes e com médias discrepantes.

Figura 22 — Gráfico de histerese do papel para camada base, papel não revestido.



Fonte: O autor.

Figura 23 — Gráfico de histerese do papel para camada cobertura, papel não revestido.



Fonte: O autor.

Em sequência foram medidos o comprimento e a largura das amostras, e a média das mesmas é apresentada na Tabela 10, e pelo mesmo motivo citada para o papel sem revestimento, uma análise gráfica mostra-se mais adequada. A Tabela 11 e a Tabela 12 possuem os dimensionais para cada uma das três amostras das camadas base e cobertura.

Tabela 10 — Dimensional das amostras em várias umidades relativas, papel não revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Base (mm)	99,983	100,083	100,273	100,437	100,650	100,800	100,267	100,079	99,857	99,670	99,352
Comprimento - Base (mm)	148,917	149,117	149,208	149,260	149,358	149,443	148,963	148,770	148,648	148,557	148,410
Largura - Cobertura (mm)	100,433	100,667	100,833	100,963	101,134	101,250	100,243	99,977	99,717	99,567	99,383
Comprimento - Cobertura (mm)	148,233	148,460	148,587	148,720	148,830	148,957	148,623	148,490	148,247	148,117	147,933

Fonte: O autor.

Tabela 11 — Medidas das amostras individuais da base, papel não revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Base (mm)	100,500	100,550	100,680	100,810	101,520	101,670	100,900	100,700	100,540	100,300	100,030
Comprimento - Base (mm)	149,000	149,330	149,400	149,440	149,445	149,500	149,000	148,700	148,523	148,040	148,000
Largura - Base (mm)	100,250	100,370	100,580	100,890	100,910	100,970	100,540	100,340	99,940	99,770	99,310
Comprimento - Base (mm)	148,700	148,880	148,945	149,000	149,120	149,230	148,950	148,670	148,610	148,560	148,380
Largura - Base (mm)	99,200	99,330	99,560	99,610	99,520	99,760	99,360	99,196	99,090	98,940	98,717
Comprimento - Base (mm)	149,050	149,140	149,280	149,340	149,510	149,600	148,940	148,940	148,810	149,070	148,850

Fonte: O autor.

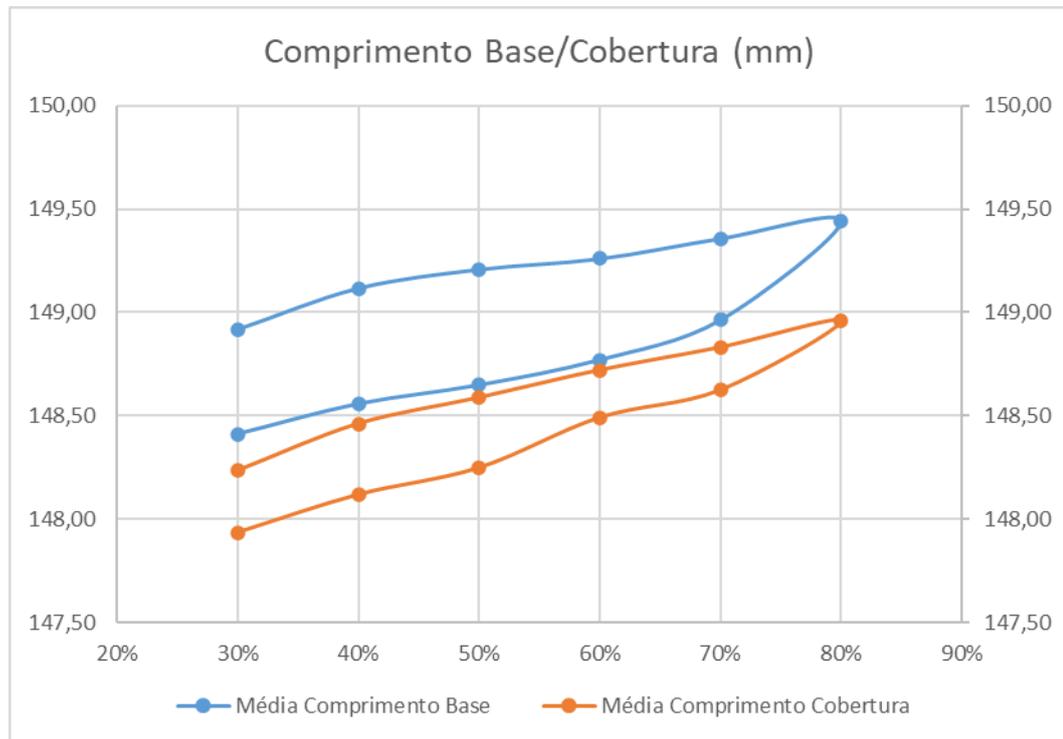
Tabela 12 — Medida das amostras individuais da cobertura, papel não revestido.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Largura - Cobertura (mm)	100,300	100,580	100,760	100,960	101,110	101,250	100,180	99,880	99,630	99,510	99,380
Comprimento - Cobertura (mm)	148,200	148,450	148,530	148,740	148,900	149,040	148,580	148,480	148,220	148,110	147,920
Largura - Cobertura (mm)	100,800	101,070	101,290	101,390	101,610	101,710	100,200	100,100	99,990	99,690	99,620
Comprimento - Cobertura (mm)	148,200	148,320	148,460	148,540	148,650	148,720	148,500	148,400	148,210	148,110	147,940
Largura - Cobertura (mm)	100,200	100,350	100,450	100,540	100,681	100,790	100,350	99,950	99,530	99,500	99,150
Comprimento - Cobertura (mm)	148,300	148,610	148,770	148,880	148,940	149,110	148,790	148,590	148,310	148,130	147,940

