AFONSO HENRIQUE TEIXEIRA MENDES

HIGROEXPANSIBILIDADE DE PAPEL REPROGRÁFICO PRODUZIDO COM
FIBRAS DE EUCALIPTO EM MÁQUINA INDUSTRIAL

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2006

AFONSO HENRIQUE TEIXEIRA MENDES

HIGROEXPANSIBILIDADE DE PAPEL REPROGRÁFICO PRODUZIDO COM
FIBRAS DE EUCALIPTO EM MÁQUINA INDUSTRIAL

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof. Dr. Song Won Park

São Paulo
2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência do seu orientador.

São Paulo, 10 de Abril de 2006.

Autor

Orientador

Mendes, Afonso Henrique Teixeira

Higroexpansibilidade de papel reprográfico produzido com fibras de eucalipto em máquina industrial. São Paulo, 2006. 141p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Propriedades físicas do papel 2. Higroexpansibilidade

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

Sobre o papel,
tão receptivo corpo,
deita a alma
impressa em palavras,
ternas marcas da vida.

(autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Song Won Park, pelo estímulo constante e pela incansável dedicação às lides da orientação, fatores decisivos para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Paulo Jorge Ferreira, da Universidade de Coimbra – Portugal, pelo valioso empenho e cooperação oferecidos durante o período de execução deste trabalho;

À Ripasa S/A Celulose e Papel, pelo apoio e recursos disponibilizados para a realização da parte experimental deste estudo;

Aos amigos Altair Marcos, Fabio Sergio, Bruno Amaro, João Marcelo e Nilson, pela confiança e ajuda contínua que dedicaram a este projeto;

À Silma, minha esposa, que esteve sempre presente, trazendo incentivo e coragem em todos os momentos. À Juliana e Daniel, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

RESUMO

Como qualquer material fabricado a partir de fibras de madeira, o papel também apresenta variações dimensionais decorrentes de modificações no seu teor de umidade. O presente trabalho aborda o comportamento desta propriedade do papel, denominada higroexpansibilidade, medida em papel reprográfico fabricado a partir de fibras de eucalipto, durante o processo de produção em uma máquina industrial. O estudo foi realizado com amostras de papel de 75 g/m^2 , coletadas em diversos pontos de uma máquina comercial, operando à velocidade de 1256 m/min. No estudo, encontram-se dados de higroexpansibilidade medidos ao longo da máquina de papel, desde a seção de formação até o acabamento, e na direção transversal da folha na enroladeira. A análise dos resultados permite a verificação de influências das operações e tratamentos envolvidos na fabricação do papel (formação, prensagem, secagem e acabamento) sobre a sua higroexpansibilidade. Os resultados das medições desta propriedade são discutidos em termos de efeitos provenientes das condições operacionais estabelecidas para a fabricação do papel, permitindo reconhecer influências da orientação de fibras, do processo de secagem e da restrição ao encolhimento, da aplicação de amido superficial e da aplicação de tensões na direção longitudinal e transversal do papel. Para comparação e suporte à discussão de resultados, foram também medidas propriedades estruturais, de resistência e propriedades elásticas do papel. Na conclusão do trabalho, são apresentadas sugestões para controle e minimização da higroexpansibilidade do papel destinado ao uso final, com enfoque em ações a serem tomadas, no que se refere ao ajuste do processo de fabricação. Finalmente, apresentam-se comentários sobre futuros trabalhos que poderão ser desenvolvidos, a fim melhor entender fenômenos adicionais relacionados à higroexpansibilidade e buscar alternativas para seu controle, por se tratar de uma propriedade cada vez mais importante para os processos de impressão e operações de conversão, cujos efeitos podem limitar o desempenho e a utilização final do papel.

ABSTRACT

Like any material made from wood fibers, the paper also exhibits dimensional changes as a result of change in moisture content. This work deals with the behavior of this paper property, called hygroexpansivity, which was measured in reprographic paper manufactured from eucalyptus fibers, during the production process in a industrial paper machine. The study was developed using 75 g/m² paper samples collect in different positions of a commercial paper machine running at the speed of 1256 m/min. In the study, data of hygroexpansivity measured along the paper machine can be found from the forming section up to the finishing section and from the cross machine direction at the reel. The analysis of the results reveals the effects of the operations and treatments involved in the papermaking (formation, pressing, drying and finishing) on the hygroexpansivity. The measurements results of this property are discussed with focus on the effects of the operating conditions established for the papermaking operation, what leads to the recognition of the effects of the fiber orientation, drying process, shrinkage restraint, starch sizing and tensions applied to the paper in machine direction and cross machine direction. For comparison purposes and result discussion support, some structural, strength and elastic paper properties were also measured. In the conclusion of the study, some suggestions for control and minimization of hygroexpansivity of the end use paper are presented, focusing on actions to be taken, which are related to the adjustment of papermaking process. Finally, comments referred to future work for better understanding of additional hygroexpansivity mechanisms are also mentioned, in order to suggest future investigation of control alternatives for this property, since it's importance has been more and more highlighted in printing and conversion operations because, at times, it can limit the performance and usefulness of paper.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Lista de Abreviaturas

1. Introdução	1
1.1 Estabilidade dimensional do papel	1
1.2 Objetivos do trabalho	6
1.3 Estrutura da dissertação	7
2. Revisão da literatura	8
2.1 Introdução	8
2.2 Higroexpansibilidade do papel	8
2.2.1 Umidade e higroexpansão do papel	9
2.2.1.1 Umidade de equilíbrio	9
2.2.1.2 Interação da água com as fibras do papel	13
2.2.1.3 Fenômeno geral da higroexpansão do papel	16
2.2.1.4 Higroexpansão da folha de papel	18
2.2.2 Coeficiente de higroexpansibilidade do papel	27
2.2.3 Medição da higroexpansibilidade do papel	29
2.2.4 Relações com outras propriedades do papel	30
2.3 Fatores que influenciam a higroexpansibilidade do papel	32
2.3.1 Composição da massa	32
2.3.2 Refinação da pasta celulósica	33
2.3.3 Orientação das fibras	34
2.3.4 Prensagem úmida	36
2.3.5 Restrição ao encolhimento durante o processo de secagem	39
2.3.6 Configuração da seção de secagem da máquina de papel	42
2.3.7 Colagem	45
2.3.8 Calandragem	46
2.4 Estabilidade dimensional do papel	47
2.4.1 Encolhimento do papel durante a secagem	47

2.4.1.1	Mecanismo de encolhimento do papel	47
2.4.1.2	Tensões induzidas no papel durante o processo de secagem	49
2.4.1.3	Perfil de encolhimento do papel	52
2.4.1.4	Efeito do encolhimento sobre as propriedades do papel	55
2.4.2	Encanoamento (<i>curl</i>) do papel	56
2.4.3	Ondulações da superfície (<i>cockling</i>) do papel	59
3.	Metodologia de amostragem e de teste	61
3.1	Amostras de papel	61
3.2	Máquina de papel	65
3.2.1	Caixa de Entrada	65
3.2.2	Formador	67
3.2.3	Seção de Prensas	67
3.2.4	Seção de Secagem	68
3.2.5	Sistema de Vapor e Condensado	68
3.2.6	Capotas e Sistemas de Ventilação	69
3.2.7	Prensa de Colagem	69
3.2.8	Calandra	70
3.2.9	Enroladeira	70
3.3	Medições nas amostras de papel	71
3.3.1	Caracterização da pasta celulósica	71
3.3.1.1	Comprimento das fibras	72
3.3.1.2	Curvatura das fibras	73
3.3.1.3	<i>Coarseness</i>	74
3.3.1.4	Relações entre dimensões fundamentais das fibras	75
3.3.1.5	Índice de Retenção de Água (<i>WRV</i>)	77
3.3.2	Formação de folhas manuais	78
3.3.3	Propriedades estruturais, mecânicas e higroexpansivas	79
3.3.3.1	Gramatura	80
3.3.3.2	Espessura	81
3.3.3.3	Corpo	81
3.3.3.4	Umidade	81
3.3.3.5	Carga mineral	82
3.3.3.6	Formação	83
3.3.3.7	<i>TSI</i> e <i>TSO</i>	83
3.3.3.8	Porosidade	84
3.3.3.9	Aspereza e dupla-face	85
3.3.3.10	Resistência à tração, alongamento, energia absorvida na tração, rigidez à tração e comprimento de auto-ruptura	86
3.3.3.11	Índice de tração	90
3.3.3.12	Módulo de elasticidade	90
3.3.3.13	Resistência ao rasgo	91
3.3.3.14	Rigidez	91
3.3.3.15	Resistência ao estouro	92
3.3.3.16	Determinação da higroexpansibilidade	92

4. Resultados das medições	97
4.1 Caracterização da pasta celulósica	97
4.2 Propriedades estruturais, mecânicas e higroexpansivas do papel	98
5. Análise da higroexpansibilidade do papel	105
5.1 Visualização de dados	105
5.1.1 Coordenadas paralelas	105
5.1.2 Matriz de gráficos de dispersão	106
5.2 Discussão dos resultados	107
5.2.1 Higroexpansibilidade ao longo da máquina de papel	108
5.2.1.1 Outras propriedades ao longo da máquina de papel	119
5.2.2 Higroexpansibilidade na direção transversal da enroladeira	120
5.2.2.1 Higroexpansibilidade do papel na direção CD	121
5.2.2.2 Higroexpansibilidade do papel na direção MD	126
5.2.2.3 Outras propriedades na direção transversal da enroladeira	129
6. Conclusões e futuros trabalhos	131
7. Referências bibliográficas	135

Apêndice – Condições de Operação da Máquina de Papel

Sobre o Autor

Lista de Figuras

Figura 2.1	Umidade do papel vs. umidade relativa do ar a diferentes temperaturas	11
Figura 2.2	Umidade do papel vs. umidade relativa do ar para amostras de pasta química e pasta mecânica	12
Figura 2.3	Diminuição sucessiva da interligação entre fibrilas celulósicas causada pela absorção de água, de A para D (inchação) ou aumento da interligação causada pela remoção de água, de D para A (encolhimento)	14
Figura 2.4	Remoção de frações de água e modificações na seção transversal das fibras vs. teor de sólidos nas operações de fabricação de papel	15
Figura 2.5	Higroexpansão vs. umidade do papel: (a) para folhas manuais secadas com restrição ao encolhimento e (b) para folhas manuais secadas livremente	17
Figura 2.6	Relação entre higroexpansão e teor de umidade: (a) na direção MD e (b) na direção CD – <i>fine paper</i> , 90.1 g.m^{-2}	19
Figura 2.7	Relação entre coeficiente de higroexpansibilidade e módulo de elasticidade específico nas direções MD e CD para folhas manuais anisotrópicas, sem finos, secadas livremente ou com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta mecânica	22
Figura 2.8	Relação entre coeficiente de higroexpansibilidade e módulo de elasticidade específico para folhas manuais isotrópicas, sem branqueamento, sem finos, secadas com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta química kraft de fibra longa	23
Figura 2.9	Relação entre coeficiente de higroexpansibilidade e a razão MD/CD do módulo de elasticidade (orientação de fibras) para folhas manuais isotrópicas, sem branqueamento, sem finos, secadas com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta química kraft	23
Figura 2.10	Modelos simplificados para as ligações entre fibras, quando a fibra inferior se encontra alinhada nas direções MD e CD da máquina	24
Figura 2.11	Diagrama polar de TSI / TSO	31
Figura 2.12	Representação gráfica da correlação entre o TSI_{CD} e o coeficiente de higroexpansibilidade	31

Figura 2.13	Higroexpansão vs. grau de refinação para folhas manuais isotrópicas formadas com diferentes pastas químicas branqueadas. Higroexpansão medida com variação de umidade relativa do ambiente de 33% a 76%, T = 23 °C	35
Figura 2.14	Efeito da orientação de fibras no coeficiente de higroexpansibilidade do papel nas direções MD e CD para folhas manuais anisotrópicas formadas com pasta química sem branqueamento, secadas livremente	36
Figura 2.15	Higroexpansão (medida para a variação de umidade relativa do ar de 30% a 60%, com T = 23°C) vs. encolhimento controlado durante a secagem, para folhas isotrópicas produzidas com pasta química (kraft) de fibras longas, com refinação ou sem refinação (símbolos cheios e vazados, respectivamente).....	37
Figura 2.16	Higroexpansão (medida para a variação de umidade relativa do ar de 30% a 60%, com T = 23°C) vs. densidade do papel, para folhas isotrópicas produzidas com pasta química (kraft) de fibras longas, com refinação ou sem refinação e com diferentes conteúdos de finos, para folhas secadas livremente (linhas contínuas) e secadas com restrição ao encolhimento (linhas tracejadas).....	38
Figura 2.17	Correlação entre alongamento e encolhimento - pasta química sulfito de fibra longa, branqueada, , refinada a 50 °SR	40
Figura 2.18	Relação entre higroexpansão e encolhimento para folhas secadas sob restrição ao encolhimento e para folhas produzidas a partir de 10 tipos de pastas celulósicas, refinadas e secadas livremente	41
Figura 2.19	(a) Seção de secagem com secadores dispostos em duas fileiras e (b) perfil típico de encolhimento transversal do papel	43
Figura 2.20	Seção de secagem com cilindros secadores dispostos em fileira única	44
Figura 2.21	Encolhimento da folha nas direções MD e CD de amostras de papel secadas livremente	45
Figura 2.22	Força de secagem vs. teor seco do papel, na condição de encolhimento nulo.....	50
Figura 2.23	Tensão de secagem vs. tempo de secagem para folhas manuais secadas a diferentes temperaturas	51
Figura 2.24	Perfil transversal de encolhimento medido em uma máquina de papel jornal, cuja seção de secagem é do tipo fileira única	53

Figura 2.25	Variação da higroexpansão nas direções MD e CD, através da largura total da folha de papel, medida na faixa de umidade relativa do ar de 33% - 66% a $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$	56
Figura 2.26	Definição de componentes de encanoamento do papel	57
Figura 3.1	Posição de coleta na máquina de papel e identificação das amostras	64
Figura 3.2	Máquina de papel e pontos de amostragem	66
Figura 3.3	Dimensões da fibra para cálculo de curvatura (<i>curl</i>)	73
Figura 3.4	Imagem ampliada da massa de papel usada para medição da largura e do diâmetro do lúmen das fibras.....	77
Figura 3.5	Medição das propriedades de resistência à tração, rigidez à tração e módulo de elasticidade e energia absorvida na tração	88
Figura 3.6	Sistema de controle de umidade relativa e temperatura do ar na câmara de ensaios	95
Figura 3.7	Higroexpansímetro do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal	95
Figura 5.1	Exemplo que ilustra a da representação de uma seqüência de pontos transformada em coordenadas paralelas	106
Figura 5.2	Matriz de gráficos de dispersão	106
Figura 5.3	Higroexpansibilidade medida ao longo da máquina de papel nas direções MD e CD, de acordo com a norma ISO 8226-1 [1994] ...	109
Figura 5.4	Higroexpansão vs. umidade do papel para folhas manuais secadas com restrição ao encolhimento	115
Figura 5.5	Comparação entre propriedades na direção MD do papel, em posições ao longo da máquina	117
Figura 5.6	Propriedades na direção MD do papel ao longo da máquina. Os valores apresentados para a caixa de entrada e formador foram medidos em folhas manuais isotrópicas	119
Figura 5.7	Perfis de higroexpansibilidade nas direções MD e CD do papel, medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina	120

Figura 5.8	Restrição ao encolhimento devido à tensão aplicada pelas telas secadoras sobre a folha de papel	122
Figura 5.9	Seção de secagem com cilindros secadores dispostos em fileira superior única com rolos de sucção à vácuo na parte inferior - abraçamento da folha pela tela secadores em torno de 221°	123
Figura 5.10	Seção de secagem convencional com cilindros secadores dispostos em duas fileiras - abraçamento da folha pela tela secadora em torno de 173°	123
Figura 5.11	Perfil transversal de corpo (<i>bulk</i>) na enroladeira da máquina de papel.	125
Figura 5.12	Perfis de alongamento nas direções MD e CD do papel, medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina	126
Figura 5.13	Relação entre higroexpansibilidade e alongamento do papel na direção CD	126
Figura 5.14	Perfis do módulo de elasticidade nas direções MD e CD do papel medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina	127
Figura 5.15	Perfil da razão de resistência à tração MD/CD ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina	128
Figura 5.16	Perfil de <i>TEA</i> (direção CD) ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina	128
Figura 5.17	Matriz de gráficos de dispersão para propriedades transversais do papel medidas em amostras da enroladeira (direção CD do papel).	129
Figura 5.18	Relação entre higroexpansibilidade do papel na direção CD e razão de resistência à tração MD/CD na enroladeira	130
Figura 5.19	Relação entre higroexpansibilidade na direção CD e corpo do papel medidos na enroladeira da máquina	130

Lista de Tabelas

Tabela II.1	Comparação do coeficiente de higroexpansibilidade de folhas manuais formadas com polpas mecânicas e químicas	34
Tabela IV.1	Características da pasta celulósica	97
Tabela IV.2	Fração de parede e índice de <i>Runkel</i>	98
Tabela IV.3	Resultados das medições efetuadas em folhas formadas manualmente em laboratório (com e sem restrição na secagem) – valores médios	99
Tabela IV.4	Resultados das medições efetuadas em amostras coletadas ao longo da máquina de papel – valores médios	101
Tabela IV.5	Resultados das medições efetuadas em amostras coletadas na direção transversal da enroladeira (posições indicadas a partir do lado de comando da máquina de papel) – valores médios...	103

Lista de Símbolos

A	área de uma fotografia individual, em mm^2 , equação (3.4)
B	corpo (<i>bulk</i>), em $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$, equação (3.11).
b	largura do corpo de prova, em mm, equação (3.14) e (3.15).
b_1, b_2	fatores de transferência de tensão para a direção transversal da fibra quando a folha é tensionada na direção longitudinal ou na direção transversal, respectivamente, equação (2.5) e (2.6).
BL	comprimento de auto-ruptura, em km, equação (3.16).
BW_f	água ligada contida no interior das paredes das fibras (<i>freezing bound water</i>), em %.
BW_{nf}	água ligada quimicamente (<i>nonfreezing bound water</i>), em %.
c	consistência da massa, em %, equação (3.4)
c	constante, adimensional, equação (3.13).
CM	carga mineral, em %, equação (3.12).
C_s	<i>coarseness</i> , em $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-1})$, equação (3.5)
C_i	curvatura individual da fibra i , em %, equação (3.2) e (3.3).
C_f	curvatura média das fibras, em %, equação (3.3).
DF	massa seca total das fibras analisadas, em mg, equação (3.4)
DL	diâmetro do lúmen, em μm , equação (3.6)-(3.8).
d	distância entre as placas de vidro que contém a amostra, em mm, equação (3.4)
d_i	distância entre as extremidades da fibra i , em mm, equação (3.2).
d_k	distancia característica, em mm, entre o topo e a base da folha, equação (2.15).
$D_{\max}$	largura aparente da fibra em mm, na equação (2.1).
e	espessura, em μm , equação (3.11).
E	espessura de parede, em μm , equação (3.6), (3.7) e (3.8).
E	módulo de elasticidade, em GPa, equação (3.18).

f	fator de conversão de cinzas para carga mineral, para papel contendo carbonato de cálcio (sem caulim), equação (3.12).
F	força de tração aplicada, em kN, equação (3.14).
FP	fator de parede, em %, equação (3.7).
FW	água livre (<i>free water</i>), em %.
IR	índice de <i>Runkel</i> , equação (3.8)
K	fator de conversão = $16,033 \text{ m}^{-2}$, equação (3.10).
K_x	componente de encanoamento na direção x da máquina, em m^{-1} , equação (2.13).
K_y	componente de encanoamento na direção y da máquina, em m^{-1} , equação (2.13).
K_{xy}	componente de encanoamento na diagonal xy da máquina, em m^{-1} , equação (2.13).
K_{MD}	componente médio na direção MD, equação (2.16).
K_{CD}	componente médio na direção CD, equação (2.16).
L	comprimento total das fibras analisadas, em mm, equação (3.5)
L	largura da fibra, em μm , equação (3.6) e (3.7).
l	comprimento do corpo de prova, em mm, equação (3.14).
l_i	comprimento longitudinal individual da fibra i , em mm, equação (3.1) e (3.3).
l_f	comprimento médio das fibras, em mm, equação (3.1).
l_0	comprimento inicial da amostra, em mm, equação (2.3).
l_0	comprimento inicial do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(50 \pm 5) \%$, em mm, equação (2.11).
l_0	comprimento inicial do corpo de prova, mm, , equação (3.19).
l_0	comprimento original do corpo de prova (<i>test span</i>), em mm, equação (3.14) e (3.15).
l_{33}	comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(33 \pm 2) \%$, em mm, equação (2.11).

l_{66}	comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(66 \pm 2) \%$, em mm, equação (2.11).
L_{enr}	largura da folha na enroladeira, em mm, equação (5.1).
L_{apc}	largura da folha antes da prensa de cola, em mm, equação (5.1).
M_d	massa seca da amostra, após secagem, durante no mínimo duas horas, em estufa à 105°C , em g, na equação (2.1).
M_w	massa de água contida na amostra em g, na equação (2.1).
M_t	massa total inicial da amostra de papel úmido, em g, na equação (2.1).
n	número total de fibras analisadas, equação (3.1).
n_p	número total de fotografias, equação (3.4)
p	massa do corpo de prova, em g, equação (3.10).
p_w	pressão parcial do vapor d'água do ambiente, em Pa, na equação (2.2).
$p_{w,s}$	pressão de vapor de saturação, Pa, na equação (2.2).
PU	peso úmido, em g, equação (3.9).
PS	peso seco, em g, equação (3.9).
$p1$	massa inicial da amostra, em g, equação (3.12).
$p2$	massa de cinzas, após a incineração, em g, equação (3.12).
R_{33}	umidade do ar medida no patamar de (33 ± 2) , em %, equação (3.19).
R_{66}	umidade do ar medida no patamar de (66 ± 2) , em %, equação (3.19).
RH	umidade relativa do ar, em %, equação (2.2).
T	temperatura, em $^\circ\text{C}$.
T	resistência à tração, em kN.m^{-1} , equações (3.16) e (3.17).
t	espessura da folha de papel, em μm , equação (3.18).
TEA	<i>tensile energy absorption</i> , em J.m^{-2} , equação (3.14).
TS	rigidez à tração, (<i>tensile stiffness</i>), em kN.m^{-1} , equação (3.15).
TSI	<i>tensile stiffness index</i> , em kN.m.g^{-1} , equação (3.13).
TI	índice de tração (<i>tensile index</i>), em N.m.g^{-1} , equação (3.17).

v	velocidade de propagação, em km.s^{-1} , equação (3.13).
w	desvio em perpendicular ao plano de encanoamento representando o encanoamento intrínseco do papel, equação (2.13).
w	gramatura, em (g.m^{-2}) , equação (3.10), (3.11), (3.16) e (3.17).
W	trabalho realizado a fim de provocar a ruptura do papel, em J.
W_p	umidade do papel em % , equação (2.1).
WRV	índice de retenção de água, em %, equação (3.9).
W/L	relação entre largura e comprimento dos passes livres na seção de secagem.
x_l	direção do papel (válida para a direção MD ou CD da máquina)
X	higroexpansibilidade, em %, equação (2.11).
X^*	higroexpansibilidade, em %, equação (3.19).
β	coeficiente de higroexpansibilidade, adimensional, equação (2.10).
ΔF	variação da força de tração aplicada, em kN, equação (3.15).
Δl	variação no comprimento da amostra, em mm, equação (2.3) e (3.15).
Δl_{33}	variação no comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(33 \pm 2) \%$, em μm , equação (3.19).
Δl_{66}	variação no comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(66 \pm 2) \%$, em μm , equação (3.19).
ΔL_{us}	variação dimensional devido ao re-umedecimento e secagem, em mm, equação (5.1).
ΔW_p	variação do teor de umidade do papel, em %, equação (2.10).
ε_h	higroexpansão, em %, equação (2.3) e (2.12).
ε_{MD}	deformação média da folha na direção MD, equação (2.16).
ε_{CD}	deformação média da folha na direção CD, equação (2.16).
ε_{top}	deformação na direção do plano (superfície), no topo da folha, equação (2.15).
ε_{bottom}	deformação na direção do plano (superfície), na base da folha, equação (2.15).