Fonte: O autor.

Conforme a Figura 24 o comprimento da camada base e da cobertura sofreram alterações parecidas, quando exposto a mudanças na umidade relativa. Mesmo essa diferença reduzida na expansão e contração da fibra pode gerar problemas de instabilidade dimensional do papel final, na forma de encanoamento ou encanoamento diagonal, dependendo da orientação das fibras do produto.

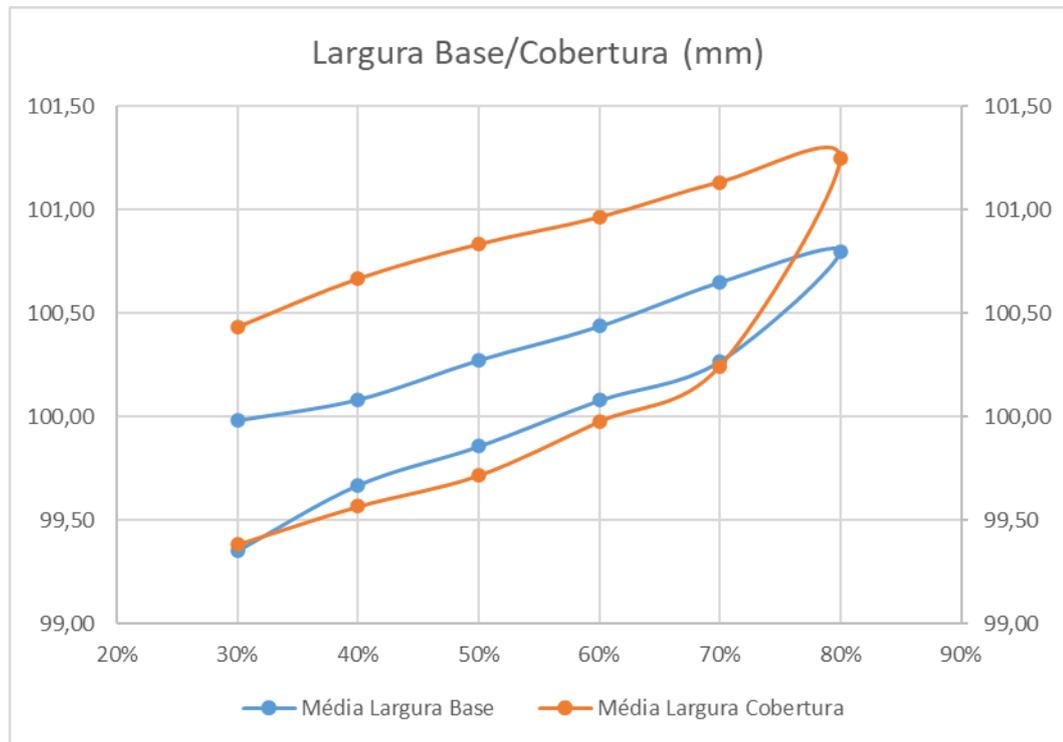
Figura 24 — Gráfico comprimento das camadas base e cobertura, papel não revestido.



Fonte: O autor.

Para a largura um comportamento oposto foi visualizado, onde a alteração dimensional da cobertura foi maior que a da base, conforme Figura 21. Também nesse caso as alterações dimensionais tanto da base quanto da cobertura, ocorreram de maneira semelhante, apesar de ainda haver uma diferença significativa entre as curvas, com a cobertura com maior dilatação dimensional. Essa diferença no comportamento higroscópico, impactando na estabilidade dimensional das camadas pode gerar distorções no produto final.

Figura 25 — Gráfico largura das camadas base e cobertura, papel não revestido.



Fonte: O autor.

Assumindo-se novamente a mesma simplificação do cartão revestido e considerando que o cartão final é composto por 3 planos constituídos de materiais e propriedades diferentes, e ainda assumindo-se que a camada meio não possui tanta influência sobre as tensões, por estar no meio dos planos exteriores, assume-se que a maior dilatação ou contração de uma das camadas irá fletir a outra camada, na forma de encanoamento, conforme já descrito na Figura 6, a forma de encanoamento será definida também pela orientação das fibras nas camadas individuais do produto final. O coeficiente de expansão da umidade, conforme Equação 2 e dados da Tabela 5 foi calculado para a camada base e cobertura, para o ciclo de incremento de 30% de umidade relativa para 80% de umidade relativa.

Os resultados encontrados estão na Tabela 8, e reforçam a análise gráfica. Os coeficientes encontrados para alteração dimensional da largura são próximos, diferindo em 1,2% aproximadamente, algo que se repete de maneira invertida para o comprimento, com uma diferença de -1,3%.

Tabela 13 — Coeficientes de expansão da umidade, papel não revestido.

Coeficiente Expansão	Valor
β Largura base	0,157%
β Comprimento Base	0,068%
β Largura Cobertura	0,135%
β Comprimento Cobertura	0,081%

Fonte: O autor.

5.3 CARTÃO REVESTIDO X CARTÃO NÃO REVESTIDO

A comparação dos resultados entre o papel cartão revestido e não revestido revela informações valiosas sobre o comportamento higroscópico desses materiais. Uma diferença significativa está na umidade máxima alcançada sob uma umidade relativa de 80%. Enquanto a camada base apresentou valores máximos próximos entre o papel revestido (9,671%) e o não revestido (9,676%), a camada de cobertura demonstrou uma mudança mais acentuada, com valores máximos de 5,311% para o papel revestido e 7,620% para o não revestido. Essa diferença pode ser atribuída à presença da tinta de revestimento, que confere ao papel propriedades hidrofóbicas e reduz a absorção de água.

Outra constatação relevante é que, enquanto as umidades na camada base apresentam variações mínimas entre o papel revestido e o não revestido, a camada de cobertura exibe variações consideráveis, conforme evidenciado pela Tabela 14 e Tabela 15. Essa discrepância pode ser explicada pela composição fibrosa e pelo processo de colagem interna do papel, que são diferentes em cada camada. A maior colagem interna na camada de cobertura, adotada pela empresa fabricante, pode ter uma forte influência nos resultados de umidade, impactando a estabilidade dimensional do papel final.

Essas diferenças no comportamento higroscópico entre as camadas de base e cobertura do papel cartão revestido e não revestido podem ter consequências significativas para o produto final. Variações dimensionais excessivas, como encanoamento ou encanoamento diagonal, podem ocorrer devido à diferença na expansão e contração das fibras em resposta às mudanças na umidade relativa. Isso ressalta a importância de compreender e controlar a interação entre a umidade

e as camadas do papel cartão, a fim de garantir a estabilidade dimensional e a qualidade do produto final.