- γ_2 a razão entre a tensão média transferida para direção da largura da fibra e a tensão média transferida para a direção axial, equação (2.8).
- γ_3 a razão entre a tensão média transferida para direção da espessura da fibra e a tensão média transferida para a direção axial, equação (2.8).
- ϕ_{top} ângulo de orientação de fibras no topo da folha, equação (2.16).
- ϕ_{bottom} ângulo de orientação de fibras na base da folha, equação (2.16).
- μ_{11} higoexpansão do papel na direção MD, em %, equação (2.5).
- μ_{22} higoexpansão do papel na direção CD, em %, equação (2.6).
- μ_L^f , higoexpansão das fibras individuais na direção longitudinal, em %, equação (2.5).
- μ_T^f higoexpansão das fibras individuais na direção transversal, em %, equação (2.6).
- μ^* higoexpansão do papel na direção MD ou CD, em %, equação (2.7).
- μ_{11}^f higoexpansão na direção axial da fibra, em %, equação (2.7).
- μ_{22}^f higoexpansão na direção da largura da fibra, em %, equação (2.7).
- μ_{33}^f higoexpansão na direção da espessura da fibra, em %, equação (2.7).
- σ_{22}^f tensão média transferida na direção da largura da fibra, equação (2.8).
- σ_{33}^f tensão média transferida na direção da espessura da fibra, equação (2.8).
- σ_{11}^f tensão média transferida na direção axial da fibra, equação (2.8).
- θ ângulo em relação à direção da máquina, em graus, representando a direção do encanoamento, equação (2.14).

Lista de Siglas

BKP	<i>Bleached Kraft Pulp</i>
CAR	Comprimento de Auto-Ruptura (<i>breaking length</i>)
CD	<i>Cross-Direction</i> (direção transversal da máquina de papel)
CLSM	<i>Confocal Laser Scanning Microscopy</i>
CMP	<i>Chemo-Mechanical Pulp</i>
CTMP	<i>Chemo-Thermo-Mechanical Pulp</i>
CSF	<i>Canadian Standard Freeness</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
ECF	<i>Elemental Chlorine Free</i>
LA	Lado de Acionamento da máquina de papel
LC	Lado de Comando da máquina de papel
LYS	<i>Low Yield Sulphite pulp</i>
MD	<i>Machine Direction</i> (direção de produção do papel)
TEA	<i>Tensile Energy Absorption</i> , citado na seção 3.3.3.
TMP	<i>Thermo-Mechanical Pulp</i> (Polpa por processo termomecânico)
TSI	<i>Tensile Stiffness Index</i> (índice de rigidez à tração)
TSO	<i>Tensile Stiffness Orientation</i> (ângulo de orientação da maior rigidez à tração)
DCS	<i>Direct Computer System</i> (sistema de controle digital da máquina de papel)
SGW	<i>Stoned Ground Wood</i>

°SR Grau Schopper-Riegler

STFI *Swedish Forest Research Institute*

WRV *Water Retention Value*

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das modificações dimensionais que podem ser esperadas, quando o papel é submetido a alguma alteração no teor de umidade, é essencial para o controle preciso de processos de impressão e operações de conversão. A verificação e controle desta propriedade, durante a fabricação do papel, torna-se fundamental para atender à crescente demanda de qualidade para os produtos impressos, produzidos por diversos processos, desde o *off-set* colorido até as reproduções em máquinas copiadoras.

Atualmente, problemas relacionados à estabilidade dimensional constituem uma das principais causas registradas para devolução de papel ao fabricante, por motivo de desvios nos padrões de qualidade.

1.1 Estabilidade dimensional do papel

O conceito de estabilidade dimensional tem sido considerado sob diferentes enfoques, quanto ao conteúdo de significação, para avaliação das propriedades e da qualidade do papel.

No sentido tradicional, e mais restrito, várias referências encontradas na literatura especializada associam a estabilidade dimensional apenas com a habilidade do papel em manter suas dimensões invariantes, quando submetido a alterações de conteúdo de umidade. Desta forma, se estabelece uma relação quase unívoca, entre estabilidade dimensional e *higroexpansibilidade*¹ do papel, propriedade caracterizada pelo efeito de expansão ou de contração das fibras celulósicas e, conseqüentemente, da folha de papel, causado principalmente pela variação do teor interno de umidade, resultante da variação da umidade relativa do ar ambiente.

Esta conceituação foi adotada em vários trabalhos sobre o tema. Casey [1961], quando abordou este assunto (estabilidade dimensional), mencionou que “a alteração

¹ A higroexpansibilidade do papel é medida *cf.* procedimentos descritos nas normas ISO 8226-1 e 8226-2.

que ocorre nas dimensões do papel com mudanças no teor de umidade é uma consideração importante no uso do papel”. Gallay [1973] considerou o termo “instabilidade dimensional” para relacionar variações de comprimento, largura e espessura da folha com alterações de teor de umidade do papel e indicou o fenômeno de dilatação e encolhimento das fibras celulósicas em condições de maior ou menor teor de umidade, *i.e.*, a higroexpansibilidade, como causa de eventual desenvolvimento, não apenas de alterações dimensionais, mas também de outros mecanismos de deformação do papel, tais como encanoamento (*curl*), *cockles*² e bordas onduladas. Kajanto e Niskanen [1998] se referiram à estabilidade dimensional por meio da indicação da variação do teor de umidade como causa de alteração nas dimensões e na forma da folha de papel. Boström [2001] menciona que esta propriedade (estabilidade dimensional) tem sido tradicionalmente caracterizada como higroexpansão e calculada a partir da elongação de amostras, em equilíbrio com o ambiente, quando expostas a diferentes níveis de umidade relativa. O mesmo conceito foi utilizado por outros autores, dentre os quais, Nordman [1958], Black e Klinga [1963], Eklund [1969] e Gess e Wilson [2001].

Com concepção ampliada, a expressão “estabilidade dimensional” tem sido utilizada para designar outros fenômenos, além da propriedade higroexpansiva do papel e, neste contexto, seu uso está relacionado a efeitos derivados da higroexpansibilidade. De acordo com esta abordagem, Uesaka [1991] considerou a higroexpansão, o encolhimento do papel durante a secagem e o encanoamento (*curl*), rugas, *cockles*, bordas granulosas e outros, como diferentes manifestações de problemas relacionados à estabilidade dimensional. Scott e Abott [1995], em consideração sobre a influência do teor de umidade sobre as propriedades mecânicas e estruturais do papel, enumera, como efeitos ligados à estabilidade dimensional, os fenômenos de expansão e contração, variação de espessura, *cockle*, encanoamento (*curl*), enrugamento e bordas esticadas ou onduladas. Da mesma maneira, este enfoque, mais abrangente, encontra-se nos trabalhos de Uesaka et al [1989] e Nanri e Uesaka [1993].

² *Cockle* é uma rugosidade em macro escala, circunscrita a uma região do papel, em forma de “morros e vales”, causada por tensões induzidas na folha ao longo do processo de formação e de secagem.

No presente estudo, a estabilidade dimensional será discutida segundo a vertente mais restrita, ou seja, com foco na higroexpansibilidade, por ser esta propriedade identificada como parâmetro fundamental para o estudo de outros fenômenos relacionados à deformação do papel, resultantes de variações introduzidas no seu teor de umidade.

A estabilidade dimensional é uma das propriedades mais importantes que determinam o desempenho do papel na sua utilização final e se constitui na maior barreira para o desenvolvimento de novos produtos de papel [Uesaka, 1991]. É essencial para vários tipos de papel e de forma especial para aqueles destinados à impressão. Nas operações de conversão, também se torna aspecto relevante, onde as características de planicidade e uniformidade de espessura do papel são de interesse primordial.

As variações no teor de umidade do papel estão condicionadas às formas de uso ou de armazenamento, pois podem ser provocadas por mudanças na umidade relativa ou na temperatura do ambiente, como ocorre nos cartões e papéis usados para embalagens, pela aplicação de água, como é característica do processo de impressão *off-set*³ ou pelo aquecimento do papel, como acontece com o papel reprográfico usado em máquinas copiadoras.

A deficiência na estabilidade dimensional está relacionada a diversos problemas encontrados na utilização final do papel, já que os destinados à impressão, bem como os papéis reprográficos sofrem alterações dimensionais significativas, quando umedecidos ou secos.

Exemplos típicos das dificuldades encontradas são a perda de registro entre as estações de impressão no processo *off-set* colorido, em função de variações dimensionais do papel resultantes da absorção de água (*hidroexpansibilidade*⁴), o

³ *Off-set* é uma impressão litográfica onde a tinta que forma a imagem no prato rígido é transferida para uma blanda de borracha e desta para a superfície do papel.

⁴ Expressão usada para indicar variações dimensionais do papel, em virtude de alterações no teor de umidade causadas pela exposição à água na fase líquida, equivalendo-se ao termo higroexpansão no caso de exposição à umidade do ar ambiente.

encanoamento (*curl*) em consequência da expansão ou contração não uniforme entre as camadas da folha de papel, o *cockling*, caracterizado por pequenas saliências que distorcem a planicidade do papel em posições aleatórias, a criação de bordas onduladas ou esticadas, comuns em situações em que existem diferenças de umidade relativa ou temperatura entre o local de estocagem e o de uso do papel, o que provoca problemas na alimentação de impressoras e de encolhimento assimétrico durante a fusão térmica do *toner* em máquinas copiadoras ou na secagem da tinta em impressoras.

Foram identificadas diversas variáveis que influenciam a estabilidade dimensional do papel. Scott e Abbott [1995] enumeram fatores relacionados à composição do papel (tipo de fibra, cargas minerais e aditivos), à preparação da pasta (refinação) e, também, ao processo de fabricação na máquina de papel (operações de formação, prensagem, secagem, calandragem e conversão). Além destes fatores, Casey [1961] menciona a influência da porosidade do papel e das condições de operação da máquina de papel na estabilidade dimensional. Uesaka [1991] se refere a aspectos de refinação, modificações químicas, não uniformidade e anisotropia das propriedades mecânicas e higrotérmicas e operação da máquina de papel, associados à estabilidade dimensional, indicando efeitos da caixa de entrada, do formador, das prensas e dos secadores. Kajanto; Niskanen [1998] apresentam considerações quanto ao tipo de fibras e utilização de aditivos na composição do papel, sobre a aplicação de amido interno e aos efeitos das operações de prensagem, secagem e calandragem.

De forma similar, outros autores também reconhecem os efeitos das operações de fabricação sobre a estabilidade dimensional, dentre os quais, Gates; Kenworthy [1963], Setterholm; Chilson [1965], Setterholm; Kuenzi [1970], Shands; Genco [1988], Wedel [1989b], Pulkowski [1991], Weise [1997] e MacGregor [2001].

No presente trabalho, por meio da verificação do perfil de higroexpansibilidade ao longo das seções da máquina, foram analisadas as influências da seção de formação, prensagem, secagem, colagem e calandragem sobre as propriedades higroexpansivas do papel.

Os resultados obtidos nas medições de higroexpansibilidade do papel, associados aos resultados de testes físicos realizados com as amostras coletadas, simultaneamente, nos mesmos pontos da máquina de papel, permitiram correlacionar propriedades, a fim de inferir conclusões sobre a influência de cada operação de fabricação.

1.2 Objetivos do trabalho

A finalidade principal deste trabalho é estudar os efeitos das operações envolvidas no processo de fabricação industrial, sobre a higroexpansibilidade do papel.

O produto escolhido, para o desenvolvimento do presente trabalho, foi um papel reprográfico, com gramatura de 75 g/m^2 , produzido a partir de pasta química branqueada de eucalipto, em máquina de alta velocidade, operando a 1256 m/min na enroladeira.

Adicionalmente, em função da discussão dos resultados obtidos, o estudo tem o objetivo de apresentar sugestões para o controle da higroexpansibilidade do papel analisado.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está apresentada de acordo com a estrutura indicada a seguir:

Capítulo 2: Apresenta uma revisão de trabalhos relevantes já publicados, que abordam a estabilidade dimensional do papel, organizada de forma a reunir informações relacionadas ao fenômeno da higroexpansibilidade e seus efeitos sobre a estabilidade dimensional e à apresentação de fatores que influenciam, de forma direta ou indireta, a higroexpansibilidade de papel reprográfico produzido em máquina industrial.

Capítulo 3: Descreve a metodologia adotada para a coleta das amostras, em uma máquina industrial, para a caracterização da pasta celulósica utilizada na fabricação do papel e execução de ensaios de higroexpansibilidade e testes para determinação de outras propriedades, com o papel proveniente da máquina e com folhas isotrópicas formadas manualmente em laboratório;

Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos nos procedimentos de caracterização da pasta de papel e nos ensaios e testes realizados com as amostras da máquina e com as folhas manuais de laboratório;

Capítulo 5: Dedicado à discussão dos resultados de higroexpansibilidade do papel ao longo da máquina e na seção transversal da enroladeira, bem como à análise correspondente dos efeitos de cada operação no processo de fabricação do papel;

Capítulo 6: Contém conclusões sobre o trabalho realizado, sugestões para controle da higroexpansibilidade do papel e propostas para estudos futuros.

Capítulo 7: Reúne as referências bibliográficas.

Apêndice

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

A estabilidade dimensional do papel tem sido estudada há muitos anos. Uma grande quantidade de trabalhos abordando esta propriedade foi desenvolvida, a fim de esclarecer os mecanismos associados à higroexpansão das fibras celulósicas e determinar como este fenômeno pode ser influenciado por fatores decorrentes da composição do papel, das variáveis envolvidas na preparação da pasta e das operações que constituem o processo de fabricação do papel. Os estudos também revelaram os efeitos da higroexpansão em diversas manifestações de instabilidade dimensional do papel. A seção 2.2 mostra os fatores que determinam a umidade do papel, a relação entre as variações de umidade e as alterações dimensionais e aspectos relativos à definição e caracterização da higroexpansibilidade do papel. A seção 2.3 apresenta fatores que influem na higroexpansibilidade de papéis produzidos em máquinas industriais e, finalmente, a seção 2.4 mostra efeitos da higroexpansibilidade sobre diversos fenômenos de instabilidade dimensional do papel, tais como encolhimento e encanoamento (*curl*) da folha e a formação de ondulações superficiais localizadas (*cockles*).

2.2 Higroexpansibilidade do papel

A *higroexpansibilidade* é a propriedade que produz alterações dimensionais no papel em consequência de variações no seu teor de umidade e que se constitui, em geral, de uma função complexa da estrutura do papel e das propriedades higroelásticas das fibras celulósicas que o compõe, as quais se dilatam ou se contraem sob a influência da absorção ou dessorção de água. Vários fatores determinam a modificação do teor de umidade do papel. Esta variação pode ser causada por alterações da umidade relativa ou da temperatura do ambiente, com o qual o papel se encontra em equilíbrio, pela aplicação de água, na fase líquida, à sua superfície (em processos de impressão *off-set*, p.ex.) ou, também, pelo aquecimento da folha, como acontece, por exemplo, com o papel reprográfico usado em máquinas copiadoras ou com o papel utilizado nas impressoras a *laser*.

2.2.1 Umidade e higroexpansão do papel

As fibras celulósicas são higroscópicas e absorvem água rapidamente. Em condições de equilíbrio, a umidade do papel depende da umidade relativa e da temperatura do ar no ambiente.

2.2.1.1 Umidade de equilíbrio

A umidade do papel é comumente expressa em base seca, por meio da razão entre a massa de água presente na folha e a massa de sólidos secos, ou seja:

$$W_p = \left(\frac{M_t - M_d}{M_d} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

onde:

W_p umidade do papel, %

$M_w = (M_t - M_d)$, massa de água contida na amostra, g

M_d Massa seca da amostra, após secagem, durante no mínimo duas horas, em estufa à 105 °C, g

M_t Massa total inicial da amostra de papel úmido, g

A umidade relativa do ar indica a quantidade de vapor d'água presente no ar em relação à quantidade de vapor na condição de saturação e, por definição, é expressa pela razão entre a pressão parcial do vapor d'água do ambiente e a pressão de vapor na condição de saturação:

$$RH = \left(\frac{P_w}{P_{w,s}} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

onde:

RH umidade relativa do ar, %

p_w pressão parcial do vapor d'água do ambiente, Pa

$p_{w,s}$ pressão de vapor de saturação, Pa

A umidade do papel em condição de equilíbrio com o ambiente diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o incremento da umidade relativa do ar, *cf.* indicado nas curvas isotermas, apresentadas na Figura 2.1. Quando o papel contém mais umidade que o valor de equilíbrio em contato com o ar a uma dada umidade relativa e temperatura, perderá água até atingir o valor de equilíbrio. No caso oposto, quando sua umidade for menor, absorverá água até atingir o valor de equilíbrio.

Na situação em que o ar encontra-se totalmente seco ($RH = 0\%$), o valor da umidade de equilíbrio para todos os papeis será zero [Mujumdar, 1995]. Na condição de saturação à $T = 22^\circ\text{C}$ e $RH = 100\%$, a umidade de equilíbrio do papel situa-se, tipicamente, entre 25% e 30%. Em condição de umidade relativa constante, a umidade do papel depende, fundamentalmente, da temperatura ambiente.

A umidade de equilíbrio depende, também, do tipo de pasta utilizada na fabricação do papel. A pasta mecânica freqüentemente retém mais umidade que a pasta química, fato mostrado nas curvas da Figura 2.2 [Prah⁵, 1968 apud Kajanto; Niskanen, 1998]. Segundo Weise [1997] e Nanri; Uesaka [1993], a quantidade de finos⁶ presentes na pasta mecânica constitui o principal fator determinante da umidade de equilíbrio.

Comparando-se as isotermas, no processo de absorção de água, a partir da condição mais seca (a) e no processo de dessorção, a partir da condição mais úmida (b), observa-se que apresentam diferença no conteúdo de umidade do papel para uma mesma umidade relativa e temperatura do ar. Esta diferença torna-se mais acentuada na região de altas umidades ou de baixas temperaturas. O efeito de histerese, bastante

⁵ Prah⁵, J.M. *Thermodynamics of paper fiber and water mixtures*, Ph.D. thesis, Harvard University, USA, 1968.

⁶ Fibras muito curtas ou fragmentos de fibras gerados no processo de refinação (da pasta celulósica), em geral, com comprimentos inferiores a 0,2 mm.

evidente nas curvas mostradas na Figura 2.2, mostra que a umidade de equilíbrio do papel depende do seu próprio histórico de umidade, ou seja, cada ponto de equilíbrio atingido depende da condição precedente e do caminho de absorção ou dessorção de água.

Figura 2.1. Umidade do papel vs. umidade relativa do ar a diferentes temperaturas [Prah⁵, 1968 apud Kajanto; Niskanen, 1998].

A isoterma inferior, denominada curva de absorção primária, é obtida quando o papel é equilibrado com a umidade relativa do ambiente, sucessivamente, desde um estado perfeitamente seco ($RH = 0\%$) até atingir a saturação ($RH = 100\%$). De forma similar, a isoterma superior (referida como curva primária de dessorção) será obtida quando o início do processo ocorrer com o papel em equilíbrio no estado de saturação do ambiente ($RH = 100\%$) e for, progressivamente, exposto a ambientes mais secos, até atingir a condição de umidade relativa nula ($RH = 0\%$).

A umidade final de equilíbrio do papel se localizará dentro da área delimitada pelas duas isotermas e dependerá do histórico de variação da umidade relativa do ambiente [Chatterjee; Ramarao; Tien, 1997].

Figura 2.2. Umidade do papel vs. umidade relativa do ar para amostras de pasta química e pasta mecânica ($T = 50^{\circ}\text{C}$) [Prah⁵, 1968 apud Kajanto; Niskanen, 1998].

A “difusão” ou migração de umidade no interior do papel depende da sua gramatura e a sua variação não acompanha imediatamente as mudanças súbitas nas condições do ambiente. O reflexo no papel não acontece imediatamente para atingir o novo equilíbrio. Em processos de difusão ordinária, a variação do teor de umidade é proporcional à raiz quadrada do tempo e, portanto, os tempos de difusão devem ser, geralmente, proporcionais ao quadrado da gramatura do papel. Este efeito é válido para papéis com gramaturas relativamente altas. Para papéis de baixo peso, a relação entre a gramatura e o tempo de difusão de umidade dentro do papel é linear [Brecht⁷, 1962 e Niskanen; Kuskowski; Bronkhorst⁸, 1997 apud Kajanto; Niskanen, 1998].

⁷ Brecht, W., in *The Formation and Structure of Paper*, Ed. F. Bolam, London, 1962, p.427-460.

⁸ Niskanen, K.J.; Kuskowski, S.J.; Bronkhorst, C.A. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, vol. 12 n.2, p.103, 1997.