Tabela 14 — Diferença entre a umidade de equilíbrio para papel revestido e não revestido, camada base.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Umidade Equilíbrio Base Revestido%	4,628	4,785	5,103	6,081	7,762	9,671	8,247	7,067	6,221	5,445	4,750
Umidade Equilíbrio Base Não Revestido %	4,482	4,484	5,098	6,010	7,647	9,676	8,179	6,846	6,028	5,349	4,661
Diferença %	0,15	0,30	0,00	0,07	0,12	0,00	0,07	0,22	0,19	0,10	0,09

Fonte: O autor.

Tabela 15 — Diferença entre a umidade de equilíbrio para papel revestido e não revestido, camada base.

Umidade Relativa	30%	40%	50%	60%	70%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Umidade Equilíbrio Cobertura Revestido%	1,640	2,015	2,140	2,977	3,995	5,311	4,212	3,441	2,612	2,298	1,559
Umidade Equilíbrio Cobertura Não Revestido %	1,593	2,294	2,743	3,653	5,161	7,623	5,574	4,089	3,498	2,765	1,752
Diferença %	0,05	0,28	0,60	0,68	1,17	2,31	1,36	0,65	0,89	0,47	0,19

Fonte: O autor.

Outro fato interessante é que conforme Figura 20, Figura 24, Figura 21 e Figura 25 o comportamento da camada cobertura mudou muito com e sem revestimento. Enquanto o comprimento da camada cobertura (Figura 20) não se altera muito com a mudança na umidade relativa, a sua largura altera-se mais (Figura 21). Isso pode ser explicado pelo fato de que as fibras expandem-se até dez vezes mais na seção transversal, comparativamente com a seção longitudinal, conforme (IGGESUND), e como em toda máquina de papel atual, sempre existem mais fibras alinhadas na direção MD que na CD. Também é interessante notar que tanto o comprimento quanto a largura da cobertura diferem muito no papel revestido e no não revestido, isso pode ser explicado pela resistência mecânica da tinta seca no papel, que o impede de expandir e contrair.

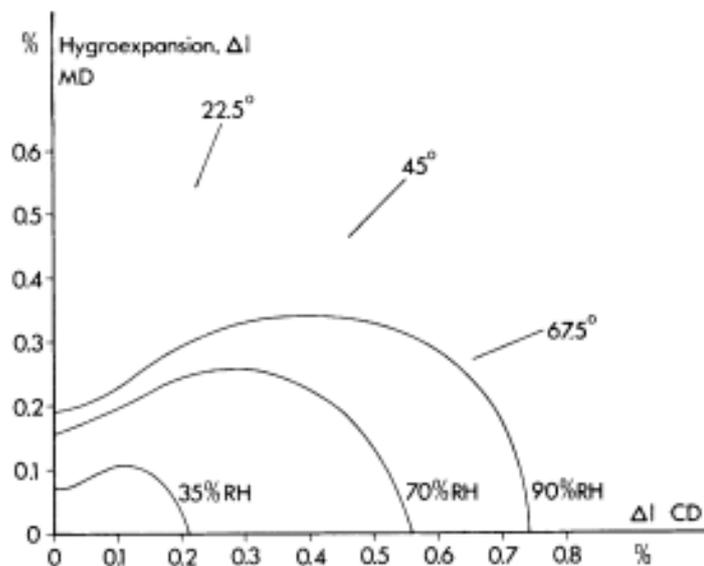
O coeficiente de expansão da umidade, do comprimento da camada cobertura (Tabela 8 e Tabela 13), varia de 6,36% no papel revestido para 13,49% no papel não revestido, mostrando a resistência mecânica que a aplicação de tinta oferece ao cartão.

Também é importante notar que o mesmo coeficiente para camada base varia de 6,94% para 15,73%, isso pode ser explicado pela ausência da aplicação de amido na camada base para o material sem revestimento. O amido é utilizado justamente por ser um aditivo de resistência a seco, e sua utilização aumenta a estabilidade dimensional do produto final.

5.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS.

Segundo o trabalho de A. de Ruvo et al. (1973), para um papel não branqueado os resultados estão na Figura 26. Onde o autor chama de MD, nesse trabalho considera-se comprimento, e CD aqui tratado com largura. O trabalho de Ruvo porém não considera a umidade de estabilização do papel, e a comparação com os resultados desse trabalho não pode ser realizada.