2.2.1.2 Interação da água com as fibras do papel

A interação da água com as fibras celulósicas determina os mecanismos de expansão e contração do papel. As fibras se incham quando absorvem água e encolhem quando a água é removida. Um modelo para explicar os mecanismos de inchação (*swelling*) e de contração (*shrinkage*) das fibras foi desenvolvido por Scallan⁹, apud Kajanto; Niskanen [1998], *cf.* indicado na Figura 2.3. Segundo este pesquisador, as fibras se dilatam com o aumento de umidade, devido à penetração das moléculas de água nas interligações constituídas por pontes de hidrogênio entre as fibrilas¹⁰. A quantidade de moléculas de água ligada (*bond water*)¹¹ aumenta, produzindo diminuição do grau de interligação interna na parede das fibras. O fenômeno oposto, que ocorre durante a dessorção de água, produz o encolhimento das fibras. O mecanismo de inchação das fibras por absorção de água pode ser intensificado pela operação de refinação da pasta celulósica, devido ao aumento de fibrilação das paredes das fibras, o que facilita a criação de ligações das moléculas de água com elementos das paredes. Este efeito foi observado em vários estudos, podendo ser citado o apresentado por Page¹², apud Kajanto; Niskanen [1998].

Um fenômeno que provoca perda irreversível na capacidade de absorção ou de retenção de água, é denominado “*hornification*”.¹³ O fenômeno ocorre com as fibras celulósicas após secagem ou reciclagem do papel e causa uma diminuição de WRV¹⁴ da pasta celulósica. Ou seja, no re-umedecimento do papel, que já foi seco, a quantidade de água absorvida será menor que antes de ser submetido à secagem. Este

⁹ Scallan, A.M. The structure of the cell wall of wood: A Consequence of Anisotropic Inter-Microfibrillar Bonding. *Wood Science*, vol.6, n.3, p.266-271, 1974.

¹⁰ Elementos filiformes presentes na estrutura da parede das fibras celulósicas, as quais agregam as micro-fibrilas, reunião de lamelas, onde se encontram as cadeias de moléculas de celulose.

¹¹ A água ligada (*bond water*) é definida como a água que interage com as fibras celulósicas. As moléculas de água formam pontes de hidrogênio com hidroxilas livres na celulose e hemiceluloses. A água é, também, retida nas partes amorfas, na micro-estrutura das fibras e nas vizinhanças das moléculas de água ligadas à celulose. Adicionalmente, a água é retida em poros e interstícios e imobilizada, até certos limites, em poros e espaços entre as fibras [Wesel, 1997].

¹² Page, D.H. In: *Fundamentals of Papermaking*, ed. C.F.Baker; V.W.Puton, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1989, vol.1, p.18.

¹³ Termo utilizado por Jayme [1958], para expressar o decréscimo percentual de WRV observado em pastas celulósicas após a secagem e posterior re-umedecimento (literalmente, “*irreversible cornification*”, do alemão “*irreversible verhornung*”).

¹⁴ *Water Retention Value* - teste utilizado para determinar, empiricamente, a habilidade que têm as fibras de celulose, de reter água no interior da sua estrutura (*cf.* TAPPI UM-256, 1981).

fenômeno ocorre de forma mais intensa com pastas químicas e está relacionado com alterações químicas e estruturais, irreversíveis, das fibras celulósicas, durante o processo de remoção de água, provavelmente, causado pelo colapso irreversível de poros situados entre as fibrilas, na etapa de D para B, indicada na Figura 2.3.

Figura 2.3. Diminuição sucessiva da interligação entre fibrilas celulósicas causada pela absorção de água, de A para D (inchação) ou aumento da interligação causada pela remoção de água, de D para A (encolhimento) [Scallan⁹, 1974 apud Kajanto; Niskanen,1998].

O processo de “*hornification*” está fortemente relacionado a ciclos de umedecimento e ao histórico de temperatura *cf.* pode ser visto em Kato; Cameron [1999] e possui interpretação química, de acordo com Fernandes Diniz *et al.*[2004].

A Figura 2.4 resume os principais resultados obtidos por Weise [1997] em estudo desenvolvido para analisar as alterações que ocorrem na seção transversal de fibras celulósicas, causadas pela remoção de água. As faixas de umidade características encontradas nas três operações principais encontradas em uma máquina de papel são indicadas na parte superior para comparação.

Nas máquinas de papel atuais, a seção de prensas pode remover água até que a folha atinja níveis de 45% – 48% de teor de sólidos¹⁵. Neste estágio, as fibras passam por modificações, causadas pela remoção de água, além de alterações estruturais devido à operação de prensagem. O encolhimento das fibras, em termos de diminuição de volume, foi observado em uma faixa larga de umidade. Uma acentuada diminuição na largura aparente da fibra ($D_{\max}$) foi observada no final do processo de secagem. O efeito de “*hornification*” foi observado pela remoção de água (*wet hornification*) na zona equivalente a seção de prensas e, também, pela operação de secagem, no caso, em estufa (*dry hornification*).

Figura 2.4. Remoção de frações de água e modificações na seção transversal das fibras vs. teor de sólidos nas operações de fabricação de papel. As dimensões transversais das fibras foram medidas por um microscópio de varredura a laser (CLSM – *Confocal Laser Scanning Microscopy*) e as frações de água, medidas por técnica de calorimetria diferencial (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*) [Weise 1997].

¹⁵ Razão entre a massa de sólidos secos e a massa total da amostra.

A remoção de água livre (*free water*)¹⁶, FW, ocorreu com taxa constante até o teor de sólidos atingir níveis de 62 – 65%, embora alguns traços tenham sido detectados até 70% de teor de sólidos ou mesmo em níveis ligeiramente superiores. Observou-se que água livre, e parte da água ligada contida no interior das paredes das fibras (*freezing bound water*)¹⁷, BW_f, foram, até certo alcance, removidas em paralelo, enquanto que, em apenas uma pequena faixa de teor de umidade da amostra celulósica, água ligada às paredes das fibras (BW_f) e água ligada quimicamente (*nonfreezing bound water*)¹⁸, BW_{nf}, foram removidas ao mesmo tempo. O enrugamento superficial das células das fibras teve início quando a maior parte de água livre havia sido removida. A diminuição na largura aparente da fibra (D_{max}), observada no final do processo de secagem, ocorreu durante a remoção da última parcela de água ligada (BW_{nf}).

2.2.1.3 Fenômeno geral da higroexpansão do papel

A *higroexpansão* do papel, na direção longitudinal ou transversal é, por definição, a razão entre a variação dimensional, resultante de uma alteração no teor de umidade, e a sua dimensão inicial [Kajanto; Niskanen, 1998]:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (2.3)$$

onde:

ε_h higroexpansão, %

Δl variação no comprimento da amostra, mm

l_0 comprimento inicial da amostra, mm

¹⁶ A água livre é definida como aquela que não pertence à parcela de água ligada, *cf.* definição que se encontra na nota 11. Encontra-se nos poros entre as fibras e no lúmen das fibras. Portanto, o conteúdo total de água corresponde à soma das parcelas de água livre e água ligada.

¹⁷ *Freezing bound water* – parcela de água ligada, localizada nos poros das paredes das fibras.

¹⁸ *Nonfreezing bound water* – parcela de água, contida nas fibras, ligada quimicamente a grupos hidroxilas e carboxilas.

Observa-se, na Figura 2.5, que o papel se deforma em função da variação do teor de umidade. Porém, segundo Uesaka; Moss; Nanri [1991], o processo de expansão e contração do papel, devido à mudança no teor de umidade, não é linear, nem reversível, em todas as condições.

Em ensaios realizados com papel produzido a partir de pasta química, observou-se, para folhas manuais (*handsheets*)¹⁹, um comportamento linear e reversível para a higroexpansão na região de baixas umidades, *cf.* indicado na Figura 2.5(a). Porém, a primeira exposição a um alto teor de umidade e posterior secagem produziu uma resposta não linear e um encolhimento irreversível. Após o tratamento com alguns ciclos de variação de umidade, o papel passou a apresentar comportamento relativamente reversível, embora ainda ligeiramente não linear, tanto na etapa de umedecimento, quanto na etapa de secagem. O mesmo comportamento já havia sido observado anteriormente por Uesaka *et al.* [1989]. Para as amostras secadas livremente, o resultado indicado na Figura 2.5(b) mostra um comportamento quase reversível e linear em função da umidade.

Figura 2.5. Higroexpansão vs. umidade do papel: (a) para folhas manuais secadas com restrição ao encolhimento e (b) para folhas manuais secadas livremente. As amostras utilizadas são de papel produzido com pasta química sulfito não refinada [Uesaka; Moss; Nanri, 1991].

¹⁹ Folhas produzidas manualmente em laboratório, destinadas a testes e ensaios para medição de propriedades do papel.

A dependência do histórico de umidade, no resultado das alterações dimensionais observadas acima, tem sido atribuída às tensões internas desenvolvidas durante o processo de secagem do papel.²⁰ De fato, o papel é secado em máquinas industriais com restrição ao encolhimento, o que desenvolve tensões internas nas direções longitudinal e transversal da folha de papel. A magnitude destas tensões depende do grau de restrição ao encolhimento aplicado ao papel durante o processo de secagem (que difere nas direções MD e CD da máquina), do histórico de temperatura e umidade relativa, da orientação de fibras e do tipo de pasta celulósica utilizada na fabricação [Bortolin, 2002].

As tensões residuais internas do papel são liberadas quando o teor de umidade ultrapassa certo nível. Como resultado, o papel apresenta um encolhimento irreversível, no caso em que foi secado com restrição ao encolhimento, como indicado na Figura 2.5(a). O encolhimento se manifesta quando o papel retorna ao teor de umidade original. Em outros termos, o encolhimento irreversível apresentado corresponde ao encolhimento que o papel teria exibido, se tivesse secado livremente. Os resultados observados na Figuras 2.6(a) e 2.6(b) correspondem ao comportamento do papel secado em máquina industrial, nas direções longitudinal (MD) e transversal (CD), respectivamente. Amostras de papel da direção MD mostram a mesma falta de linearidade e encolhimento irreversível indicado na Figura 2.5(a), devido à tensão aplicada ao papel nos passes das seções de secagem (*draws*) enquanto as amostras da direção CD apresentam resultados correspondentes ao da Figura 2.5(b).

2.2.1.4 Higroexpansão da folha de papel

O papel é constituído por fibras celulósicas orientadas no plano da folha, distribuídas aleatoriamente e interligadas, formando uma trama porosa. Segundo Gallay [1973], a higroexpansão das fibras individuais é marcadamente anisotrópica. As micro-fibrilas, presentes na estrutura das paredes das fibras, encontram-se orientadas essencialmente na direção paralela à do eixo longitudinal das fibras e a maior parte da deformação dimensional se desenvolve na direção transversal, *i.e.*, perpendicularmente ao eixo da

²⁰ Ver seção 2.4.1.2.

fibra. Na faixa de umidade relativa entre 0% e 100%, as deformações causadas pela variação do teor de umidade na direção axial da fibra são da ordem de 1 %, enquanto que, na direção transversal, atingem valores da ordem de 20 %. Valores da ordem de 1% a 2% na direção longitudinal e 20% a 50% na direção transversal das fibras foram encontrados por Page; Tydeman²¹ [1962 apud Uesaka, 1994].

Figura 2.6. Relação entre higroexpansão e teor de umidade: (a) na direção MD e (b) na direção CD – *fine paper*, 90.1 g.m⁻² [Uesaka; Moss; Nanri, 1992].

Quando ocorre uma alteração no teor de umidade ou na umidade relativa do ambiente, as deformações sofridas por uma fibra são transmitidas às fibras vizinhas, através da estrutura formada pela rede de fibras interligadas. O grau de transferência das alterações dimensionais de uma fibra para outras, pode ser afetado por diversos fatores, tais como a intensidade das interligações entre elas, a curvatura (*curliness*) das fibras, as dimensões das fibras, a orientação e a razão de rigidez entre a direção axial e transversal da fibra. Devido à complexidade da rede de fibras e às interações entre as propriedades mecânicas e a higroexpansão, torna-se difícil a interpretação de resultados experimentais de higroexpansão, em termos da estrutura do papel e das propriedades das fibras.

²¹ Page, D.H.; Tydeman, P.A., in: *The Formation and Structure of Paper*, vol.2, ed. F.Bolam, London, 1962, p.397.

Uesaka [1994] derivou uma fórmula geral para a higroexpansão, a fim de relacionar a higroexpansão individual das fibras com a higroexpansão da folha de papel. Nesta abordagem, a higroexpansão do papel é determinada por dois fatores principais: a higroexpansão individual das fibras, incluindo as deformações na direção axial e na direção transversal, e a eficiência na transferência de tensão entre a rede e as fibras individualmente. Considerando um comportamento isotrópico para as propriedades higroelásticas das fibras na direção transversal, *i.e.*, que as propriedades na direção longitudinal são diferentes daquelas na direção transversal das fibras, porém, no plano transversal, as propriedades são isotrópicas, a higroexpansão da folha de papel, nas direções MD e CD da máquina, pode ser expressa, de forma aproximada, pelas equações a seguir:

$$\mu_{11} = \mu_L^f + b_1(\mu_T^f - \mu_L^f) \quad (2.5)$$

$$\mu_{22} = \mu_L^f + b_2(\mu_T^f - \mu_L^f) \quad (2.6)$$

onde:

μ_{11} e μ_{22} higroexpansão do papel nas direções MD e CD, %.

μ_L^f e μ_T^f higroexpansão das fibras individuais nas direções longitudinal e transversal, %.

b_1 e b_2 fatores de transferência de tensão para a direção transversal da fibra quando a folha é tensionada na direção longitudinal ou na direção transversal, respectivamente.

Observa-se, nas expressões (2.5) e (2.6), que a higroexpansão da folha de papel resulta de uma combinação entre a higroexpansão transversal e a longitudinal das fibras (μ_L^f e μ_T^f). A importância relativa de cada um destes componentes depende do fator de transferência de tensão (b_1 e b_2), determinado pelas dimensões das fibras e pelo grau das ligações entre elas que, por sua vez, é influenciado por propriedades estruturais, tais como a orientação de fibras e a densidade do papel e pelas operações

envolvidas na fabricação, tais como a refinação, o tensionamento da folha úmida e as tensões induzidas pelo processo de secagem.

Uesaka; Qi [1994] investigaram os efeitos das ligações químicas entre as fibras sobre a higroexpansibilidade. O grau de ligação entre fibras depende da área de ligação (determinada, tipicamente, pela pressão usada na operação de prensagem úmida do papel) e da intensidade de ligação (função do número de pontos ligados por unidade de área de ligação). A intensidade das ligações pode ser controlada por meio de utilização de agentes químicos específicos, destinados a aumentar ou diminuir os pontos de ligamento entre os elementos das fibras.

Os resultados do estudo mostraram que aumentos no módulo de elasticidade do papel (resultantes da variação no grau de interligação das fibras) produziram elevações na higroexpansibilidade, porém, afetadas por outros fatores, marcadamente pela forma de secagem das amostras (secadas com ou sem restrição ao encolhimento). A Figura 2.7 mostra uma comparação de higroexpansibilidade entre folhas manuais formadas com orientação de fibras, sem finos, secadas livremente ou com restrição ao encolhimento e produzidas com pasta mecânica. O aumento no grau de interligação das fibras (indicado pelo aumento no módulo de elasticidade²²) provocou aumento no coeficiente de higroexpansibilidade nos dois tipos de papel, mas, os efeitos foram mais intensos nas amostras secadas livremente e na direção CD da folha. É interessante observar que, com a diminuição do grau de ligação inter-fibras (decréscimo do módulo de elasticidade), os valores de higroexpansibilidade, tanto na direção MD como CD, são convergentes, para amostras secadas livremente ou com restrição ao encolhimento.

Quanto à pressão de prensagem úmida do papel, Uesaka; Qi [1994] não observaram efeito expressivo deste parâmetro sobre a higroexpansibilidade, em diversos graus de interligação entre as fibras, em folhas manuais isotópicas sem branqueamento, sem finos, produzidas com pasta mecânica kraft e secadas com restrição ao encolhimento, ilustrado na Figura 2.8.

²² Módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é a razão entre a tensão aplicada sobre um corpo elástico e a deformação por ela provocada.

Figura 2.7. Relação entre coeficiente de higroexpansibilidade e módulo de elasticidade específico nas direções MD e CD para folhas manuais anisotrópicas, sem finos, secadas livremente ou com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta mecânica [Uesaka; Qi,1994].

Estudos de Uesaka [1994], em que foram utilizadas folhas manuais anisotrópicas, secadas com restrição ao encolhimento, sem branqueamento e sem refinação, produzidas com pasta química kraft, indicaram uma influência significativa da pressão de prensagem úmida sobre a higroexpansibilidade, mas dependente do grau de orientação das fibras (Figura 2.9). Nota-se que o efeito da prensagem úmida diminui com o decréscimo da orientação das fibras (diminuição da razão entre a rigidez MD e CD) e se anula na condição de isotropismo, indicada na Figura 2.9 pelo ponto de valor unitário da razão de rigidez. Este fato corrobora a insensibilidade à pressão de prensagem mostrada na Figura 2.8 por Uesaka; Qi [1994].

A Figura 2.10 ilustra dois casos típicos de geometria estrutural de ligação entre as fibras, sugeridas por Uesaka; Qi [1994], a fim de estudar, quantitativamente, a taxa de transferência de tensão²³ das fibras, individualmente, para a rede que constitui a folha de papel. Modelos baseados em elementos finitos foram utilizados, a fim de encontrar valores numéricos para a taxa de transferência de tensão em função do

²³ A taxa de transferência de tensão é definida pela razão entre a tensão transferida na direção transversal e na direção axial da fibra, quando o papel é submetido a uma tensão uniaxial na direção MD ou CD da máquina.

comprimento de contato entre as fibras, para as duas conformações assumidas para a geometria de ligação.

Figura 2.8. Relação entre coeficiente de higroexpansibilidade e módulo de elasticidade específico para folhas manuais isotrópicas, sem branqueamento, sem finos, secadas com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta química kraft de fibra longa [Uesaka; Qi 1994].

Figura 2.9. Relação entre o coeficiente de higroexpansibilidade e a razão MD/CD da rigidez à tração (orientação de fibras) para folhas manuais anisotrópicas, sem branqueamento, sem finos, secadas com restrição ao encolhimento, produzidas com pasta química kraft [Uesaka, 1994].

Figura 2.10. Modelos simplificados para as ligações entre fibras, quando a fibra inferior se encontra alinhada nas direções MD e CD da máquina [Uesaka; Qi 1994].

A equação abaixo, derivada por Uesaka [1994], a partir de uma análise micro-mecânica, para a higroexpansibilidade na direção x_l do papel (válida para a direção MD ou CD da máquina), foi usada por Uesaka; Qi [1994], a fim de relacionar as configurações geométricas propostas para as ligações das fibras com a higroexpansão do papel nas direções MD e CD:

$$\mu^* = \mu_{11}^f + (\mu_{22}^f - \mu_{11}^f) \frac{\gamma_2}{1 + \gamma_2 + \gamma_3} + (\mu_{33}^f - \mu_{11}^f) \frac{\gamma_3}{1 + \gamma_2 + \gamma_3} \quad (2.7)$$

onde:

μ^* higroexpansão do papel na direção MD ou CD

μ_{11}^f higroexpansão na direção axial da fibra

μ_{22}^f higroexpansão na direção da largura da fibra

μ_{33}^f higroexpansão na direção da espessura da fibra

e os parâmetros γ_2 e γ_3 são definidos da seguinte forma:

$$\gamma_2 = \frac{\langle \sigma_{22}^f \rangle}{\langle \sigma_{11}^f \rangle}, \quad \gamma_3 = \frac{\langle \sigma_{33}^f \rangle}{\langle \sigma_{11}^f \rangle} \quad (2.8)$$

sendo:

$\langle \sigma_{22}^f \rangle$ tensão média transferida na direção da largura da fibra

$\langle \sigma_{33}^f \rangle$ tensão média transferida na direção da espessura da fibra

$\langle \sigma_{11}^f \rangle$ tensão média transferida na direção axial da fibra

Quando o papel é submetido à tensão uniaxial na direção x_1 , sob condição constante de umidade, a tensão é transferida para as fibras na trama que constitui a folha de papel, nas direções axial e transversal. O parâmetro γ_2 representa a razão entre a tensão média transferida para direção da largura da fibra e a tensão média transferida para a direção axial. De forma similar, o parâmetro γ_3 é definido para a direção da espessura da fibra. Em outras palavras, estes parâmetros representam a razão de transferência de tensão entre a direção “transversal” e a direção “axial” das fibras quando o papel é submetido a uma tensão uniaxial. Portanto, estes parâmetros dependem somente das propriedades mecânicas das fibras e da folha de papel e estão relacionados com o mecanismo de transferência de tensão na rede de fibras.

Para a configuração indicada na Figura 2.10(a), os resultados da análise com elementos finitos mostraram que, embora a taxa de transferência aumente significativamente com o acréscimo do comprimento de ligação, sua ordem de grandeza é de centésimos, ou seja, os parâmetros γ_2 e γ_3 assumem valores muito baixos e a equação (2.7) pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\mu^* = \mu_{11}^f + (\mu_{22}^f - \mu_{11}^f) \gamma_2 + (\mu_{33}^f - \mu_{11}^f) \gamma_3 \quad (2.9)$$

Uma vez que a higroexpansão radial das fibras é muito maior que a higroexpansão axial [Gallay, 1973], observa-se que o aumento de γ_2 e γ_3 resulta no incremento da higroexpansibilidade do papel, predominantemente por efeito da higroexpansão radial das fibras.

Assim, a baixa influência do grau de ligação das fibras sobre a higroexpansibilidade do papel, observada para folhas secadas com restrição ao encolhimento (Figura 2.8), sugere que a higroexpansão destas folhas foi determinada, principalmente, pela higroexpansão axial das fibras. Isto também explica por que a higroexpansão na direção MD, é quase independente do grau de interligação das fibras (Figura 2.7), caracterizando a geometria da Figura 2.10(a) como típica para a direção MD do papel.

Por outro lado, o estudo da configuração geométrica indicada na Figura 2.10(b), indicou uma taxa de transferência de tensão cerca de 10 vezes superior à encontrada para a configuração da Figura 2.10(a), considerando o mesmo comprimento de ligação (18,75 μm). Este resultado se deve, simplesmente, ao fato de que a região curva da ligação entre as fibras funciona com um elemento muito eficaz de transferência de tensão entre as fibras. A configuração indicada na Figura 2.10(b) é encontrada, tipicamente, nas fibras da folha de papel orientadas na direção CD da máquina. A mesma estrutura pode ser encontrada em ligações entre fibras altamente flexíveis e em ligações de fibras em folhas secadas livremente. Devido ao elevado valor do parâmetro γ na equação (2.9), um grande efeito do grau de ligação inter-fibra é esperado, como acontece com higroexpansividade do papel na direção CD da máquina (Figura 2.7), especialmente quando a folha de papel é secada livremente.

Em experimentos realizados com folhas laboratoriais, sem orientação de fibras, a fim de verificar os mecanismos de higroexpansão, Nanko; Tada [1995] compararam a deformação das fibras individuais com a da folha de papel. Mostraram que as curvas características de dilatação e contração da seção transversal das fibras e da folha de papel, em função da variação do teor de umidade, têm formas semelhantes, porém, com diferença significativa na magnitude das alterações dimensionais, pois a

higroexpansão medida para as paredes das fibras foi muito mais pronunciada que a da folha.

A fim de avaliar a relação entre a higroexpansão das fibras e a higroexpansão da folha de papel, compararam o comportamento de diferentes tipos de pastas submetidas a diferentes tratamentos (por exemplo, celulose produzida sem operação de secagem ou celulose previamente seca, processo de secagem da folha com ou sem restrição ao encolhimento). O resultado indicou que o encolhimento irreversível das paredes das fibras, após ciclos de absorção e dessorção de água, não se relaciona diretamente com o encolhimento da folha de papel.

Quanto à influência das ligações entre as fibras na deformação das folhas submetidas à variação no teor de umidade, verificaram que os comportamentos higroexpansivos longitudinais de segmentos ligados e segmentos livres são diferentes. Os ligados se deformam de forma similar às fibras, enquanto os segmentos livres se contraem e se expandem de forma irregular, independentemente do método de secagem.

2.2.2 Coeficiente de higroexpansibilidade do papel

Kajanto; Niskanen [1998] apresentam o coeficiente de higroexpansibilidade definido pela razão entre a higroexpansão do papel e a variação do teor de umidade associado à alteração dimensional, ou seja:

$$\beta = \frac{\varepsilon_h}{\Delta W_p} \quad (2.10)$$

onde:

β coeficiente de higroexpansibilidade

ε_h higroexpansão, %

ΔW_p variação do teor de umidade do papel, %

O coeficiente de higroexpansibilidade β corresponde ao gradiente da região linear e reversível da curva de higroexpansão do papel, em função da variação do teor de umidade [Nanri; Uesaka, 1993].

Embora Uesaka; Moss; Nanri [1991] defendam que a higroexpansibilidade do papel deva ser monitorada em função do teor de umidade e não da umidade relativa do ar, devido ao forte efeito de histerese encontrado entre a umidade do papel e a umidade relativa do ar, por praticidade, a caracterização da higroexpansibilidade do papel é feita por meio de medição da higroexpansão de uma amostra, quando submetida a uma dada variação na umidade relativa do ambiente.

A norma ISO 8226-1 [1994], que estabelece a metodologia atualmente estabelecida como padrão internacional de medição, define higroexpansibilidade como a alteração dimensional do papel que ocorre em função da relaxação de tensões e da dilatação ou contração das fibras causada por absorção ou dessorção de água, respectivamente. A proporção dos dois mecanismos que causam higroexpansão depende do limite superior da umidade relativa do ambiente. Para o propósito da norma mencionada acima, o limite superior de 68% foi definido, a fim de minimizar os efeitos da relaxação de tensões sobre a higroexpansão do papel.

A equação, a seguir, é utilizada para o cálculo da higroexpansibilidade, na faixa de umidade relativa do ar de 33% a 66 %:

$$X = \frac{(l_{66} - l_{33})}{l_0} \times 100 \quad (2.11)$$

onde:

X higroexpansibilidade, %

l_0 comprimento inicial do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(50 \pm 5) \%$, mm

l_{33} comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(33 \pm 2) \%$, mm

l_{66} comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(66 \pm 2) \%$, mm

Observe-se que o cálculo de higroexpansibilidade (X), definido pela norma ISO 8226-1 [1994] é equivalente ao cálculo da higroexpansão do papel (ε_h), indicado na equação (2.3), diferindo do coeficiente de higroexpansibilidade (β) abordado acima (equação 2.10).

2.2.3 Medição da higroexpansibilidade do papel

Tradicionalmente, para as determinações experimentais de higroexpansibilidade, o padrão atual adotado consiste em caracterizar a higroexpansão do papel. O método consiste em levar amostras ao equilíbrio com o ar, em ambiente controlado a uma dada umidade relativa e temperatura. Após alteração da umidade relativa, as amostras são novamente equilibradas, porém, em um nível mais elevado de umidade relativa. A higroexpansão, *i.e.*, a variação dimensional do papel devido à alteração de umidade relativa é, então, medida e usada para caracterizar a higroexpansibilidade do papel [ISO 8226-1, 1994].

Na verdade, a higroexpansão do papel é extremamente dependente do histórico de variação da umidade. Uesaka; Moss; Nanri [1991] caracterizam experimentalmente a higroexpansibilidade, por meio da determinação da razão entre a deformação dimensional do papel e a correspondente variação de umidade, na região linear e reversível da curva de higroexpansão, em função do teor de umidade da folha.²⁴

Lif; Fellers; Soremark; Sjodahl [1995] apresentou um método de caracterização da higroexpansibilidade do papel, obtida diretamente de fotografias eletrônicas, a partir de disparos de laser. Böstrom [2001] utilizou metodologia similar para medir a higroexpansão dinâmica de amostras de papel. Pela facilidade de uso, comparado a outros procedimentos, é uma técnica que merece aprimoramento.

²⁴ Ver seção 2.2.1.3.

Nanko; Ohsawa [1990]; Nanko; Asano; Ohsawa [1991]; Nanko; Tada [1995] e Nanko; Wu [1995] utilizam microscópio de varredura a laser para verificar o mecanismo de higroexpansibilidade em amostras de papel.

Embora indiretamente ligada à medição de higroexpansibilidade, têm-se medições da anisotropia de orientação das fibras, na superfície do papel por difração de laser, em Fiadeiro *et al.* [2002].

Um novo método para medição da deformação dinâmica da higroexpansão do papel em impressora off-set foi introduzido por Pauku; Parola [2004], que consiste em monitoramento da folha de papel por meio de câmeras de varredura contínua, a fim de medir a posição e a largura da folha, antes e depois das unidades de impressão.

2.2.4 Relações com outras propriedades do papel

Segundo Lindblad; Fürst [2001], a direção da higroexpansibilidade no papel depende mais do índice de rigidez à tração, *TSI* (*Tensile Stiffness Index*) e do ângulo *TSO* (*Tensile Stiffness Orientation*), que da orientação das fibras na folha. Estes autores mencionam estudo realizado no STFI²⁵ onde se determinou que o valor máximo de higroexpansibilidade ocorre na direção perpendicular à direção indicada pelo ângulo *TSO*. Quando o valor do ângulo *TSO* for muito próximo a 0° (zero grau), o valor máximo de higroexpansibilidade ocorrerá na mesma direção do *TSI_{CD}*. Para referência, a Figura 2.11 mostra o diagrama polar usado para análise de *TSI* / *TSO* e seus componentes.

Estes pesquisadores apresentaram também uma fórmula, indicada a seguir, usada para determinar o coeficiente de higroexpansão a partir do índice *TSI_{CD}* (para papéis de imprimir e escrever):

$$\varepsilon_h = \left(\frac{3.3}{TSI_{CD}} \right) - 0,04 \quad (2.12)$$

²⁵ Swedish Forest Research Institute, Suécia

onde:

ε_h higroexpansão, %

TSI_{CD} índice de rigidez à tração na direção CD, kN.m.g^{-1}

TSO_{Ang} ângulo entre o TSI_{Max} e a direção MD da máquina, denominado ângulo de orientação de TSI ou ângulo polar

TSI_{MD} TSI na direção MD da máquina.

TSI_{CD} TSI na direção CD da máquina.

$TSI_{MD/CD}$ Razão entre TSI_{MD} e TSI_{CD} – indicador da anisotropia do papel.

TSI_{Max} Maior valor de TSI medido.

TSI_{Min} Menor valor de TSI medido.

TSI_{Area} Área da elipse

Figura 2.11. Diagrama polar de TSI / TSO .

A Figura 2.12 mostra a representação gráfica da correlação entre o TSI_{CD} e a higroexpansão, de acordo com a equação 2.12.

Figura 2.12. Representação gráfica da correlação entre o TSI_{CD} e o coeficiente de higroexpansibilidade [Lindblad; Fürst, 2001].

2.3 Fatores que influenciam a higroexpansibilidade do papel

A higroexpansibilidade do papel é dependente de diversos fatores, [Caufield, 1987], os quais estão relacionados à composição da pasta celulósica utilizada (tipo das fibras, cargas minerais, aditivos), ao processo de preparação da massa (refinação) e à fabricação na máquina de papel (operações na parte úmida, parte seca e operações de acabamento).

2.3.1 Composição da massa

A composição e distribuição de componentes químicos na pasta determinam o teor de umidade de equilíbrio do papel a uma dada condição de umidade relativa do ar ambiente e o grau de dilatação das fibras em função da absorção de água. A espessura da parede das fibras, bem como o tamanho do lúmen, também exercem influência sobre o mecanismo de higroexpansão. Scott; Abbott; Trosset [1995] mencionam que as pastas mecânicas, normalmente, produzem papéis com mais corpo (*bulk*), que contém maior quantidade de lacunas, nas quais as fibras contam com maior liberdade para expandir-se durante a absorção de água. Este fato determina certa melhoria na estabilidade dimensional do papel (devido a menor higroexpansibilidade). Segundo estes mesmos autores, efeito similar de melhoria na estabilidade dimensional pode ser observado quando se inserem fibras insensíveis à umidade na composição da pasta (fibras de vidro, por exemplo).

As cargas minerais adicionadas à pasta de papel são pouco higroscópicas e, em geral, colaboram para a diminuição da higroexpansibilidade. A colagem interna do papel retarda a absorção de água e diminui a velocidade de dilatação das fibras. Os agentes químicos de ligação (*cross-linking*) e agentes para aumento da resistência úmida aumentam a estabilidade do papel, devido à ação de restrição à dilatação das fibras [Scott; Abbott; Trosset, 1995].

Nanri; Uesaka [1993], em estudo realizado sobre estabilidade dimensional do papel, apresentaram uma comparação de coeficientes de higroexpansibilidade para diversos

tipos²⁶ de pastas mecânicas e químicas (SWG, TMP, CTMP, CMP, LYS e BKP). Os resultados mostraram que, entre as amostras secadas com restrição ao encolhimento, os coeficientes de higroexpansibilidade encontrados para as folhas produzidas com pastas mecânicas e químicas²⁷ foram similares, embora a de CMP tenha apresentado o maior valor entre as pastas testadas (Tabela II.1). Para as folhas secadas livremente, a higroexpansibilidade foi maior para as folhas de CMP e LYS (com refinação), seguidas pela BKP (com refinação).

Anteriormente, estudos realizados por Eklund [1969] haviam mostrado que o papel produzido com celulose seca (que foi submetida à secagem na sua produção, *baled pulp*) apresenta menor coeficiente de higroexpansibilidade que aquele produzido com celulose que nunca foi secada (*slush pulp*). Seus experimentos indicaram, também, a variação da higroexpansão do papel em função de diversos tipos de polpa. Os menores índices de higroexpansão foram obtidos com folhas formadas com polpas químicas semi-branqueadas branqueadas e produzidas pelo processo sulfito.²⁸

As pastas de celulose de fibra longa produzem menor higroexpansibilidade do papel que as polpas de fibra curta, embora o efeito não seja muito grande. Um experimento realizado por Uesaka [1994] mostrou que a higroexpansibilidade do papel diminuiu 20 % quando o comprimento médio das fibras aumentou de 0,68 mm para 2,58 mm.

2.3.2 Refinação da polpa de celulose

A operação de refinação da pasta de celulose tende a aumentar a flexibilidade das fibras e o conteúdo de finos. Estes fatores, que aumentam a taxa de transferência de tensão entre as fibras e a folhas de papel²⁹, colaboram para o aumento da higroexpansão do papel, em função do grau de refinação.

Eklund [1969] apresentou os resultados indicados na Figura 2.13, ilustrando o aumento de higroexpansão do papel em função do aumento de refinação e,

²⁶ Ver nomenclatura na Tabela II.1

²⁷ Folhas manuais isotrópicas.

²⁸ Folhas manuais formadas com polpas químicas de pinho e bétula e com densidade de 0,70 g.cm⁻³.

²⁹ Discutido na seção 2.2.1.4

adicionalmente, a forte influência do tipo de cozimento das fibras, com predominância do processo sulfito sobre o processo de cozimento do tipo sulfato.

Tabela II.1 – Comparação do coeficiente de higroexpansibilidade de folhas manuais formadas com polpas mecânicas e químicas [Nanri; Uesaka, 1993].

Tipo de polpa celulósica		secagem com restrição	secagem livre
Polpas mecânicas			
SWG	– pasta mecânica	0,068	0,086
TMP	– pasta termomecânica	0,057	0,074
CTMP	– pasta quimtermomecânica	0,063	0,087
CMP	– pasta quimimecânica	0,081	0,125
Polpas químicas			
LYS	– pasta de baixo rendimento	0,048	0,075
LYS	– refinada	0,063	0,123
BKP	– pasta kraft branqueada (refinada)	0,053	0,092

Um outro efeito da refinação, indicado por Scott; Abbott; Trosset [1995], assume que a refinação pode remover parede primária restritiva, expondo a parede secundária das fibras, que se dilata mais intensamente com a absorção de água. Desta forma, a estabilidade dimensional diminui com o aumento da refinação.

2.3.3 Orientação das fibras

A operação de formação na máquina de papel afeta a distribuição e a orientação das fibras no plano da folha. Estes fatores determinam como a higroexpansão das fibras individuais serão transferidas para malha de fibras entrelaçadas que formam a folha de papel. Neste sentido, Fiadeiro *et al.* [2002] mencionam que a estabilidade dimensional depende principalmente da anisotropia das fibras e da sua orientação na folha de papel.

Figura 2.13. Higroexpansão vs. grau de refinação para folhas manuais isotrópicas formadas com diferentes pastas químicas branqueadas. Higroexpansão medida com variação de umidade relativa do ambiente de 33% a 76%, $T = 23\text{ °C}$ [Eklund, 1969].

Os dados contidos na Figura 2.14 (e Figura 2.9), obtidos por Uesaka [1994], demonstram a influência da orientação de fibras na anisotropia da higroexpansibilidade do papel. Para folhas secadas sem restrição ao encolhimento (Figura 2.14), a higroexpansibilidade na direção MD diminui com o aumento da razão MD/CD do módulo de elasticidade (ou seja, o aumento de orientação de fibras), enquanto que na direção CD apresentou aumento. Os testes realizados nas folhas secadas com restrição ao encolhimento (Figura 2.9) mostraram uma tendência geral similar à encontrada para as folhas secadas livremente, porém, destaca-se o fato de que, nas folhas com menor densidade (maior corpo³⁰), a orientação das fibras não afetou a higroexpansibilidade na direção MD de forma significativa.

Odel; Pakarinen [2001] analisaram os efeitos da orientação de fibras sobre diversas propriedades do papel e observaram que a estabilidade dimensional se torna melhor com baixos níveis de orientação de fibras, embora dependa também do histórico de secagem e das propriedades das fibras.

³⁰ Maior “bulk”

Loewen [1997] apresentou descrição de vários problemas de qualidade do papel relacionados à orientação das fibras. Dentre eles, menciona a influência direta da orientação de fibras sobre a higroexpansibilidade do papel na direção CD, apontada como causa principal de defeitos em operações de impressão e conversão do papel.

Figura 2.14. Efeito da orientação de fibras no coeficiente de higroexpansibilidade do papel nas direções MD e CD para folhas manuais anisotrópicas formadas com pasta química sem branqueamento, secadas livremente [Uesaka, 1994].

2.3.4 Prensagem úmida

Na prensagem úmida, a folha de papel e, por conseguinte, as fibras que a constituem são tratadas por forças mecânicas, com a finalidade de produzir remoção de água. Esta operação provoca aumento no teor de sólidos e densificação do papel. Segundo Weise [1997], a prensagem úmida causa “*hornification*”³¹, determinando alterações químicas e estruturais irreversíveis.

Na operação de prensagem úmida, a quantidade de água da folha de papel diminui sem o correspondente encolhimento da rede de fibras. Portanto, as operações de prensagem com alta intensidade, para obtenção de teores de sólidos maiores para o

papel, previnem um encolhimento significativo, que ocorreria se o papel estivesse livre para se contrair durante a remoção da água [Salmén *et al.*³², 1987, apud Kajanto; Niskanen, 1998]. De acordo com a Figura 2.15, a prensagem úmida pode reduzir o potencial de encolhimento livre do papel. A higroexpansão não diminui correspondentemente, pois a prensagem úmida aumenta a intensidade das ligações entre as fibras e melhora a taxa de transferência de tensão. Nas folhas de papel secadas livremente, ocorre o aumento da higroexpansão. Para as folhas secadas com restrição ao encolhimento, o efeito da prensagem é praticamente inexistente.

Figura 2.15. Higroexpansão (medida para a variação de umidade relativa do ar de 30% a 60%, com $T = 23^{\circ}\text{C}$) vs. encolhimento controlado durante a secagem, para folhas isotrópicas produzidas com pasta química (kraft) de fibras longas, com refinação ou sem refinação (símbolos cheios e vazados, respectivamente). As folhas foram prensadas de forma a obter-se dois níveis de densidade [Salmén *et al.*³⁴, 1987, apud Kajanto; Niskanen, 1998].

³¹ Ver seção 2.2.1.2.

³² Salmén *et al.* *The Implications of Fibre and Sheet Structure on the Hygroexpansivity of Paper*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.2, n.4, p.127, 1987.

O efeito da densidade sobre a higroexpansão de folhas secadas livremente ou secadas com restrição ao encolhimento está claramente mostrado na Figura 2.16. O aumento da intensidade das ligações entre as fibras (indicada pelo aumento da densidade) produz aumento na higroexpansão em folhas secadas livremente. No caso das folhas secadas com restrição ao encolhimento, a prensagem úmida não produz resultados similares; observa-se baixo nível de transferência de tensão entre as fibras e a folha de papel³³.

Figura 2.16. Higroexpansão (medida para a variação de umidade relativa do ar de 30% a 60%, com $T = 23^{\circ}\text{C}$) vs. densidade do papel, para folhas isotrópicas produzidas com pasta química (kraft) de fibras longas, com refinação ou sem refinação e com diferentes conteúdos de finos, para folhas secadas livremente (linhas contínuas) e secadas com restrição ao encolhimento (linhas tracejadas). A densidade foi variada por meio da carga de prensagem [Salmén *et al.*³², 1987, apud Kajanto; Niskanen, 1998].

Os dados mostrados na Figura 2.9 e na Figura 2.14, obtidos por Uesaka [1994], indicam o efeito da densidade do papel sobre a higroexpansibilidade de folhas

³³ Ver seção 2.2.1.4.

anisotrópicas. Observa-se que a influência é mais intensa na direção CD do papel e crescente com o aumento da orientação das fibras, ou seja, indica que a higroexpansibilidade na direção CD é bastante sensível às variações do grau de interligação das fibras.

2.3.5 Restrição ao encolhimento durante o processo de secagem

Vários trabalhos mostram que a higroexpansibilidade do papel é influenciada, de forma significativa, pela intensidade de restrição imposta ao encolhimento da folha durante o processo de secagem. Se o encolhimento, nesta etapa, for minimizado ou totalmente evitado, a estabilidade dimensional do papel será melhorada [Juppi; Kaihovirta, 2002, Juppi; Kaihovirta, 2003, Fellers *et al.*, 2003].

Gates; Kenworthy [1965] e Setterholm; Chilson [1965] constataram que o grau de restrição ao encolhimento imposto ao papel durante o processo de secagem causa impacto significativo sobre várias propriedades. Observam, por exemplo, que o aumento na restrição ao encolhimento resulta em acréscimo no valor do módulo de elasticidade, decréscimo no alongamento e aumento na resistência à tração.

Gates; Kenworthy [1965] concluíram que o encolhimento durante a secagem afeta as propriedades de alongamento, resistência à tração e energia de ruptura do papel. A Figura 2.17 mostra resultados encontrados que correlacionam, de forma praticamente linear, o alongamento e o encolhimento do papel. O gráfico indica que um aumento no encolhimento (que significa uma redução na restrição durante a secagem) produz um correspondente aumento no alongamento. Em função destes resultados, Pulkowski [1991] utilizou as medições de alongamento de folhas produzidas em máquinas de papel industriais, como indicadores para medição indireta de encolhimento.³⁴

Setterholm; Chilson [1965] verificaram que o encolhimento controlado, por meio da restrição ao movimento da folha durante a secagem, desenvolveu as propriedades

³⁴ Segundo Viitaharju; Niskanen [1993], em geral, a variação transversal (CD) de propriedades não pode ser usada como medida indireta do encolhimento para o papel jornal.

elásticas do papel. Da mesma forma que Gates; Kenworthy [1965], observaram que o aumento na restrição ao encolhimento proporcionou um incremento no módulo de elasticidade, diminuição no alongamento e aumento na resistência à tração para uma dada densidade da folha de papel.

Figura 2.17. Correlação entre alongamento e encolhimento - pasta química sulfito de fibra longa, branqueada, , refinada a 50 °SR³⁵ [Gates; Kenworthy, 1965].

Nordman [1958] publicou resultados de pesquisas, cuja finalidade foi analisar os efeitos de vários fatores sobre a higroexpansibilidade do papel. Em seus estudos, encontrou uma correlação essencialmente linear entre o encolhimento de folha no processo de secagem e a higroexpansibilidade do papel (Figura 2.18), ou seja, quanto maior a restrição ao encolhimento, menor será a higroexpansibilidade do papel.

³⁵ Grau Schopper-Riegler.

Experimentos realizados por Eklund [1969] demonstraram melhoria na estabilidade dimensional do papel (redução da higroexpansão) em função da tensão aplicada à folha durante a secagem. Os resultados indicaram que o aumento da tensão produzia diminuição na higroexpansibilidade. Resultados semelhantes foram encontrados em experimentos de secagem com aplicação crescente de alongamento ao papel. Observações similares foram descritas por George³⁶ [1958, apud Pulkowski, 1990].

Figura 2.18. Relação entre higroexpansão e encolhimento para folhas secadas sob restrição ao encolhimento e para folhas produzidas a partir de 10 tipos de pastas celulósicas, refinadas e secadas livremente [Nordman, 1958].

Salmén *et al.*³² [1987, apud Chance, 1991] realizaram estudos para investigar o efeito da curvatura (*curl*) das fibras, do conteúdo de finos na massa e da intensidade de prensagem sobre a higroexpansibilidade do papel secado com ou sem restrição ao

³⁶ George, H.O. *Methods of affecting the Dimensional Stability of Paper*, TAPPI, vol.41, n.1, 1958, p. 31-33.

encolhimento. Seus experimentos mostraram que o processo de secagem com restrição ao encolhimento resulta em menor higroexpansibilidade do papel e, adicionalmente, mostraram que o grau de refinação, o conteúdo de finos e a intensidade de prensagem têm pouco efeito sobre a higroexpansibilidade, quando a secagem é feita com restrição ao encolhimento (ver Figura 2.16).