Figura 26 — Resultados do trabalho de A. de Ruvo et al. (1973).



Fonte: (A. de Ruvo et al. 1973).

Outro trabalho para comparação é o de Per A. Larsson (2010), nesse trabalho o coeficiente foi calculado para um papel kraft marrom, seco suportado e não suportado. Para efeitos de comparação, deve-se utilizar a secagem não suportada, e o resultado encontrado pelo autor está em torno de 0,1%, conforme Tabela 16. Número esse, próximo dos valores obtidos para o papel não revestido desse trabalho, conforme Tabela 13.

Tabela 16 — Resultados do trabalho de Per A. Larsson (2010).

	Secagem Sustentada			Secagem Livre			
	Expansão (%)	ΔMC (%)	β_{MC} (%/%)	Encolhimento (%)	Expansão (%)	ΔMC (%)	β_{MC} (%/%)
Virgem	0.469 ± 0.027	7.76	0.060	5.38 ± 0.31	0.890 ± 0.062	8.57	0.104
	0.503 ± 0.017	7.83	0.064	3.25 ± 0.12	0.797 ± 0.020	8.33	0.096
Virgem + PEM	0.528 ± 0.043	8.13	0.065	5.07 ± 0.13	0.936 ± 0.047	7.41	0.126
Histerese + PEM	0.466 ± 0.016	7.61	0.061	3.59 ± 0.21	0.829 ± 0.027	7.45	0.111

Fonte: (LARSSON, 2010).

6 CONCLUSÃO

A presente dissertação proporcionou uma compreensão mais aprofundada sobre os efeitos da umidade nas propriedades dimensionais do papel cartão, especialmente nas camadas de base e cobertura. A análise detalhada dos resultados permitiu identificar tendências claras e diferenças significativas entre as amostras revestidas e não revestidas e entre as camadas base e cobertura, fornecendo informações cruciais para aprimorar o processo de fabricação e otimizar a estabilidade dimensional do produto final.

Os resultados obtidos destacam a importância da interação complexa entre a composição fibrosa, a colagem interna e a tinta de revestimento na resposta higroscópica do papel cartão. A natureza hidrofóbica da tinta de revestimento desempenha um papel essencial na redução da absorção de água pela camada de cobertura, contribuindo para a estabilidade dimensional desse papel em condições de alta umidade relativa. Por outro lado, a camada base, que não é afetada pela tinta de revestimento, exibe uma resposta higroscópica mais consistente entre as amostras revestidas e não revestidas.

Além disso, a comparação entre as duas camadas revelou a importância da harmonia dimensional entre elas para evitar possíveis distorções e problemas de estabilidade no produto final, e tal harmonia está diretamente relacionada com as propriedades higroscópicas de cada camada. As variações dimensionais distintas entre a camada base e a camada de cobertura podem resultar em tensões internas no papel cartão, levando a deformações indesejadas, como encanoamento e encanoamento diagonal. Portanto, é fundamental manter um equilíbrio adequado entre as propriedades higroscópicas das camadas, garantindo a estabilidade dimensional e a integridade estrutural do papel cartão.

Os resultados desta pesquisa têm implicações significativas para a indústria de embalagens, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais mais estáveis e duráveis. A compreensão dos fatores que influenciam a higroscopia do papel cartão possibilita a adoção de estratégias de controle de qualidade mais eficientes, contribuindo para a produção de embalagens de alta qualidade que atendam às necessidades do mercado.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos no campo da higroscopia do papel

cartão. A continuidade desses estudos pode levar ao aperfeiçoamento das propriedades higroscópicas do papel cartão, garantindo produtos finais mais estáveis e de melhor desempenho. A aplicação dos conhecimentos adquiridos neste trabalho pode trazer benefícios tanto para a indústria de embalagens quanto para os consumidores, promovendo embalagens mais duráveis, seguras e eficientes.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que seja investigada a influência da orientação das fibras na ocorrência de encanoamento no papel, tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal. A orientação das fibras pode desempenhar um papel importante na estabilidade dimensional do papel, e compreender como diferentes arranjos de fibras afetam o encanoamento pode fornecer insights valiosos para a otimização do processo de fabricação do papel.