Nanri; Uesaka [1993] estudaram a estabilidade dimensional de pastas mecânicas e a relação entre encolhimento durante a secagem e higroexpansibilidade do papel. Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de restrição ao encolhimento da folha na máquina de papel, com o objetivo de reduzir a higroexpansibilidade, pode ser menos efetiva para papéis fabricados a partir de polpas mecânicas, devido ao menor encolhimento durante a secagem, se comparado a papéis fabricados com pastas químicas.

O estudo realizado por Parsons³⁷ [1972, apud Pulkowski, 1990] revelou a existência de uma interação na direção CD durante o processo de secagem. Observou que maiores intensidades de restrição na direção MD produziam maiores encolhimentos na direção CD. Mais recentemente, Lindem [1994] determinou que uma deformação na folha úmida de 1% na direção longitudinal, causava uma contração de 1% na direção transversal, em experimento com papel contendo 65% de sólidos.

2.3.6 Configuração da seção de secagem da máquina de papel

Durante a operação de secagem em máquinas convencionais³⁸, o papel permanece bastante tensionado na direção de fabricação (MD). Porém, na direção transversal da máquina (CD), a folha se encontra relativamente livre, apesar de ser pressionada pelas telas secadoras contra a superfície dos cilindros secadores, pois no percurso entre a saída de um secador e a entrada no secador subsequente (passe entre secadores), quase não há restrição à contração do papel na direção CD, principalmente nas bordas da folha.

³⁷ Parsons, S.R. *Effect of Drying Restraint Before and During Drying on Edgewise Compressive Properties of handsheets*. TAPPI, vol.55, n.3, 1972, p.1516-1521.

³⁸ Máquinas que possuem seções de secagem constituídas por cilindros secadores, aquecidos a vapor, dispostos em duas fileiras.

De fato, como ressaltaram Hoole; l'Anson; Hoyland [2000], a folha de papel sofre mais restrição ao encolhimento na região central da máquina que nas extremidades e, portanto, há correspondentes diferenças de encolhimento entre estas áreas, o que resulta em um perfil transversal bastante irregular. Experimentos desenvolvidos por Hoole *et al.* [1999] a fim de estudar o encolhimento do papel ao longo da máquina, comprovaram que o perfil irregular de encolhimento da folha de papel tem origem na seção de secagem.

Pulkowski [1990; 1991] menciona que seções de secagem com fileira dupla de secadores produzem maior irregularidade no perfil transversal de encolhimento e, conseqüentemente, maior variação de propriedades na direção transversal do papel. A Figura 2.19 mostra parte de uma seção de secagem convencional com duas fileiras de secadores (*double-tier*) e um perfil típico de encolhimento transversal da folha.

Figura 2.19. (a) Seção de secagem com secadores dispostos em duas fileiras e (b) perfil típico de encolhimento transversal do papel [Wedel, 1989a].

Wedel [1989a; 1989b], Palazzolo [1990], Pulkowski [1990; 1991], Sims; Grunder [1991] e Chance [1991] apresentaram estudos comparativos entre seções formadas por secadores dispostos em duas fileiras e seções formadas por fileira única (*single-tier*), quanto ao encolhimento transversal e seus efeitos nas propriedades do papel (a Figura 2.20 mostra parte de uma seção de secagem com fileira única de secadores). Estes estudos revelaram que as seções de secagem compostas por cilindros secadores

dispostos em fileira única, provêm maior restrição à contração transversal da folha e, portanto, produzem menor encolhimento total da folha, nesta direção, e perfis mais uniformes de encolhimento e de propriedades do papel.

Figura 2.20. Seção de secagem com cilindros secadores dispostos em fileira única [Wedel, 1899a].

Wedel [1989a] mostrou que a operação de secagem em máquinas configuradas com fileira única de secadores (maior restrição ao encolhimento da folha) produz redução significativa no coeficiente de higroexpansibilidade, ou seja, que o papel apresenta maior estabilidade dimensional e, portanto, menor potencial para o desenvolvimento de defeitos, tais como superfície ondulada (*cockle*) e encanoamento (*curl*).

De acordo com Wedel [1989a; 1989b], para prevenir ou reduzir o encolhimento transversal do papel, é necessário que a retenção seja aplicada à folha nas regiões da seção de secagem onde o papel tem a maior tendência ao encolhimento. Sims; Grunder [1991] indicaram que estas regiões têm início quando o teor seco do papel se situa em torno de 60% (ver Figura 2.21).

Um estudo teórico foi desenvolvido por Asensio; Seyed-Yagoobi [1992], a fim de comparar a configuração convencional de secadores dispostos em duas fileiras com o arranjo em fileira única, introduzido comercialmente para controlar o encolhimento transversal da folha. O propósito do estudo foi avaliar a transferência de calor e de massa nas duas configurações e a conclusão mostrou que a capacidade de secagem

das duas configurações é similar para uma dada condição de operação e que ambas requerem, aproximadamente, o mesmo comprimento de secagem para obtenção de um determinado teor seco para o papel.

Figura 2.21. Encolhimento da folha nas direções MD e CD de amostras de papel secadas livremente [Wedel, 1989a].

2.3.7 Colagem

Segundo Scott; Abbott; Trosset [1995], a colagem interna retarda a absorção de água e, conseqüentemente, diminui a velocidade de dilatação das fibras. Este efeito reduz a higroexpansibilidade dinâmica do papel.

Por outro lado, a colagem interna do papel, tal como feita com amido catiônico, pode melhorar a força de ligação e a transferência de tensões entre as fibras e, assim, causar aumento na higroexpansibilidade. Quando se utilizam agentes hidrofóbicos, que inibem a absorção de água para dentro das fibras, ocorre diminuição na taxa dinâmica de higroexpansibilidade [Kajanto; Niskanen, 1998].

Lipponen *et al.* [2005] examinaram os efeitos da aplicação superficial de cola de amido sobre as propriedades mecânicas de folhas de papel, do tipo *woodfree*³⁹, sem prévia colagem e calandragem. Especificamente, o foco do estudo foi investigar os

efeitos sobre o módulo de elasticidade, alongamento e rigidez do papel em função da quantidade de amido aplicada. Os resultados sugeriram que a operação de colagem superficial com amido aumentou o módulo de elasticidade do papel na direção CD, mas este efeito não foi observado na direção MD. O incremento do módulo de elasticidade – e conseqüente rigidez da folha – pode promover o potencial de encolhimento do papel na direção CD, fato que leva – quando a folha é retida para evitar o encolhimento – a aumentar a tensão induzida pela secagem que, por sua vez, conduz a um aumento no módulo de elasticidade e subseqüente aumento na rigidez do papel. Entretanto, quando o encolhimento durante a secagem é permitido, a rigidez aumenta, apesar da diminuição do módulo de elasticidade, o que se deve ao aumento da espessura da folha (causada pelo encolhimento do papel), fator que compensa a diminuição do módulo de elasticidade.

2.3.8 Calandragem

A operação de calandragem é usada, principalmente, para melhorar as características superficiais da folha, tais como brilho e lisura e em certos casos, para obtenção de uniformidade de espessura e de densidade do papel, a fim de atender a diferentes demandas dos processos de impressão. Em geral, torna-se difícil alcançar um tratamento uniforme no processo de calandragem, considerando a irregularidade na distribuição de massa do papel [Endres; Engström, 2005]. Segundo Kajanto; Niskanen [1998], em geral, o aumento de densidade causado pela calandragem do papel, não produz alterações na higroexpansibilidade, embora existam algumas exceções. O uso de calandras duras (*hard calendering*)⁴⁰ com altas cargas de calandragem, pode danificar o papel e provavelmente provocar redução na higroexpansibilidade. A supercalandragem⁴¹ com alta umidade do papel cria novas ligações entre as fibras que, conseqüentemente, gera aumento na higroexpansão. Caulfield [1987] menciona que, no processo de calandragem, o aumento de

³⁹ O papel é denominado *woodfree* quando sua composição apresenta uma quantidade de pasta mecânica limitada ao valor máximo de 10%.

⁴⁰ Nas calandras duras, o papel é prensado entre rolos metálicos sem revestimento.

⁴¹ As supercalandras são formadas por pilhas de rolos de pressão, que alternam rolos metálicos com e sem revestimento, por onde o papel é prensado diversas vezes a fim de aumentar seu brilho e lisura.

densidade do papel ocorre sem necessariamente alterar as interligações das fibras celulósicas, preservando, desta maneira, sua estabilidade dimensional.

2.4 Estabilidade dimensional do papel

Uma revisão clássica e antiga de estabilidade dimensional do papel, entendida como a suscetibilidade do papel em mudar as suas dimensões devido à mudança da sua umidade, foi apresentada por Gallay [1973] em duas partes. Os trabalhos relevantes, anteriores a esta data, já foram citados no capítulo de Introdução do presente trabalho. Mais recentemente, Uesaka [1991] revisita os trabalhos publicados e discussões relativas à estabilidade dimensional. Nanri e Uesaka [1993] revisitam os estudos de estabilidade dimensional e de higroexpansibilidade, agora aplicados a papéis de polpas de alto rendimento, SGW, TMP, CTMP, CMP, comparados às pastas químicas refinadas.

2.4.1 Encolhimento do papel durante a secagem

As dimensões do papel mudam quando o seu teor de umidade é modificado. Este comportamento, que tem origem na higroexpansibilidade das fibras que formam o papel, se transmite para a rede de fibras, a qual se expande quando absorve umidade ou se contrai quando perde água⁴².

2.4.1.1 Mecanismo de encolhimento do papel

Um possível mecanismo de encolhimento do papel foi inicialmente proposto por Page; Tydeman⁴³ [1962, apud Nanko; Wu, 1995], com base em descobertas, de ordem qualitativa, de que o encolhimento transversal das fibras causava contrações longitudinais naquelas que as cruzavam, desenvolvendo micro-compressões nos pontos de ligação. Afirmaram ser este fenômeno, a principal causa do encolhimento do papel.

⁴² Ver seção 2.2.1.2.

⁴³ Page, D.H.; Tydeman, P.A. In: *Formation and Structure of Paper*. ed. F. Bolam, vol.2, Tech. Sect. B.P. & B.M.A., London, 1962, p. 397.

O encolhimento transversal de fibras do papel, durante o processo de secagem, foi medido por Nanko; Asano; Ohsawa [1991] com a utilização de um microscópio de varredura a laser. Descobriram que a maior parte do encolhimento das fibras ocorria quando as fibras alcançam um teor de sólidos específico, na fase final de secagem, que dependia do tipo de polpa utilizada. Entretanto, se situava em uma faixa estreita, entre 85% e 88%, a despeito das grandes diferenças morfológicas das fibras e de composição química entre as polpas testadas. Após atingir o ponto de colapso das fibras, apenas as moléculas de água que apresentavam forte interação com a celulose permaneciam na fibra e, aparentemente, a evaporação desta água ligada produzia um encolhimento considerável na fibra, responsável pela produção de altas tensões de secagem, as quais produziam encolhimento da folha de papel.

Nanko; Wu [1995] também estudaram os mecanismos de encolhimento do papel por meio de microscopia de varredura a laser. Os resultados das medições confirmaram o mecanismo proposto inicialmente por Page; Tydeman⁴³ [1963, apud Nanko; Wu, 1995], ou seja, que o encolhimento transversal das fibras força aquelas que as cruzam a se estreitarem axialmente nos pontos de interligação. Adicionalmente, verificaram que segmentos livres da rede de fibras podem ser tanto comprimidos como tracionados, passivamente, para manter o equilíbrio com as fibras adjacentes que se contraíram. Os resultados mostraram ainda que: (a) durante a secagem das folhas sem restrição ao encolhimento, a contração dos segmentos interligados causa o encolhimento da folha inteira; (b) durante a secagem sob restrição ao encolhimento, a contração dos segmentos interligados causa esticamento dos segmentos livres que se encontram situados entre os segmentos interligados.

Este encolhimento, se for diferente em cada ponto da folha, provocará variação na estabilidade dimensional do papel, já na seção de secagem da máquina de papel, *cf.* ilustrado em Juppi e Kaihoviirta [2003].

O encolhimento de papel tem efeito peculiar em uma máquina de papel: o encolhimento CD é inversamente proporcional à resistência à tração nesta mesma direção, o que pode ser visualizado ao longo do presente trabalho. Isto pode permitir, segundo Paukku e Parola [2004], a tomar a resistência à tração em CD como uma

estimativa de encolhimento. Por outro lado, Viitaharju; Niskanen [1993], comparando o encolhimento lateral com perfil CD de propriedades, mostram em geral, que estas propriedades não podem ser utilizadas como medida indireta de encolhimento do papel.

2.4.1.2 Tensões induzidas no papel durante o processo de secagem

As tensões residuais são definidas como as que permanecem em um dado corpo material, após a remoção das forças externas que atuam sobre ele. No caso do papel, tensões residuais serão encontradas após a operação de secagem. A magnitude e distribuição destas tensões dependem de certos fatores, tais como o método de secagem, a velocidade da máquina, as condições de tensionamento durante a secagem e o potencial de encolhimento da polpa utilizada [Östlund *et al.*, 2003].

O nível das tensões desenvolvidas durante o processo de secagem tem influência sobre as propriedades elásticas do papel, de forma significativa. A folha secada sob restrição ao encolhimento terá maior módulo de elasticidade, maior resistência à tração e melhor estabilidade dimensional que a folha secada livremente. As diferenças nas propriedades do papel se devem às diferentes tensões induzidas no papel durante a secagem, diferentes níveis de concentração de tensões e alterações na orientação de fibras [Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

Uma vez que o papel se contrai durante a operação de secagem, se o encolhimento for restringido pela aplicação de uma tensão externa, o resultado será uma indução de tensão na folha, na direção da restrição aplicada. Medições feitas por Ivarsson (1954) durante a secagem de folhas de papel isotrópicas (formadas manualmente em laboratório), com aplicação crescente de restrição ao encolhimento, mostraram acentuada diminuição no alongamento do papel. O mesmo resultado foi encontrado por outros pesquisadores, dentre os quais podem ser citados Gates; Kenworthy [1965] e Setterholm; Chilson [1965]. Em época mais recente, Pulkowski [1991] utilizou as medições de alongamento de folhas produzidas em máquinas de papel industriais, como medição indireta de encolhimento, ou seja, relacionou a falta de

restrição à contração da folha durante a secagem com o aumento de alongamento do papel.

A tensão de secagem resulta de forças e tensões internas desenvolvidas na folha de papel durante o processo de secagem. Este efeito é observado, por exemplo, na força necessária para restringir o encolhimento do papel na operação de secagem. A tensão de secagem se correlaciona com a estabilidade dimensional, com a formação e índice das ligações entre as fibras. A Figura 2.22 mostra a força gerada durante a secagem, em função do teor de sólidos do papel. O grau de refinação, o nível de prensagem úmida, o tempo de secagem, a temperatura e o passe entre as seções de secagem (*draw*) também influenciam a tensão de secagem. A Figura 2.23 mostra os valores da tensão específica de secagem, em função do tempo de secagem e da temperatura. Observa-se que menores temperaturas ou maiores tempos de secagem produzem menores níveis de tensões [Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

Figura 2.22. Força de secagem vs. teor seco do papel, na condição de encolhimento nulo [Silvy⁴⁴, 1971 apud Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

⁴⁴ Silvy, J., Paper Technology, vol.12, n.6, p.44, 1971.

A tensão interna é originada por processos de deformação plástica, expansão térmica irregular e formação. Se o papel for secado com restrição total ao encolhimento (o que não corresponde à situação na máquina de papel), a tensão de secagem e a tensão interna serão idênticas [Htun⁴⁵, 1980, apud Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

Figura 2.23. Tensão de secagem vs. tempo de secagem para folhas manuais secadas a diferentes temperaturas [Htun⁴⁵, 1980, apud Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

Lätti; Heikkinen; Kettunen [2001] também observaram que a tensão de secagem, nos processos com restrição ao encolhimento, aumenta lentamente na região de teor de sólidos abaixo de 60% a 70%, pois a remoção de água é feita somente dos grandes poros situados no interior das fibras. Um grande aumento na tensão de secagem ocorre, tipicamente, na faixa de teor de sólidos de 75% a 85%, em função do encolhimento e colapso das fibras.

⁴⁵ Htun, M. *The influence of drying strategies on mechanical properties of paper*. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1980.

A tensão de secagem se satura após o ponto de colapso das fibras, quando a estrutura já se encontra imobilizada, no estágio final de secagem. São formadas pontes de hidrogênio entre grupos hidroxila adjacentes do material celulósico e as regiões que contém hemicelulose se alteram do estado de gel para um material sólido. Estes pesquisadores realizaram experimentos com a finalidade de verificar o mecanismo básico de indução de variações de tensão relacionados à umidade do papel. Os resultados mostraram que as variações de tensão no papel seco são geradas pela combinação de efeitos de variação do teor de umidade e de deformações do papel durante o processo de secagem, porém são causadas, marcadamente, por variações de deformações elásticas. Concluíram que durante a operação de secagem na máquina de papel, as maiores variações de tensão ocorrem na faixa de teor de sólidos entre 65% e 85% e, nesta área, devem ser evitados passes extensos entre os secadores.

2.4.1.3 Perfil de encolhimento do papel

Nas máquinas de papel convencionais, a folha de papel apresenta um perfil irregular de encolhimento na direção CD, o qual é desenvolvido durante a etapa de secagem do processo de produção. O encolhimento transversal na direção transversal da máquina é mais pronunciado nas extremidades laterais da folha que na parte central do papel. A Figura 2.24 ilustra um perfil de encolhimento transversal típico.

Segundo Kiiskenen; Paltakari; Pakarinen [2000], o encolhimento da malha de fibras cria micro-compressões ou enrugamento nas fibras individuais. As que se encontram orientadas na direção CD e, especialmente, as que se encontram mais próximas das bordas da folha, estão sujeitas às micro-compressões com maior intensidade e podem ser facilmente estendidas sob tensão, determinando o valor mínimo para o módulo de elasticidade e de resistência à tração, porém, com grande alongamento do papel. A maioria das máquinas modernas, de alta velocidade, de acordo com Constantino; l'Anson; Sampson [2005], tende a apresentar maiores diferenças de encolhimento entre as laterais e centro papel, embora o encolhimento total, na direção CD, seja baixo.

Figura 2.24. Perfil transversal de encolhimento medido em uma máquina de papel jornal, cuja seção de secagem é do tipo fileira única⁴⁶ [Kiisknen; Paltakari; Pakarinen, 2000].

O trabalho de Brecht; Wanka⁴⁷ [1967, apud Constantino; l’Anson; Sampson, 2005] obteve estimativas para o perfil de encolhimento na direção CD, por meio da medição da hidroexpansão em uma faixa de posições transversais da máquina piloto de papel fabricado com pasta mecânica ou pasta química. O princípio usado neste trabalho foi discutido de forma bastante abrangente por Gallay [1973], que propôs que o grau de expansão do papel quando exposto a vapor d’água ou à água líquida, apresenta boa correlação com o grau de encolhimento durante o processo de secagem.

Wadhams *et al.*⁴⁸ [1991, apud Constantino; l’Anson; Sampson, 2005] conduziram um trabalho para estimar o perfil de encolhimento na direção CD, por meio da medição de alterações dimensionais entre marcas da tela formadora sobre o papel, durante o processo de secagem. Este método foi aprimorado por Viitaharju; Niskanen [1993], que utilizaram a transformada de Fourier bi-dimensional para desenvolver as medições no domínio de frequência. De acordo com Constantino;

⁴⁶ Ver seção 2.3.6.

⁴⁷ Brecht, W.; Wanka, R. *Neue Beiträge zur Kenntniss der Dimensionsstabilität von Papieren*. Das Papier, vol. 21, n. 7, p. 354, 1967.

⁴⁸ Wadhams, K.R.; l’Anson S.J.; James, D.M.; Kropholler, H.W. *The Measurement of Differential CD Shrinkage*. Paper Technology, vol. 32, n.1, p. 36, 1991.

l'Anson; Sampson [2005], um trabalho desenvolvido por Praast⁴⁹ [1993], apresentou metodologia para considerar as inevitáveis deformações das telas formadoras das máquinas de papel, no método de estimativa de encolhimento transversal da folha, por meio de análise de imagens.

Hoole *et al.* [1999] apresentaram resultados de medições de perfis de encolhimento na direção CD de máquinas de papel comerciais, para uma série de condições experimentais e demonstraram que a irregularidade do perfil não era causada pela prensagem úmida, mas se desenvolvia na operação de secagem.

Walström *et al.* [1999], considerando estudos anteriores sobre higroexpansibilidade e encolhimento ou expansão da folha, apresentam um modelo matemático preliminar para a seção de secagem que leva em conta o encolhimento do papel ao longo dos secadores, para o qual identificaram e separaram as forças motrizes de ordem mecânica e higroscópica. Este modelo enfatizou pela primeira vez a importância dominante do encolhimento nos passes livres entre componentes da seção de secagem e a relação entre a sua largura e comprimento (W/L). A análise destes pesquisadores mostrou ser possível uma simulação qualitativa das tensões e deformações que se desenvolvem na folha de papel durante seu transporte através da seção de cilindros secadores. Os resultados da simulação mostraram que o modelo provê um entendimento qualitativo de como as variáveis estudadas influenciam o perfil de encolhimento. Se o comprimento do passe livre, na trajetória entre secadores, for reduzido, o encolhimento no centro da folha de papel diminuirá significativamente. Nas bordas da folha, embora em menor escala, também haverá diminuição de encolhimento. A região que apresenta menor encolhimento, na parte central da folha de papel, se tornará mais larga, o que significa que o gradiente de encolhimento nas laterais da folha se tornará mais abrupto, resultando em aumento na diferença de encolhimento entre as bordas e o meio da folha de papel.

O modelo de Walström *et al.* [1999] foi confirmado, mais recentemente, por Walström; Lif [2003], que destacaram a importância da forma do passe livre,

⁴⁹ Praast, H. *Differential Shrinkage of Paper in CD*. Proceedings of 2nd. European Research Symposium on Image Analysis for Pulp and Paper Production, Darmstadt, 1993.

demonstrando que a relação W/L determina o resultado do perfil de encolhimento transversal do papel.

Vários autores têm discutido métodos para medição do encolhimento em linha e em tempo real, dentre os quais, Guesalaga *et al.*⁵⁰ [1994] e Kaestner; Nilson⁵¹ [2003] foram citados por Constantino; l'Anson; Sampson, [2005]. Outro trabalho, publicado por l'Anson; Sampson [2004], mostrou um método para estimar o encolhimento da folha na direção CD, a partir da posição dos atuadores transversais (ou pelos níveis de diluição) da caixa de entrada da máquina de papel.

O estudo de Constantino; l'Anson; Sampson, [2005] apresentou um novo modelo para prever a forma do perfil de encolhimento. Aplicado a duas máquinas de papel comerciais, mostrou a influência de matérias primas utilizadas, da forma dos passes livres da configuração da seção de secagem, do encolhimento livre e das condições de operação da máquina de papel sobre o perfil transversal de encolhimento do papel.

2.4.1.4 Efeito do encolhimento sobre as propriedades do papel

O encolhimento transversal da folha de papel, discutido na seção anterior, determina modificações orientadas na estrutura da folha, as quais afetam diretamente outras propriedades funcionais do papel. O módulo de elasticidade, as propriedades de resistência e a estabilidade dimensional do papel são as características mais influenciadas pelo encolhimento irregular.⁵²

O efeito do encolhimento transversal na direção CD sobre a higroexpansão do papel encontra-se ilustrado na Figura 2.25. No perfil transversal, os valores da higroexpansão são maiores nas extremidades laterais do papel e decresce em direção à região central da folha. A forma deste perfil depende do tipo de papel e da

⁵⁰ Guesalaga, A.; Foessel, A.D.; Kropholler, H.W.; Rodriguez, F. *On-Line Measurement of Paper Shrinkage for Monitoring and Quality Control*. Pulp and Paper Canadá, vol. 95, n. 7, p. 282, 1994.

⁵¹ Kaestner, A.P. Nilsson, C.M. *Estimating the relative Shrinkage Profile of Newsprint*. Optical Engineering, vol. 43, n. 5, p. 1467, 2003.

⁵² Discutido na seção 5.2.2.

configuração da máquina. Na direção longitudinal da máquina (MD), o encolhimento do papel é praticamente nulo e, portanto, o perfil de higroexpansão resultante é bastante uniforme [Kajanto; Niskanen, 1998].

Figura 2.25. Variação da higroexpansão nas direções MD e CD, através da largura total da folha de papel, medida na faixa de umidade relativa do ar de 33% - 66% a $T = 22\text{ °C}$ [Kajanto; Niskanen⁵³, 1996 apud Kajanto; Niskanen, 1998].

2.4.2 Encanoamento (*curl*) do papel

O encanoamento das folhas de papel é comumente atribuído a diferentes graus de higroexpansibilidade entre o verso e anverso da folha de papel, resultando em relaxação residual de tensão frente ao re-umedecimento. Este desvio de estabilidade dimensional de papel ocorre tanto em papel cartão quanto em papel reprográfico. Existem três tipos de encanoamento: na direção x da máquina com seu componente $K_x = (\partial^2 w / \partial x^2)$, na direção transversal y da máquina com seu componente $K_y = (\partial^2 w / \partial y^2)$ e o encanoamento diagonal com componente $K_{xy} = 2(\partial^2 w / \partial xy)$. Os componentes K_x, K_y, K_{xy} são expressos em m^{-1} . A Figura 2.26 ilustra esquematicamente estes tipos de encanoamento. O desvio w na direção

perpendicular ao plano de encanoamento, que é encontrado por meio da curvatura de pequenas fitas de papel, representa o encanoamento intrínseco, definido pela equação a seguir:

$$w(x, y) = \frac{1}{2}K_x x^2 + \frac{1}{2}K_y y^2 + \frac{1}{2}K_{xy}xy \quad (2.13)$$

A direção do encanoamento é definida pelo ângulo θ em relação à direção da máquina:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{K_{xy}}{K_x - K_y} \right) \quad (2.14)$$

Figura 2.26. Definição de componentes de encanoamento do papel [Niskanen, 1998]

⁵³ Kajanto, I.; Niskanen, K. *Optical measurement of dimensional stability*. Progress in paper physics – a seminar, STFI, Stockholm, 1996, p.75.

O papel, durante o encanoamento, toma a forma de um cilindro, o qual apresenta um sentido axial de curvatura em relação à direção da máquina, dado pelo ângulo θ , e uma magnitude de curvatura, que é a inversa ao seu raio. O eixo e a magnitude da curvatura da folha dependem do encanoamento intrínseco e da elasticidade do papel.

A seguinte equação fornece a magnitude de encanoamento na direção MD e direção CD:

$$K_x, K_y = -\frac{(\varepsilon_{top} - \varepsilon_{bottom})}{d_k} \quad (2.15)$$

onde d_k é a distância característica entre o topo e a base da folha e ε_{top} , ε_{bottom} são as deformações na direção do plano (superfície), do topo e da base da folha. Note-se então que, se a higroexpansibilidade do topo (anverso) e da base (verso) da folha forem iguais, não ocorrerá encanoamento.

O componente de encanoamento diagonal é dado por

$$K_{xy} = \frac{(\phi_{top} - \phi_{bottom})}{d_k} (\varepsilon_{MD} - \varepsilon_{CD}) + (K_{MD} - K_{CD})(\phi_{top} + \phi_{bottom}) \quad (2.16)$$

onde $\varepsilon_{MD}, \varepsilon_{CD}$ são as deformações médias da folha na direção da máquina e na direção transversal, K_{MD}, K_{CD} são os componentes médios da folha nas direções MD e CD, e $\phi_{top}, \phi_{bottom}$ são os ângulos de orientação de fibras no topo e na base.

Obviamente, esta diferença de comportamento também pode ser causada por diferenças na estrutura das fibras celulósicas em si, o que pode ser visto em Viitaharju; Niskanen [1994].

Com relação a testes de propriedades do papel, as referências importantes são Mark *et al.* [2001] e Borch *et al.* [2001], e os capítulos ali escritos por Fellers referentes à influência de higroexpansibilidade no encanoamento de papel com faces diferentes.

Se a diferença da higroexpansibilidade nas duas faces influencia o encanoamento, esta curvatura deve estar diretamente relacionada às dimensões da folha do papel, cuja análise em termos de modelos matemáticos e de medições experimentais são apresentados em Nordstrom; Gudmundson; Carlsson [1998] e Lu; Carlsson [2001] que consideram a influência da deflexão inicial no encanoamento do papel. Cabe ainda ressaltar os trabalhos de Nordstrom; Gudmundson; Carlsson [1998] que descrevem um método de medição de encanoamento em papel de baixa gramatura.

2.4.3 Ondulações da superfície (*cockling*) do papel

As ondulações locais (*cockling*) representam um fenômeno em que o papel perde a planicidade pontualmente. Por analogia, pode ser descrito como um aglomerado de “caroços” com diâmetros na faixa de 5 - 50 mm, porém com pequena altura (inferior a 1 mm). É intuitivo que este fenômeno ocorra mais em papéis de menor gramatura, e com alto coeficiente de higroexpansibilidade. As fibras que apresentam heterogeneidade local e pouca rigidez influenciam na ocorrência das ondulações locais. Juppi; Kaihovirta [2003] ilustram fotos deste fenômeno.

Paik; Nam [2001] mostram que as condições de secagem e distribuição da gramatura influenciam o potencial de ocorrência de ondulações locais. O aumento da taxa, ou velocidade, de secagem também influencia fortemente o aumento da formação dos “caroços” (*cockles*). A sua localização na folha não se altera com re-umedecimento e secagem, nas mesmas temperaturas. A secagem em temperaturas menores resulta em menor formação de *cockles*, o que sugere que o mecanismo de desenvolvimento de *cockles* está ligado ao encanoamento, adicionado à alta heterogeneidade da superfície da folha. A variação de gramatura localmente também se reflete grandemente sobre a variação da formação de *cockles*, porém a gramatura por si só é apenas mais um dos fatores de influência. O lado da folha de papel a sofrer secagem em último lugar apresenta maior potencial para a formação de irregularidades na superfície.

Outro tipo de manifestação destas ondulações se refere às que ocorrem na formação das bobinas de papel, conhecidas por *roll cockle*. De acordo com Thorpe; Choi [1991], esta “ondulação” nas bobinas é causada pela variação de higroexpansibilidade na folha de papel ao longo da produção.

3 METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM E DE TESTES

Neste capítulo, descrevem-se as metodologias aplicadas para obtenção de amostras de papel em uma máquina industrial e para realização de testes, com a finalidade de determinar propriedades físicas, mecânicas e higroexpansivas do papel investigado, bem como das características da pasta celulósica utilizada na sua fabricação.

3.1 Amostras de papel

As amostras utilizadas neste trabalho foram tomadas em uma máquina de papel industrial⁵⁴, durante operação em regime estável⁵⁵. Para a amostragem, foram selecionados oito pontos da máquina na direção longitudinal e dez pontos na direção transversal da enroladeira.

Os pontos de coleta ao longo do eixo longitudinal, em diferentes seções da máquina, foram escolhidos a fim de avaliar as propriedades do papel nas diversas fases da fabricação, desde a caixa de entrada até a enroladeira.

Na caixa de entrada, foram retiradas amostras de massa de papel da tubulação de alimentação. Na seção de formação, porções de refilo⁵⁶, colhidas do lado de comando da máquina, foram usadas como amostras. Nas demais seções, as amostras foram retiradas da borda da folha, no lado de comando da máquina, com largura aproximada de 500 mm, de onde foram obtidos corpos de prova com dimensões apropriadas para os ensaios.

Na direção transversal da enroladeira, as amostras foram recolhidas em dez posições adjacentes e equidistantes, com a finalidade de construir perfis transversais de propriedades do papel.

⁵⁴ A descrição da máquina de papel encontra-se na seção 3.2.

⁵⁵ Os parâmetros operacionais, no momento da coleta das amostras, encontram-se no Apêndice.

⁵⁶ Recorte lateral feito na folha na saída da seção de formação, a fim de ajustar sua dimensão transversal na entrada da seção de prensagem, com largura aproximada de 100 mm.

Os pontos de origem das amostras, a fim de representar as diversas fases de fabricação do papel, foram definidos *cf.* indicado a seguir:

Ponto 1. Caixa de entrada

Ponto 2. Após formador

Ponto 3. Após 3^a prensa

Ponto 4. Após secador n° 11

Ponto 5. Antes da prensa de colagem

Ponto 6. Após prensa de colagem

Ponto 7. Antes da calandra

Ponto 8. Enroladeira

A Figura 3.1 mostra, esquematicamente, as posições de coleta e identificação das amostras.

As amostras de massa de papel, da caixa de entrada, foram tomadas no início do procedimento de amostragem, acondicionadas em potes plásticos fechados e posteriormente conservadas sob refrigeração. Na sequência, foram coletadas as amostras de refilo após o formador, as quais foram, também, acondicionadas em sacos plásticos lacrados e submetidas à refrigeração. A seguir, foram retiradas as amostras da enroladeira, provenientes de uma bobina jumbo⁵⁷ recém-formada. Finalmente, as amostras dos pontos 3 a 7 foram retiradas das diversas seções da máquina, quase simultaneamente, e acondicionadas em invólucros plásticos escuros e lacrados, a fim de conservar a umidade das amostras e isolar a ação da luz sobre elas.

⁵⁷ Denominação da bobina de papel formada na enroladeira da máquina, com grande diâmetro e largura integral da folha produzida.

Devido à dificuldade de acesso e à falta de segurança para retirar amostras de papel após a passagem pela quarta prensa, foram utilizadas amostras tomadas após a terceira unidade da seção de prensagem (ponto 3).

As amostras dos pontos 1 e 2 foram utilizadas para formação de folhas manuais de teste, em laboratório. Devido à alta velocidade operacional da máquina e ao alto teor de água no refilo da saída do formador (ponto 2), não foi possível colher amostras em forma de folhas íntegras, sendo, portanto, tratadas como pasta de papel, de forma equivalente às amostras retiradas do distribuidor de alimentação da caixa de entrada. As folhas manuais foram produzidas com gramatura próxima a do papel fabricado na máquina e secas ao ar, com restrição ao encolhimento produzida pela placa de suporte de secagem do aparelho de formação. Posteriormente, produziram-se folhas manuais adicionais, as quais foram secas sem restrição ao encolhimento, mediante separação da placa de suporte e suspensão ao ar.

As amostras dos pontos 3, 4 e 6 foram secas ao ar, sem restrição ao encolhimento, sobre superfície plana. As amostras dos pontos 5, 7 e 8 já secas em máquina, foram condicionadas, da mesma forma que as demais, no ambiente climatizado do laboratório, de forma a atingirem a mesma umidade de equilíbrio antes da execução dos ensaios.

Figura 3.1 Posição de coleta na máquina de papel e identificação das amostras.

3.2 Máquina de papel

A Figura 3.2 ilustra a máquina de papel da qual foram retiradas as amostras destinadas a este estudo, cuja produção principal consiste de papéis utilizados em máquinas copiadoras, *i.e.*, papéis reprográficos.

Denomina-se de “extremo úmido”, o setor constituído pela caixa de entrada, formador e prensas, em função da grande quantidade de água presente no papel, nesta região. A parte da máquina que inclui a seção de secagem, a prensa de colagem, a calandra e a enroladeira, recebe a denominação de “extremo seco”. As telas formadoras superior e inferior têm largura de 6050 mm e 6000 mm, respectivamente, sendo que o papel reprográfico de 75 g/m², que foi selecionado para este estudo, é produzido com velocidade operacional máxima de 1350 m/min e com largura de 5278 mm na enroladeira, correspondendo a uma produção bruta nominal de 770 t/d.

3.2.1 Caixa de Entrada

A caixa de entrada recebe a pasta de papel, proveniente da seção de preparação de massa e a distribui entre as telas formadoras, em forma de jato, com consistência aproximada de 1%. A caixa de entrada possui um sistema para controle do perfil transversal de gramatura da folha, que consiste em adicionar água de diluição, com baixa consistência, ao fluxo principal com consistência mais elevada, seletivamente, em pontos distribuídos ao longo da largura do jato de massa, a fim de influenciar na gramatura da folha em pontos localizados. Os módulos de aplicação de água de diluição estão uniformemente espaçados e permitem o controle do perfil de gramatura na largura total da folha de papel.

Figura 3.2. Máquina de papel e pontos de amostragem

3.2.2 Formador

O formador da máquina, do tipo “tela dupla”, contém componentes de desaguamento que geram pulsos de pressão (lâminas formadoras) e componentes de sucção (a vácuo) para remoção da água do papel. A drenagem se inicia no rolo formador de sucção e continua na etapa seguinte, pela passagem da folha por uma caixa de sucção, com três compartimentos, localizada sobre a tela superior e pelas lâminas formadoras sob a tela inferior. Na seqüência, estão instaladas duas caixas de sucção e um rolo com duas zonas de vácuo⁵⁸, denominado de rolo “couch”. O último elemento de drenagem compõe-se de uma caixa de sucção de alto vácuo, antes da transferência da folha para a seção das prensas, onde a consistência é de aproximadamente 21%.

3.2.3 Seção de Prensas

Na seção das prensas, a remoção de água do papel, que é realizada por meio de compressão mecânica, entre rolos de pressão e feltros, promove a consolidação da estrutura da folha. A seção de prensa possui quatro “nips⁵⁹” de prensagem. A primeira parte da operação realizada por uma prensa “tri-nip⁶⁰”, seguida pela quarta prensa, destinada ao controle de dupla face do papel. Na prensa “tri-nip”, o último ponto de prensagem é formado por uma prensa de sapata, com capacidade máxima de carga de 1150 kN/m. As demais foram dimensionadas para cargas lineares máximas de 70 kN/m para a primeira prensa, 90 kN/m para a segunda e 55 kN/m para a quarta.

A primeira prensa possui feltro superior e inferior e, portanto, a água é removida pelos dois lados da folha. Na segunda e terceira prensas, os feltros fazem contato somente com o lado superior da folha, produzindo desaguamento unilateral. A quarta prensa, utilizada para compensação de dupla face, utiliza somente um feltro inferior.

⁵⁸ A primeira zona de vácuo produz uma drenagem adicional e a segunda facilita a transferência da folha para a tela inferior, que é a tela de condução para a seção de prensagem.

⁵⁹ Denomina-se de *nip*, à área de contato entre dois rolos pressionados entre si, como ocorre nas prensas e calandras das máquinas de papel.

⁶⁰ Denominação dada à prensa com três *nips* de prensagem.

Após a prensagem, a folha, com teor seco em torno de 47%, é transferida para a seção de secagem.

3.2.4 Seção de Secagem

Os cilindros secadores, com diâmetro externo de 1800 mm, estão distribuídos em 6 grupos mecânicos na área de pré-secagem (antes da prensa de cola), totalizando 37 secadores e em 2 grupos mecânicos na pós-secagem (após a prensa de colagem), totalizando 15 secadores. Os 52 secadores são aquecidos com vapor proveniente de linhas de distribuição com pressões nominais de 3,7 bar e 10,0 bar.

As três primeiras baterias da pré-secagem e a primeira bateria da pós-secagem são formadas por secadores dispostos em fileira única (localizados na parte superior) e rolos guia-tela de sucção com caixas estabilizadoras, na parte inferior.

Com este arranjo, a folha é suportada por meio da tela secadora, desde a entrada na seção de secagem, até a saída da terceira bateria de secadores. As caixas estabilizadoras, bem como os rolos guia-tela de sucção operam a pressões sub-atmosféricas da ordem de 1,5 mca. A quarta e a quinta baterias de secadores possuem arranjo de fileira dupla, com deslocamento dos rolos guia-tela situados nos bolsões⁶¹ dos secadores, a fim de reduzir o passo livre e fornecer melhor suporte para a folha. Os secadores da sexta e a oitava baterias também estão arranjados no estilo de fileira dupla, porém, com rolos guia-tela centralizados.

3.2.5 Sistema de Vapor e Condensado

O sistema de vapor e condensado consiste na distribuição dos secadores em grupos térmicos, cuja finalidade é aquecer o papel de forma controlada, a fim de maximizar a capacidade de secagem e preservar a qualidade do papel produzido. As pressões de vapor nos secadores da pré-secagem são ajustadas de forma a obter o teor seco desejado para o papel antes da prensa de cola. De forma similar, as pressões nos

⁶¹ Região delimitada pelo secador, tela secadora e papel nos grupos dispostos em fileira dupla.

secadores da pós-secagem são ajustadas convenientemente, a fim de estabelecer o teor seco da folha na enroladeira.

Na pré-secagem, os três primeiros secadores dispõem de controles individuais, podendo operar com diferentes pressões de vapor. Os demais encontram-se divididos em 5 grupos térmicos, formados por 2, 2, 4, 8 e 18 secadores.

Na pós-secagem, os três primeiros secadores dispõem de controle individual, enquanto que os demais foram distribuídos em 2 grupos, formados por secadores superiores e inferiores, com 6 cilindros cada, os quais podem ser utilizados para correção de encanoamento da folha (*curl*), pois permitem a operação com pressões de vapor diferentes nos secadores que fazem contato com cada face do papel.

3.2.6 Capotas e Sistemas de Ventilação

As capotas instaladas sobre os secadores são do tipo “totalmente fechada”. Na seção de pré-secagem existem três unidades de exaustão e três unidades de insuflamento de ar de ventilação nos bolsões e na região inferior dos grupos com secadores dispostos em fileira única. A seção da pós-secagem dispõe de uma unidade de exaustão e duas unidades de insuflamento, as quais fornecem ar para ventilação. Nas linhas de exaustão foram instalados trocadores de calor de fluxo cruzado (ar/ar) com a finalidade de pré-aquecer o ar utilizado para ventilação.

3.2.7 Prensa de Colagem

Na prensa de colagem, do tipo aplicador por filme (“*film size press*”), uma solução de amido é aplicada sobre a superfície da folha, já formada e seca. A quantidade de amido a ser aplicada no papel é, inicialmente, dosada nos cabeçotes de aplicação, os quais criam filmes de solução que, a seguir, são transferidos para a folha, durante sua passagem pelo “*nip*”⁶² formado entre os rolos aplicadores. Os objetivos principais desta operação consistem em aumentar a resistência superficial da folha e a

⁶² Área formada pelo contato entre dois rolos pressionados um contra o outro.

resistência à penetração de água, características importantes para os papéis utilizados em processos de impressão.

3.2.8 Calandra

A calandra da máquina é do tipo “nip duro”, composta por dois rolos metálicos sem revestimento. A pressão de calandragem é usada com a finalidade de controlar a lisura e espessura da folha. A carga linear típica de operação situa-se na faixa de 10 - 30 kN/m.

3.2.9 Enroladeira

A enroladeira tem estilo convencional, constituída por braços primários de transferência e braços secundários com ajuste de pressão. As bobinas jumbo são formadas com diâmetro final de 2500 mm sobre estangas de 570 mm de diâmetro. Neste ponto o teor de umidade da folha é de 3,5%.

Dados de Operação da Máquina

O **Apêndice** apresenta parâmetros e condições de operação da máquina, no momento da coleta das amostras de massa e de papel . Os dados são provenientes do DCS da máquina⁶³.

⁶³ DCS *Honeywell* modelo PHD (sistema de controle digital).

3.3 Medições nas amostras

Uma alíquota da massa coletada na tubulação de alimentação da caixa de entrada foi utilizada para a caracterização da pasta celulósica utilizada na fabricação do papel, por meio da medição de parâmetros morfológicos e da classificação das fibras constituintes, além da determinação do índice de retenção de água (WRV⁶⁴). Outra parte, retirada da mesma amostra da caixa de entrada, bem como as amostras de refilo do formador foram usadas para formação de folhas manuais isotrópicas.

As amostras de folhas coletadas na máquina de papel (*cf.* item 3.1) e as folhas manuais de laboratório foram submetidas a testes para medição do teor de umidade e de carga mineral e de várias propriedades estruturais, mecânicas e higroexpansivas do papel.

3.3.1 Caracterização da pasta celulósica

A pasta celulósica, utilizada na fabricação do papel reprográfico escolhido para este trabalho, é produzida por polpação química⁶⁵, com seqüência de branqueamento do tipo ECF⁶⁶, e provém de fibras de árvores de eucalipto⁶⁷. A composição nominal desta pasta é formada por 82% de celulose e 18% de carga mineral⁶⁸ (carbonato de cálcio precipitado).

⁶⁴ *Water Retention Value* – método utilizado para medir a habilidade das fibras em reter água na sua estrutura celular.

⁶⁵ Processo de separação das fibras celulósicas da madeira mediante cozimento em digestores (vasos aquecidos de alta pressão) pela utilização de reagentes químicos, que formam o licor de cozimento.

⁶⁶ *Elemental Chlorine Free* – na seqüência de branqueamento deste tipo, não é utilizado o cloro elementar, mas apenas um composto dele (no caso, o dióxido de cloro).

⁶⁷ De várias espécies.

⁶⁸ A carga mineral é constituída por pigmentos finos que preenchem os espaços entre as fibras, a fim de criar uma superfície mais lisa e uniforme. Estes pigmentos também aumentam a opacidade do papel, o que melhora a qualidade de impressão.