Além disso, é importante avaliar o impacto da colagem interna nas camadas do papel. A colagem pode contribuir para melhorar a estabilidade dimensional, garantindo que as camadas base e de cobertura do papel permaneçam mais estáveis e coesas.

Ao investigar o efeito da colagem interna, é possível explorar diferentes formulações dos químicos ou estratégias de aplicação para cada camada específica do papel. Isso pode resultar em um papel com propriedades mais uniformes e melhor resistência ao encanoamento, proporcionando uma maior estabilidade dimensional ao longo do tempo.

Além disso, é válido considerar o uso de técnicas de modelagem computacional para simular o comportamento do papel com diferentes configurações de fibras e métodos de colagem interna. Essas simulações podem fornecer informações preditivas e ajudar a otimizar o processo de fabricação do papel, permitindo a seleção de parâmetros ideais para obter uma maior estabilidade dimensional.

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos confirmaram minhas suposições iniciais e apoiaram a minha hipótese principal, fornecendo uma compreensão mais completa e aprofundada do tema em questão. Além disso, esta pesquisa também identificou lacunas no conhecimento existente e sugeriu áreas promissoras para investigações futuras.

Ao longo do processo de pesquisa, deparei-me com desafios e obstáculos que exigiram adaptação, criatividade e perseverança. No entanto, essas dificuldades também proporcionaram oportunidades de aprendizado e crescimento pessoal, reforçando minha dedicação ao campo acadêmico e ao compromisso de contribuir para a expansão do conhecimento.

Espero que esta dissertação tenha fornecido *insights* valiosos para a comunidade acadêmica, bem como para profissionais e tomadores de decisão relacionados ao assunto. Ao compartilhar essas descobertas, espero incentivar o diálogo e a colaboração entre universidade e empresa, promovendo um maior avanço científico em direção a soluções mais eficazes e inovadoras, além de fornecer respostas para problemas duradouros.

Em última análise, minha dissertação reafirma a importância da pesquisa acadêmica como um meio vital para a descoberta e o progresso. Acredito que o aprendizado e a descoberta são processos contínuos e infinitos, e espero que minha contribuição possa servir como um ponto de partida para uma compreensão mais profunda e abrangente do tema abordado.

REFERÊNCIAS

ANDRIONI, J. L. **Fabricação de papel**: máquina de papel, Vol 1. Curitiba: SENAI, 2009.

BARBOSA, T. L. **Influência do local de crescimento na qualidade da madeira para celulose e na susceptibilidade aos ventos**. 2010. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010.

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria**: setor papel e celulose. Brasília: CNI, 2010.

CAMPOS, E. S. **Curso básico de fabricação de papel**: com ênfase nas propriedades dos papéis de fibra curta. Aracruz, 2010.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de Eucalyptus do Brasil. **Revista Árvore, Viçosa**, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan. 2005.

DEGANUTTI, F. **Estudo em seção de secagem de papel da máquina MP-7 da Klabin/PR**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, 2001.

EK, M.; GELLERSTED, G.; HENRIKSSON, G. **Pulp and paper chemistry and technology, Vol 1**: wood chemistry and wood biotechnology. Berlin: Walter de Gruyter GmbH; Co. KG, 2009.

FIORITTI, R. R.; REVILLA, E.; VILLAR, J. C.; D'ALMEIDA, M. L. O.; GÓMEZ, N. Improving the strength of recycled liner for corrugated packaging by adding virgin fibres: Effect of refrigerated storage on paper properties. **Packaging Technology and Science**, v. 34, n. 5, p. 263-272, Jan. 2021.

HILL, C. A. S.; NORTON, A.; NEWMAN, G. The water vapor sorption behavior of natural fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 112, n. 3, p. 1524-1537, 2009.

HUBBE, M. A.; ROJAS, O. J.; LUCIA, L. A. Green modification of surface characteristics of cellulosic materials at the molecular or nano scale: a review. **BioResources**, v. 4, n. 2, p. 783-840, 2009.

IGGESUND. Holmen Iggesund invests in the future of packaging. 2021. **Iggesund**. Disponível em: <https://www.iggesund.com/>. Acesso em: 11 jan. 2021.