Um analisador de fibras laboratorial *FiberExpert*⁶⁹, foi usado para medição do comprimento médio, da distribuição de comprimentos, do nível de curvatura (*curl*) e do parâmetro “*coarseness*” das fibras.

O princípio de medição deste equipamento é óptico: o analisador utiliza uma câmera fotográfica CCD⁷⁰ a fim de obter imagens das amostras⁷¹. Com a utilização de um software de análise de imagens, as fibras foram totalizadas e medidas, a fim de calcular os parâmetros de interesse.

3.3.1.1 Comprimento das fibras

O comprimento médio das fibras foi calculado pelo analisador *Fiber Expert*, a partir dos valores de comprimento individuais medidos nas amostras, *cf.* indicado a seguir⁷²:

$$l_f = \frac{\sum_{i=1,n} l_i^2}{\sum_{i=1,n} l_i} \quad (3.1)$$

onde:

l_f comprimento médio das fibras, mm

l_i comprimento individual das fibras, mm

n número total de fibras analisadas

⁶⁹ Equipamento de medição e visualização de características das fibras celulósicas, produzido pela *Metso Automation, Field Systems Division*.

⁷⁰ *Charged-Coupled Device*.

⁷¹ Foram analisadas 80 imagens de cada amostra utilizada em cada medição.

⁷² Média ponderada pelo comprimento das fibras. Em geral este tipo de média é preferido para a caracterização da pasta, pois fibras com comprimentos maiores produzem mais impacto na qualidade do papel.

3.3.1.2 Curvatura das fibras

A curvatura (*curl*) das fibras é calculado simultaneamente à análise das fibras. O valor médio é interpretado como indicação do nível de curvatura das fibras.

A relação, a seguir, é utilizada para a determinação da curvatura de uma fibra, individualmente (ver Figura3.3):

$$C_i = 1 \times 10^2 \frac{l_i - d_i}{l_i} \quad (3.2)$$

onde:

C_i curvatura da fibra i, %

l_i comprimento longitudinal da fibra i, mm

d_i distância entre as extremidades da fibra i, mm

Figura 3.3. Dimensões da fibra para cálculo de curvatura (*curl*)

A equação, a seguir, é utilizada no cálculo da curvatura média⁷³ das fibras analisadas:

$$C_f = \frac{\sum_{i=1,n} (C_i l_i)}{\sum_{i=1,n} l_i} \quad (3.3)$$

onde:

C_f curvatura média das fibras, %

C_i curvatura individual das fibras, %

l_i comprimento individual das fibras, mm

n número total de fibras analisadas

3.3.1.3 *Coarseness*

Este parâmetro representa a massa contida em um metro de fibra seca. Inicialmente, é calculada a massa seca de todas as fibras analisadas e, em seguida, é determinado o valor de *coarseness*, *cf.* indicado abaixo:

$$DF = 1 \times 10^{-2} n_p d c A \quad (3.4)$$

e

$$C_s = 1 \times 10^3 \frac{DF}{L} \quad (3.5)$$

onde:

C_s *coarseness*, mg.m⁻¹

⁷³ Média ponderada pelo comprimento das fibras.

DF	massa seca total das fibras analisadas, mg
d	distância entre as placas de vidro que contém a amostra, mm
c	consistência da massa, %
A	área de uma fotografia individual, mm ²
L	comprimento total das fibras analisadas, mm
n_p	número total de fotografias

3.3.1.4 Relações entre dimensões fundamentais das fibras

A largura da fibra (L) e o diâmetro do lúmen (DL) foram medidos por meio da utilização do software de análise de imagens *Image-Pro Plus*⁷⁴, a partir da observação de 50 imagens da amostra de pasta, similares à indicada na Figura 3.2, as quais foram geradas por um microscópio óptico *Olympus* modelo BX50F4 (aumento de 200 X), acoplado a um computador. A medição destes parâmetros foi usada para determinar a espessura de parede (E), a fração de parede (FP)⁷⁵ e o índice de *Runkel* (IR)⁷⁶.

A espessura de parede foi calculada *cf.* indicado abaixo:

$$E = \frac{L - DL}{2} \quad (3.6)$$

onde:

⁷⁴ *Image-Pro Plus* versão 4.1.0.0 for windows 95/NT/98, Media Cybernetics, USA.

⁷⁵ A fração de parede determina a rigidez das fibras, sendo diretamente proporcional a esta propriedade. Fibras mais rígidas estão menos propensas às ligações inter-fibras, produzindo propriedades de resistência mais baixas para o papel. Ver Kuan; Benazzi; Bergman [1988].

⁷⁶ O índice de Runkel é inversamente proporcional ao potencial de ligação entre as fibras. Portanto, quanto menor o IR, maior será a resistência à tração do papel. Ver Kuan; Benazzi; Bergman [1988].

E espessura de parede, μm

L largura da fibra, μm

DL diâmetro do lúmen, μm

A fração de parede foi calculada pela relação a seguir:

$$FP = \frac{2 \times E}{L} \times 100 \quad (3.7)$$

onde:

FP fator de parede, %

E espessura de parede, μm

L largura da fibra, μm

O índice de *Runkel* é definido de acordo com a relação abaixo:

$$IR = \frac{2 \times E}{DL} \quad (3.8)$$

onde:

IR índice de *Runkel*

E espessura de parede, μm

DL diâmetro do lúmen, μm

Os valores de largura da fibra e de diâmetro de lúmen apresentados representam a média de 50 medições realizadas sobre imagens escolhidas aleatoriamente na amostra utilizada.

Figura 3.4 Imagem ampliada da massa de papel usada para medição da largura e do diâmetro do lúmen das fibras

3.3.1.5 Índice de Retenção de Água (*WRV*)

O índice de retenção de água ou *WRV* (*water retention value*) foi medido segundo o método TAPPI UM 256 [1981], nas condições indicadas adiante. Este teste tem a finalidade de determinar, empiricamente, a habilidade que têm as fibras de celulose, presentes em uma determinada massa de papel, de reter água no interior da sua estrutura.

O procedimento de medição consistiu em, inicialmente, submeter uma quantidade de massa de papel⁷⁷ depositada em um cadinho de filtração com peneira de 200 mesh a uma centrifugação com aceleração de 900G⁷⁸ (2800 rpm), durante um período de 30 min, após o qual, a massa centrifugada (torta) foi pesada, imediatamente, para determinação do peso úmido (*PU*). Na sequência, a mesma torta foi levada para uma estufa, para secagem a 105 ± 3 °C, por um período mínimo de duas horas, após o qual foi novamente pesada, a fim de se determinar o peso seco da amostra (*PS*).

⁷⁷ A determinação do volume da massa a ser testada é calculado a partir da medição da consistência da pasta e da quantidade necessária para formar no fundo do cadinho de filtração, uma pequena “torta” com gramatura seca de 1400 g.m². No teste realizado, foram utilizados 110 ml de pasta, com consistência de 1,15%, em um cadinho medindo 32 mm de diâmetro.

⁷⁸ Novecentas vezes a aceleração da gravidade.

O índice de retenção de água (WRV) foi calculado da seguinte forma:

$$WRV = \frac{PU - PS}{PS} \times 100 \quad (3.9)$$

onde:

WRV índice de retenção de água, %

PU peso úmido, g

PS peso seco, g

O valor para o índice de retenção de água apresentado representa o valor médio de quatro medições.

3.3.2 Formação de folhas manuais

Com um formador laboratorial de coluna REGMED modelo FF/C⁷⁹, foram formadas folhas manuais isotrópicas, com diâmetro aproximado de 159 mm, utilizando-se a massa proveniente da alimentação da caixa de entrada e das amostras de refilo do formador.

O procedimento adotado para a produção das folhas manuais foi similar ao descrito na norma TAPPI T205 sp-95 [1995] e foram produzidos discos com gramatura seca de $75,0 \pm 3,8 \text{ g.m}^{-2}$. Este valor foi escolhido a fim de aproximar a gramatura das folhas manuais à do papel produzido na máquina.

Um volume aproximado de 165 ml de massa de papel, equivalente a 1,485 g de massa seca⁸⁰, proveniente da amostra colhida na alimentação da caixa de entrada, com consistência em torno de 0,9 % (homogeneizada em aparelho REGMED modelo

⁷⁹ Laboratório de garantia da qualidade da Ripasa S/A Papel e Celulose, Unidade de Americana, SP

⁸⁰ A área da folha manual corresponde a $1,9806 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. Portanto 1,485 g de fibras produz uma folha com gramatura seca aproximada de 75 g.m^{-2} .

D150), foi transferido para o formador de coluna, diluído com água filtrada e, em seguida, misturado vigorosamente com agitador manual perfurado, a fim de formar uma suspensão com distribuição uniforme de fibras para a formação de cada folha.

No caso das amostras de refilo do formador, o procedimento para obtenção de folhas manuais foi similar ao anterior, porém, o material celulósico usado inicialmente com teor seco em torno de 21,6 %, foi diluído em água filtrada até alcançar uma consistência de aproximadamente 0,7 %⁸¹ antes de ser usado na formação das folhas manuais. Para este procedimento, a suspensão foi homogeneizada em aparelho REGMED modelo D150, após a diluição.

Após a formação, as folhas foram submetidas a duas etapas de prensagem, em prensa tipo diafragma REGMED modelo FF/C-PH, sobre folhas absorventes (mata-borrão), para eliminação de água e dispostas de forma a fazer contato com as faces de placas polidas de suporte. Para a secagem, as folhas aderidas às placas polidas foram empilhadas em suportes (anéis perfurados) e submetidas à circulação forçada de ar por 24 horas, a fim de atingir a umidade final, na temperatura ambiente.

Este procedimento resulta em folhas secas com restrição ao encolhimento, pois as folhas formadas permanecem aderidas às chapas polidas durante a etapa de secagem.

Para produzir folhas secas sem restrição ao encolhimento, após a prensagem final, elas foram separadas das chapas de secagem polidas, após a etapa de prensagem e deixadas a secar livremente sobre uma superfície plana, no laboratório.

3.3.3 Propriedades estruturais, mecânicas e higroexpansivas

Os testes descritos a seguir foram realizados em laboratório climatizado⁸², com temperatura ambiente controlada na faixa de 23 ± 1 °C e umidade relativa do ar na faixa de 50 ± 2 %, [TAPPI T 402 om-93]. Estes parâmetros foram indicados e

⁸¹ Tomou-se 278 g de massa de refilo úmido com consistência em torno de 21,6% (equivalente a 60 g de massa seca) e dilui-se com adição de 9 l de água filtrada, resultando em uma suspensão com teor de sólidos de 0,66%.

registrados continuamente por um higrômetro THERMO HYGROGRAPH SK SATO modelo R-704 instalado no interior do laboratório. Como a umidade relativa e a temperatura do ambiente têm efeito significativo sobre as propriedades físicas do papel, as amostras foram condicionadas neste ambiente, antes dos testes, por 30 minutos, a fim de conferir condições semelhantes para todas, durante a realização dos testes.

3.3.3.1 Gramatura

A gramatura é definida como a razão da massa por unidade de área da folha de papel. A medição consiste em determinar a massa de uma amostra com área definida [TAPPI T 410 om-98, 1998]. Para a determinação da gramatura das amostras, foram utilizados corpos de prova com dimensões de $210 \pm 0,5$ mm x $297 \pm 0,5$ mm, ou seja, com área equivalente de $623,7$ cm², cuja massa foi medida em balança semi-analítica METTLER TOLEDO modelo PB 303. A gramatura foi calculada da seguinte forma:

$$w = K \times p \quad (3.10)$$

onde:

w gramatura, g.m⁻²

K fator de conversão⁸² = $16,033$, m⁻²

p massa do corpo de prova, g

3.3.3.2 Espessura

A espessura do papel é definida como a distância perpendicular entre as duas superfícies principais da folha [TAPPI T 411 om-97, 1997]. Foi medida com a

⁸² Os testes foram realizados no laboratório de testes físicos da Ripasa S/A Celulose e Papel, Unidade Americana, SP.

⁸³ O fator de conversão foi definido pela seguinte relação: $K = 1 \times 10^6 / (210 \times 297)$, m⁻²

utilização de um micrômetro Lorentzen & Wettre modelo 051 (*L&W Micrometer*), que comprime a folha com pressão de 50 kPa, entre duas placas paralelas. A espessura final de cada amostra, foi calculada pela média aritmética dos valores encontrados em três medições em pontos diferentes da amostra, selecionados aleatoriamente.

3.3.3.3 Corpo (*Bulk*)

Defini-se o corpo (*bulk*) do papel, como o inverso de sua densidade aparente. Este parâmetro indica o volume ocupado, em cm³, por 1g de papel. A partir das medições de gramatura (*cf.* item 3.3.3.1) e de espessura (*cf.* item 3.3.3.2), calculou-se o corpo (*bulk*) da seguinte forma:

$$B = \frac{e}{w} \quad (3.11)$$

onde:

B corpo (*bulk*), cm³.g⁻¹

e espessura, μm

w gramatura, g.m⁻²

3.3.3.4 Umidade

O teor de umidade absoluta das amostras de papel foi medido por um Analisador de Umidade Moistrex⁸⁴ modelo MX 5000 E. Este equipamento realiza a medição utilizando técnica microondas e apresenta os resultados em segundos, na forma de percentual de água contida no corpo de prova [%].

⁸⁴ *Infrared Engineering, Korins Co. Ltd., Korea.*

3.3.3.5 Carga mineral

A determinação do teor de componentes inorgânicos presentes no papel (também denominado como carga mineral ou teor de cinzas) foi realizada por processo de calcinação⁸⁵ em incinerador laboratorial REGMED modelo INCIN a 900 ± 25 °C [TAPPI T 413 om-93, 1993]. Uma amostra de $2,0 \pm 0,5$ g de papel (massa seca) foi incinerada até completar a combustão. A massa de cinzas, determinada em balança semi-analítica foi utilizada para o cálculo da carga mineral, *cf.* indicado a seguir:

$$CM = 1 \times 10^2 \times f \times \frac{p_2}{p_1} \quad (3.12)$$

onde:

CM carga mineral, %

f fator de conversão de cinzas para carga mineral, para papel contendo carbonato de cálcio (sem caulim)⁸⁶ = 1,786

p_1 massa inicial da amostra, g

p_2 massa de cinzas, após a incineração

O teor de cinzas de uma amostra pode consistir de vários resíduos de produtos químicos usados na fabricação do papel, componentes minerais provenientes da pasta celulósica com a qual foi produzido, bem como outros constituintes, como a carga⁸⁷ (*filler*) do papel, pigmentos ou revestimentos. No caso do papel analisado neste trabalho, o principal constituinte mineral refere-se ao carbonato de cálcio, usado como carga, na preparação da massa.

⁸⁵ Redução à cinza por ação do fogo

⁸⁶ O fator de conversão é determinado pelo balanço da reação de calcinação do carbonato de cálcio, $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ (a 900 °C), da seguinte forma: $f = \text{PM}_{\text{CaCO}_3} / (\text{PM}_{\text{CaO}}) = 100/56 = 1,786$.

⁸⁷ A carga tem a finalidade básica de produzir melhores características de alvura, lisura e opacidade, bem como melhor uniformidade superficial e melhor printabilidade.

3.3.3.6 Formação

O índice de formação do papel refere-se ao grau de uniformidade na distribuição das fibras e demais componentes sólidos que constituem a folha.

A medição da formação das amostras de papel foi realizada pela utilização de um analisador de formação AMBERTEC modelo BFT-1 (*Beta Formation Tester*), que utiliza radiação beta⁸⁸ para verificar a variação de gramatura entre 400 pontos de uma matriz quadrada 20 x 20 pontos, com distância de 3,5 mm entre pontos adjacentes, perfazendo uma área de análise de 49 cm². A variação de gramatura é avaliada pela diferença de absorção da radiação beta entre os pontos.

A partir da gramatura média da amostra (*cf.* medição descrita no item 3.3.3.1), usada como dado de entrada para o analisador de formação, as gramaturas individuais dos 400 pontos são determinadas e o desvio padrão calculado é utilizado como índice de formação. Portanto, baixos valores numéricos do desvio padrão indicam boa formação do papel. Outro parâmetro, fornecido pelo analisador e denominado como formação específica, é obtido pela normalização do índice de formação, ou seja, pela divisão do desvio padrão pela raiz quadrada da gramatura. Em geral, o índice normalizado é utilizado como principal indicador de formação do papel, a fim de facilitar a comparação da formação medida em folhas com diferentes gramaturas.

3.3.3.7 TSI e TSO

O índice de tração - *TSI* (*Tensile Stiffness Index*) - é definido pela razão entre a resistência à tração e a gramatura do papel. O *TSO* (*Tensile Stiffness Orientation*) representa o ângulo formado entre a direção do valor máximo de *TSI* e a direção longitudinal da máquina de papel (MD).

A medição do *TSI* (*Tensile Stiffness Index*) e do *TSO* (*Tensile Stiffness Orientation*) foi realizada com um aparelho Lorentzen & Wettre código 150, tipo 95226 (*L&W TSO Tester*). Este equipamento utiliza tecnologia de ultra-som para a medição e

⁸⁸ Fonte de radiação: Promethium-147, atividade nominal de 5mCi.

correlaciona a velocidade de propagação de um pulso com frequência de 60 kHz, através do corpo de prova, com propriedades do papel, da seguinte forma:

$$TSI = c \times v^2 \quad (3.13)$$

onde:

TSI *tensile stiffness index*, kN.m.g^{-1}

c constante, adimensional

v velocidade de propagação, km.s^{-1}

O analisador de *TSO* realiza as medições de *TSI*, sobre uma amostra de papel, em diferentes direções, a partir da direção longitudinal da máquina (MD). São executadas oito medidas defasadas de 22.5° . Uma aproximação numérica (análise de *Fourier* com 15 coeficientes) é utilizada para transformar os sinais em um diagrama polar, que mostra a direção do pico do *TSI* (ver Figura 2.11).

3.3.3.8 Porosidade

A porosidade (*Gurley*) é definida pela medição do tempo necessário em segundos para que um volume de 100 ml de ar, injetado a uma pressão pré-determinada, atravesse uma seção transversal de 50 cm^2 do papel. O resultado é expresso em $[\text{s.100ml}^{-1}]$.

A porosidade (*Gurley*) das amostras (ou permeância ao ar) foi medida por um aparelho Lorentzen & Wettre modelo SE 166 (*L&W Air Permeance Tester*). A medição foi realizada em corpos de prova com tamanho $25 \times 40 \text{ cm}$ (sendo o maior lado correspondente à direção longitudinal da máquina de papel). Cada avaliação foi feita em quatro pontos do corpo de prova, escolhidos aleatoriamente.

3.3.3.9 Aspereza e dupla face

A aspereza (*Bendtsen*) da superfície do papel é determinada a partir da medição do fluxo resultante da injeção de ar, sob pressão pré-estabelecida, através do espaço entre a uma placa circular plana pressionada contra a superfície do corpo de prova de papel. O fluxo de ar medido em [ml/min] é usado para expressar a aspereza superficial do papel.

A aspereza das amostras foi medida por um aparelho Lorentzen & Wettre modelo SE 164 (*L&W Bendtsen Tester*). A medição foi realizada em corpos de prova com tamanho 25 x 40 cm (sendo o maior lado, correspondente à direção longitudinal da máquina de papel). Cada avaliação foi feita em quatro pontos do corpo de prova, escolhidos aleatoriamente.

O teste foi realizado no lado tela⁸⁹ e lado feltro⁹⁰ da folha de papel em quatro pontos do corpo de prova, escolhidos aleatoriamente. A comparação das asperezas dos dois lados da folha determina o parâmetro de qualidade denominado “dupla face”. O produto será tanto mais uniforme quanto menor for a dupla face.

3.3.3.10 Resistência à tração, alongamento, energia absorvida na tração (TEA), rigidez à tração e comprimento de auto-ruptura

As medições de resistência à tração (*tensile strenght*), alongamento (*stretch* ou *percent elongation*), TEA (*tensile energy absorption*) e rigidez à tração (*tensile stiffness*) foram realizadas com utilização de um aparelho de teste Lorentzen & Wettre modelo 060 (*L&W Tensile Tester*), pelo método de aplicação de taxa constante de alongamento [TAPPI T 494 om-96, 1996]. O equipamento, além destes parâmetros, apresenta o CAR - comprimento de auto-ruptura (*breaking length*). O corpo de prova é fixado entre duas garras, sendo uma fixa, na qual está conectada uma célula de carga e outra móvel usada para tensionar o papel a uma velocidade de

⁸⁹ Lado inferior do papel em relação ao plano da máquina, o qual faz contato com a tela formadora em máquinas do tipo *Fourdrinier*.

⁹⁰ Lado superior da folha, ou seja, oposto ao lado tela.

separação pré-determinada (taxa constante de alongamento), até a ruptura. A força máxima de tração que o corpo de prova resiste, antes da ruptura, e o alongamento correspondente são medidos e registrados, para determinação das propriedades de ruptura por tensão.

Os ensaios foram realizados com cinco corpos de prova, de cada direção da folha (longitudinal e transversal), retirados das amostras de papel, medindo 15 ± 1 mm de largura e aproximadamente 300 mm de comprimento. As garras do instrumento foram posicionadas com uma distância inicial (*test span*) de 100 ± 5 mm e a velocidade de separação foi ajustada em 20 mm.min^{-1} . Os resultados apresentados correspondem à média aritmética de cinco resultados obtidos.

Resistência à tração

A resistência à tração corresponde à máxima força de tensão por unidade de largura que o papel suporta antes de se romper, quando a carga é aplicada na direção paralela ao comprimento da amostra. É calculada pela razão entre a força máxima de tração medida e a largura do corpo de prova.

Este parâmetro é indicativo da resistência derivada de fatores como a resistência e o comprimento das fibras e o grau de interligação entre elas. Pode ser usado para deduzir informações sobre estes fatores, em particular quando se considera o índice de resistência à tração (ver item 3.3.5.10). Com o objetivo de controle de qualidade, representa um indicativo para a utilização final de papéis sujeitos a esforços diretos de tração. No caso de papéis que se destinam a operações de conversão ou impressoras alimentadas por bobinas de papel, pode ser utilizado como indicador do potencial de resistência à quebra da folha. A avaliação da resistência à tração associada ao alongamento e ao TEA poderá ser de grande importância, a fim de prever o desempenho do papel em certas aplicações, nas quais o papel estará sujeito a esforços de tração não uniformes.

A razão entre as resistências à tração nas direções longitudinal e transversal do papel é freqüentemente utilizada como indicador da orientação de fibras do papel, pois este parâmetro é muito dependente da anisotropia do papel.

Alongamento

O alongamento corresponde à máxima deformação desenvolvida no corpo de prova quando submetido à tração, antes da ruptura. O alongamento é calculado pela razão entre o aumento de comprimento desenvolvido e o comprimento original do corpo de prova, expresso em percentagem [%].