INSTITUTE OF TECHNOLOGY KTH. **KTC Royal Institute of Technology**. Estocolmo, 2011. p. 12-26.

JANE, J-L.; AO, Z.; DUVICK, S. A.; WIKLUND, M.; YOO, S-H.; WONG, K-S.; GARDNER, C. Structures of Amylopectin and Starch Granules: How Are They Synthesized? **Journal of Applied Glycoscience**, v. 50, n. 2, p. 167-172, Jan. 2003.

KAJANTO, I.; NISKANEN, K. Dimensional stability. *In*: NISKANEN, K. **Paper physics: papermaking science and technology**. Book 16. Finland: Fapet Oy, 1998. p. 239-251.

KLABIN. **Treinamento de produção de papel**: relatório interno, 2010.

KLABIN. **Separação de camadas do cartão**: método a úmido. São Paulo: Klabin, 2017.

KUUSIPALO, J.; LINDELL, H. **Packaging materials**. Finland: Lappeenranta University of Technology, 2013.

LARSSON, P. A. **Hygro an hydroexpansion of paper**: Influence of fibre-joint formation and fibre sorptivity. 2010. 68f. Thesis (PhD in Chemical Engineering) - KTH, School of Chemical Science and Engineering (CHE), Stockholm, Sweden, 2010.

LEVLIN, J-E.; SÖDERHJELM, L. (edts.). **Papermaking science and technology: pulp and paper testing**. Book 17. Finland: Fapet Oy, 1999.

LINDSTRÖM, T.; WÅGBERG, L.; LARSSON, T. On the nature of joint strength in paper-A review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing. *In*: 13TH FUNDAMENTAL RESEARCH SYMPOSIUM, Cambridge, UK: The Pulp and Paper Fundamental Research Society, 2005. p. 457-562.

MARK, R. E.; HABEGER, C.; BORCH, J.; LYNE, M. B. **Handbook of physical testing of paper, Vol 1**. 2nd edition. New York: Marcel Dekker, 2002.

MOROPOULOU, A.; ZERVOS, S. The immediate impact of aqueous treatments on the strength of paper. **Restaurator**, v. 24, n. 3, p. 160-177, Jan. 2003.

NISKANEN, K.; PAKARINEN, P. Paper tructure. *In*: KAARLO, N. **Paper physics**. 2nd edition. Helsinki: Finnish Paper Engineers Association, 2008. p. 12-52.

PERSSON, K. **Material model for paper**: experimental and theoretical aspects. Diploma Report, Lund University, Sweden, 1991.

REPIC. Packaging review: 2022 FTD performance. 2022. **Repic**. Disponível em: <https://repic.co.uk/packaging-review-2022-ftd-performance/>. Acesso em: 03 jun. 2023.

ROSCOAT, S. R.; BLOCH, J. F.; THIBAUT, X. Synchrotron radiation microtomography applied to investigation of paper. **Institute of Physics D: Appl. Phys.**, v. 38, p. A78–A84, 2005.

RUVO, A de; LUNDBERG, R.; MARTIN-LÖF, S.; SÖREMARK, C. Influence of temperature and humidity on the elastic and expansional properties of paper and the constituent fibre. In *The Fundamental Properties of Paper Related to its Uses*, **Trans. of the Vth Fund. Res. Symp. Cambridge**, 1973, (F. Bolam, ed.), p. 785–806, FRC, Manchester, 2018.

SAPIEHA, S.; INOUE, M.; LEPOUTRE, P. Conductivity and water sorption in paper. **Journal of applied polymer science**, v. 30, n. 3, p. 1257-1266, 1985.

SHANDS, J. A.; GENCO, J. M. Cross machine variation of paper curl on a twin wire machine. **Tappi J.**, v. 71, n. 9, p. 165-169, Sep. 1988.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Grammage of paper and paperboard (weight per unit area)**: Tappi 410. New York: ANSI, 2013.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board**: Tappi 411. New York: ANSI, 2013.

TWEDE, D.; SELKE, S. E. M.; SHIRES, D. **Cartons, crates and corrugated board**. 2nd edition. Pensilvania: DEStech Publications, 2015.

WEIBULL, W.; HÖGSKOLAN, K. T. **A statistical theory of the strength of materials**. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, 1939.