Este parâmetro é indicativo da habilidade do papel para se ajustar segundo uma certa deformação ou de resistir à ação de esforços de tração não uniformes. Esta propriedade torna-se importante para a redução da freqüência de quebras em impressoras de alta velocidade, alimentadas por bobinas de papel.

Absorção de energia na tração (*TEA – tensile energy absorption*)

Este índice representa a quantidade de energia por unidade de área que o papel pode absorver, quando submetido a uma deformação. O instrumento de teste mede e registra o alongamento desenvolvido em função da força aplicada ao corpo de prova. A área sob a curva resultante da força de tração *vs.* alongamento, tomado desde zero até a máxima deformação, corresponde ao trabalho realizado (W^{91}), a fim de provocar a ruptura do papel (ver Figura 3.5). O *TEA* é calculado pela razão entre o trabalho realizado e a área original do corpo de prova e expresso em $[J.m^{-2}]$, ou seja:

$$TEA = 1 \times 10^6 \frac{\int F dl}{b \times l_0} \quad (3.14)$$

onde:

⁹¹ $W = \int F dl$, expresso em [J].

TEA tensile energy absorption, $J.m^{-2}$

F força de tração aplicada, kN

l comprimento do corpo de prova, mm

l_0 comprimento original do corpo de prova (*test span*), mm

b largura do corpo de prova, mm

O TEA é uma medição da habilidade do papel em absorver energia a uma dada taxa de alongamento (no caso, a do instrumento de teste) e indica o potencial de durabilidade do papel quando submetido a tensões ou deformações de forma repetitiva.

Figura 3.5. Medição das propriedades de resistência à tração, rigidez à tração e módulo de elasticidade e energia absorvida na tração [Levlin, 2000].

Rigidez à tração (*tensile stiffness*)

A rigidez à tração é definida como a razão entre a força de tração aplicada por unidade de largura do corpo de prova e o alongamento correspondente, dentro da

região elástica da curva que relaciona a força de tração com o alongamento. A região elástica da relação entre tensão e deformação corresponde à porção linear da curva indicada na Figura 3.5, até o limite de elasticidade, onde a relação entre a força de tração e o alongamento perde a linearidade. Numericamente, a rigidez à tração se iguala a $E \times t$, onde E é o módulo de elasticidade e t é a espessura da amostra. Portanto:

$$TS = \frac{\Delta F}{b} \times \frac{l_0}{\Delta l} \quad (3.15)$$

onde:

TS rigidez à tração (*tensile stiffness*), kN.m^{-1}

ΔF variação da força de tração aplicada, kN

Δl variação de comprimento correspondente, mm

l_0 comprimento original do corpo de prova (*test span*), mm

b largura do corpo de prova, mm

Este parâmetro está relacionado com a rigidez da folha e, em geral, indica melhor a resposta mecânica da folha a forças de conversão do que o critério de ruptura.

Comprimento de auto-ruptura

O comprimento de auto-ruptura é definido como o comprimento máximo para uma tira de papel com largura uniforme, além do qual, se suspensa por uma das extremidades, romper-se-á em função do peso próprio, expresso em $[\text{km}]$ e calculado da seguinte forma:

$$BL = 1,02 \times 10^2 \frac{T}{w} \quad (3.16)$$

onde:

BL comprimento de auto-ruptura (*breaking length*), km

T resistência à tração, kN.m^{-1}

w gramatura, g.m^{-2}

3.3.3.11 Índice de tração

O índice de tração (*tensile index*) é definido com a razão entre a resistência à tração e a gramatura da amostra e foi calculado a partir dos dados obtidos em 3.3.3.1 (gramatura) e 3.3.3.10 (resistência à tração), da seguinte forma:

$$TI = \frac{T}{w} \quad (3.17)$$

onde:

TI índice de tração (*tensile index*), N.m.g^{-1}

T resistência à tração, kN.m^{-1}

w gramatura, g.m^{-2}

O índice de tração relaciona a resistência à tração com a quantidade de material submetido à carga.

3.3.3.12 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é definido pela razão entre a rigidez à tração (*tensile stiffness*) e a espessura da amostra e foi calculado a partir dos dados obtidos em 3.3.3.10 (*tensile stiffness*) e 3.3.3.2 (espessura), da seguinte forma:

$$E = \frac{TS}{t} \quad (3.18)$$

onde:

E módulo de elasticidade, GPa

TS rigidez à tração (*tensile stiffness*), kN.m^{-1}

t espessura da folha de papel, μm

3.3.3.13 Resistência ao rasgo

A força média necessária para continuar um rasgo iniciado em uma folha de papel define a resistência interna ao rasgo. Esta propriedade foi medida nas duas direções do papel (MD e CD), iniciando-se o rasgo em cada uma destas direções.

A resistência ao rasgo das amostras foi medida por um aparelho Lorentzen & Wettre modelo SE 009 (*L&W Tearing Tester*). Cada medição foi feita com oito do corpo de prova, cortados simultaneamente. Os resultados foram expressos em [g.f].

3.3.3.14 Rigidez

A rigidez (*bending stiffness*) descreve habilidade do papel em resistir à força de flexão aplicada perpendicularmente à extremidade livre de uma tira do produto, tendo a outra extremidade presa por grampos. O teste foi realizado com corpos de prova medindo $(38,1 \pm 0,3)$ mm x $(38,1 \pm 0,3)$ mm, cortados separadamente para as duas direções da máquina (MD e CD).

A rigidez das amostras foi medida por um aparelho Taber Industries modelo 150-E (*V-5 Stiffness Tester*) e o momento de flexão necessário para flexionar o corpo de prova em 15° , medido em [gf.cm], foi usado para expressar os valores de rigidez.

3.3.3.15 Resistência ao estouro

A resistência ao estouro (*Burst strenght*) é definida como a máxima pressão, que aplicada de forma uniforme e perpendicularmente à superfície, pode ser tolerada pelo papel durante o teste.

O teste foi realizado utilizando-se um aparelho Lorentzen & Wettre modelo SE 002P (*L&W Bursting Strenght Tester*). Cada medição foi feita em três pontos do corpo de prova, medindo 25 x 40 cm, escolhidos de forma aleatória. Os resultados foram expressos em [kPa].

3.3.3.16 Determinação da higroexpansibilidade

A determinação da higroexpansibilidade do papel foi realizada por meio de ensaios em equipamento laboratorial⁹², com base no método de ensaio, previsto na norma ISO 8226-1 [1994].

O método consiste em submeter corpos de prova a um condicionamento inicial⁹³ e, posteriormente, a uma variação na umidade relativa do ar, com a qual se encontra em equilíbrio, na câmara de teste, de $(33 \pm 2) \%$ a $(66 \pm 2) \%$ ⁹⁴, a fim de medir a variação de comprimento causada pela mudança na umidade relativa do ar. A medição da variação de comprimento dos corpos de prova, entre os patamares de umidade relativa indicados anteriormente, é usada para calcular o coeficiente de higroexpansibilidade, de acordo com a equação a seguir:

$$X^* = 1 \times 10^{-1} \frac{(\Delta l_{66} - \Delta l_{33})}{l_0} \times \frac{33}{R_{66} - R_{33}} \quad (3.19)$$

⁹² Laboratório do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

⁹³ O condicionamento inicial é realizado à umidade relativa de $(22 \pm 3) \%$, pelo período mínimo de 30 min, com a finalidade de assegurar que todos os corpos de prova a serem testados se encontram em condição similar de umidade de equilíbrio, antes do início do ensaio de higroexpansibilidade.

⁹⁴ O valor máximo de umidade de 66 % foi determinado na norma ISO 8226-1, com o objetivo de minimizar a influência da relaxação de tensões internas do papel durante a medição do coeficiente de higroexpansibilidade do papel.

onde:

X^*	higroexpansibilidade, %
l_0	comprimento inicial do corpo de prova, mm
Δl_{33}	variação no comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(33 \pm 2) \%$, μm
Δl_{66}	variação no comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de $(66 \pm 2) \%$, μm
R_{33}	umidade do ar medida no patamar de $(33 \pm 2) \%$
R_{66}	umidade do ar medida no patamar de $(66 \pm 2) \%$

Embora a norma ISO 8226-1 [1994] não contemple o fator de correção expresso pelo último termo da equação (3.19), sua utilização foi considerada, a fim de manter a variação média real de umidade relativa do ar no cálculo do coeficiente de higroexpansibilidade do papel.

Características do higroexpansímetro

O higroexpansímetro laboratorial utilizado consiste, basicamente, de três partes: (a) uma câmara de teste com isolamento térmico, onde são colocados os corpos de prova; (b) um sistema de ar para alimentação da câmara de teste, com temperatura e umidade relativa controladas; e (c) um sistema computadorizado de aquisição e tratamento de dados com uma unidade de controle.

A Figura 3.6 mostra o esquema ilustrativo do sistema de controle de umidade relativa e temperatura do ar. A unidade de geração de ar tem a capacidade de produzir uma corrente de ar úmido saturado (fazendo o ar passar por uma torre de umidificação) e uma corrente de ar seco (fazendo o ar passar por um leito de secagem).

A umidade do ar na câmara de teste é medida por um sensor, com precisão de 2%, e controlada pela temperatura da água no fluxo que é dirigido para a coluna de umidificação (aquecedor 1) e pela posição da válvula de três vias, a qual regula a fração de ar que segue para o circuito de umidificação ou de secagem. A concepção da câmara de teste permite um escoamento uniforme do ar em todo o seu volume.

O controle de temperatura é feito pela atuação nos aquecedores situados na linha de ar seco (aquecedor 2) e na linha de mistura de ar (aquecedor 3).

Os corpos de prova são presos verticalmente por meio de grampos, no interior da câmara de ensaio, e as variações de comprimento, resultantes da variação da umidade relativa do ar, são medidas por um sensor linear de proximidade a laser, com precisão mínima de 0,001 mm.

O sistema de aquisição de dados e o software de controle permitem que o operador visualize os resultados das medições de umidade do ar e de variação de comprimento dos corpos de prova e que sejam armazenadas para processamento futuro.

Na Figura 3.7, encontra-se uma fotografia do equipamento utilizado para os ensaios de higroexpansibilidade.

Medição da higroexpansibilidade do papel

Para os ensaios de higroexpansibilidade, foram retirados cinco corpos de prova de cada amostra de papel (ver seção 3.1), cada um com 15 mm de largura e comprimento superior a 100 mm, sendo o lado mais longo correspondente à direção de interesse (MD ou CD). A gramatura das amostras foi determinada *cf.* descrito na seção 3.3.3.1. Os corpos de prova foram fixados, verticalmente, no interior da câmara por meio de grampos, sendo que os inferiores, com massa pré-determinada de $23 \pm 1,5$ g, mantiveram os corpos de prova tensionados com carga de 15 ± 1 N/m. A distância inicial entre o grampo superior e o inferior, corresponde ao comprimento inicial do corpo de prova (l_0).

Figura 3.6. Sistema de controle de umidade relativa e temperatura do ar na câmara de ensaios.

Figura 3.7. Higroexpansímetro do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

A câmara de teste foi mantida na temperatura de 25 ± 2 °C e a umidade relativa do ar, no seu interior, foi controlada nos patamares necessários para os ensaios, *cf.* descrito a seguir.

Na primeira etapa, a umidade relativa do ar foi mantida em (22 ± 3) %, durante 60 minutos, para pré-condicionamento dos corpos de prova.

A seguir, foi aplicada uma perturbação instantânea (degrau) de 11%, para elevar a umidade relativa do ar, no interior da câmara, para o nível de (33 ± 2) %, onde foi mantida durante 90 min. Nesta condição, as medições da variação de comprimento, realizadas pelo sensor de proximidade a laser, que se desloca continuamente na base dos corpos de prova, são registradas pelo sistema de aquisição de dados para uso futuro no cálculo da higroexpansibilidade. Para este nível de umidade do ar, foram selecionados 110 valores de variação do comprimento do corpo de prova, tomados com intervalo de 15 a 20 segundos entre medições, cujo valor médio representou a variação no comprimento do corpo de prova em equilíbrio na condição de umidade relativa do ar de (33 ± 2) % (Δl_{33}).

Para a próxima etapa, uma nova perturbação instantânea foi aplicada ao sistema de controle, desta vez, para elevar o nível da umidade relativa do ar, no interior da câmara para (66 ± 2) %, no qual permaneceu durante 210 min. Para este nível de umidade, foram selecionados 218 valores de variação do comprimento do corpo de prova, tomados a intervalos de 15 a 20 segundos entre medições, para determinação da variação do comprimento do corpo de prova, em equilíbrio, na condição de umidade relativa do ar de (66 ± 2) % (Δl_{66}).

Os valores de umidade relativa do ar, no interior da câmara, foram medidos e registrados simultaneamente à medição e registro das variações do comprimento dos corpos de prova nos níveis de (33 ± 2) % e (66 ± 2) %. Seus valores médios foram atribuídos aos termos R_{33} e R_{66} , respectivamente.

4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos testes e ensaios executados com as amostras de pasta celulósica e de papel provenientes da máquina, segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 Caracterização da pasta celulósica

A Tabela IV.1 mostra as características da pasta celulósica utilizada na fabricação do papel reprográfico usado no presente estudo. As dimensões fundamentais das fibras e inter-relações (fração de parede e índice de *Runkel*) encontram-se na Tabela IV.2.

Tabela IV.1 – Características da pasta celulósica

Tipo de pasta	Pasta química de eucalipto branqueada ⁹⁵
Matéria prima	Fibras de eucalipto (várias espécies)
Comprimento médio das fibras, mm ⁹⁶	0,71
Comprimento médio sem finos, mm ⁹⁶	0,84
<i>Coarseness</i> ⁹⁷ , mg.m ⁻¹	0,06
Curvatura (<i>curl</i>), %	12,18
Fibras/g, milhões	22,05
Classificação das fibras ⁹⁶ , %	
< 0,20 mm (finos)	17,40
0,21 – 0,80 mm	45,33
0,81 – 1,80 mm	32,38
> 1,81 mm	4,05
Quantidade de fibras analisadas	185.307
Índice de Retenção de Água (<i>WRV</i>), %	175,3

⁹⁵ Pasta branqueada por processo ECF (ver seção 3.3.1).

⁹⁶ Valores ponderados pelos comprimentos das fibras analisadas.

⁹⁷ Para fibras com comprimento > 0,30 mm.

Tabela IV.2 – Fração de parede e índice de *Runkel*

Largura da fibra, μm	17,02
Lúmen, μm	7,90
Espessura da parede, μm	4,56
Fração de parede, %	54
Índice de <i>Runkel</i>	1,3

O valor ponderado pelos comprimentos das fibras analisadas é comumente utilizado para expressar o comprimento médio e a classificação das fibras. A preferência por este método se deve à influência do comprimento das fibras em várias propriedades, especialmente nas que se referem à resistência e às características elásticas do papel.

4.2 Propriedades estruturais, mecânicas e higroexpansivas do papel

A Tabela IV.3 mostra os resultados das medições de propriedades realizadas em folhas manuais isotrópicas, formadas em laboratório, com amostras de massa coletada na alimentação da caixa de entrada e com amostras de refilos provenientes da saída do formador da máquina de papel. O efeito do método de secagem das folhas manuais é observado por comparação entre os resultados obtidos para as propriedades medidas nas folhas secadas com e sem restrição ao encolhimento.

As folhas produzidas com massa da caixa de entrada e submetidas à secagem sem restrição ao encolhimento apresentaram maiores valores de corpo (*bulk*), porosidade, índice de tração, alongamento, energia absorvida na tração (*TEA*) e índice de estouro. As amostras secadas com restrição ao encolhimento apresentaram valores menores para a rigidez à tração (*tensile stiffness*), módulo de elasticidade e resistência ao rasgo.

Tabela IV.3 – Resultados das medições efetuadas em folhas formadas manualmente em laboratório (com e sem restrição na secagem) – valores médios.

	C.Entrada	Formador	C.Entrada	Formador
	secagem c/ restrição		secagem s/ restrição	
Gramatura, g.m⁻²	79,3	81,6	76,2	75,6
Espessura, μm	122	122	145	130
Corpo (<i>Bulk</i>)⁹⁸, cm³.g⁻¹	1,54	1,49	1,90	1,72
Umidade⁹⁹, %	6,4	6,4	4,5	5,5
Porosidade (<i>Gurley</i>), s/100 ml	7,0	7,2	9,0	14,3
Resistência à tração, kN.m⁻¹	2,72	3,55	2,89	3,37
Índice de Tração⁹⁸, N.m.g⁻¹	34,32	43,44	37,99	44,51
Alongamento, %	3,8	4,6	8,0	8,5
Energia abs. na tração, J.m⁻²	76,4	117,3	162,3	200,3
Rigidez à Tração, kN.m⁻¹	290,0	355,4	213,4	248,2
Mód. de Elasticidade⁹⁸, GPa	2,37	2,92	1,47	1,90
Comprimento de Auto-Ruptura, km	3,50	4,43	3,87	4,54
Resistência ao Rasgo, gf	70,28	73,90	54,48	72,73
Rigidez (<i>Taber</i>), gf.cm	1,72	1,84	nd	1,61
Res. Estouro (<i>Mullen</i>), kPa	236,8	295,5	263,9	296,9
Higroexpansibilidade, %	0,363	0,359	nd	nd

nd = não disponível

As folhas produzidas com refiles da saída do formador e submetidas à secagem sem restrição ao encolhimento, também apresentaram maiores valores de corpo (*bulk*), porosidade, índice de tração, alongamento, energia absorvida na tração (*TEA*) e menores para a rigidez à tração (*tensile stiffness*), módulo de elasticidade, resistência ao rasgo e rigidez (*Taber*).

Os resultados obtidos para a higroexpansibilidade foram similares para as amostras da caixa de entrada e da saída do formador.

⁹⁸ Valores calculados. O “corpo” do papel de refere ao seu “volume específico aparente”.

⁹⁹ Valor medido após 30 minutos de condicionamento no ambiente do laboratório.

A Tabela IV.4 reúne os resultados obtidos nas medições de propriedades do papel, realizadas nas amostras tomadas ao longo da máquina, a partir da saída da 3ª prensa até a enroladeira.

Observa-se que o valor de higroexpansibilidade diminui a partir da 3ª prensa, em direção à enroladeira, embora com valores similares antes da prensa de colagem e antes da calandra. Observa-se, também, que estes valores são próximos ao obtidos com as folhas isotrópicas (ver dados da Tabela IV.3).

Na saída da 3ª prensa, a higroexpansibilidade medida na direção MD foi maior que na direção CD. O perfil desta propriedade na direção CD do papel mostra aumento da higroexpansibilidade após a prensa de colagem, característica não observada no perfil da direção MD. Não há diferença significativa antes e após a calandra.

O corpo do papel (*bulk*) apresenta diminuição, a partir do extremo úmido, em direção ao extremo seco da máquina, porém, sem variação significativa após a prensa de colagem.

Os valores obtidos para o índice de tração ao longo da máquina na direção MD são crescentes em direção ao extremo seco da máquina, enquanto que se mantêm aproximadamente constantes na direção CD, em todas as seções.

Os valores encontrados para o alongamento MD e CD, ao longo da máquina de papel são crescentes, a partir da 3ª prensa, em direção à enroladeira.

Tabela IV.4 - Resultados das medições efetuadas em amostras coletadas ao longo da máquina de papel – valores médios.

		Na	Antes	Após	Antes	Após	Após
		Enr.	Cal.	P.Cola	P.Cola	Sec.11	3ª Pr.
Gramatura, g.m⁻²		77,7	77,5	81,9	76,9	63,5	52,5
Espessura, µm		96	108	111	110	96	95
Corpo (<i>Bulk</i>)¹⁰⁰, cm³.g⁻¹		1,24	1,39	1,35	1,43	1,51	1,81
Umidade, %	coleta	3,9	3,9 ¹⁰¹	19,2	3,0	36,9	53,3
	0'	3,9	6,8	8,6	7,0	8,1	6,3
	30'	6,5	6,9	8,1	6,8	7,4	7,1
Porosidade (<i>Gurley</i>), s/100 ml		11,6	10,0	10,7	8,7	7,4	2,6
Resistência à Tração, kN.m⁻¹	MD	5,74	5,71	4,63	4,12	2,42	1,34
	CD	1,64	1,70	1,62	1,32	1,08	1,55
	MD/CD ¹⁰⁰	3,50	3,37	2,85	3,14	2,25	0,87
Índice de Tração¹⁰⁰, N.m.g⁻¹	MD	73,8	73,7	56,5	53,6	38,0	25,5
	CD	21,1	21,9	19,8	17,2	17,0	29,5
Alongamento, %	MD	2,6	2,6	2,8	2,1	4,7	8,5
	CD	8,5	8,7	8,3	6,5	10,3	6,4
Energia abs. na tração, J.m⁻²	MD	99,1	98,8	84,8	58,1	71,1	68,7
	CD	108,9	119,0	102,8	65,0	75,5	30,5
Rigidez à Tração, kN.m⁻¹	MD	619,3	591,7	449,8	438,8	115,9	39,5
	CD	136,5	162,4	106,5	95,4	42,7	34,4
	CD/MD ¹⁰⁰	4,54	3,64	4,22	4,60	2,72	1,15
Módulo de Elasticidade¹⁰⁰, GPa	MD	6,45	5,49	4,06	3,99	1,21	0,42
	CD	1,42	1,51	0,96	0,87	0,44	0,36
Comprimento de auto-ruptura, km	MD	7,53	7,51	5,76	5,46	3,88	2,60
	CD	2,11	2,24	2,02	1,75	1,73	1,55
Higroexpansibilidade, %	MD	0,151	0,266	0,269	0,260	0,581	1,059
	CD	0,736	0,761	0,904	0,705	1,107	0,957
	CD/MD ¹⁰⁰	4,35	2,81	3,33	2,69	1,91	0,90

¹⁰⁰ Valores calculados.

¹⁰¹ Assumido igual ao da enroladeira.

A Tabela IV.5 contém os resultados obtidos nas medições de propriedades do papel, realizadas nas amostras coletadas ao longo da direção transversal da enroladeira.

Observa-se que o valor da higroexpansibilidade na direção CD do papel varia transversalmente, apresentando valores menores na área central da folha e maiores na região das bordas (lado de comando e lado de acionamento da máquina de papel). Na direção MD o comportamento é diferente, mantendo-se aproximadamente constante em toda a largura do papel.

O corpo do papel (*bulk*) apresenta variação de um extremo ao outro e apresenta valores maiores na área central do papel e menores nas regiões das extremidades (lado de comando e lado de acionamento).

Nota-se que o valor de alongamento na direção CD do papel varia na direção transversal da máquina, apresentando valores menores na região central e maiores nas bordas (lado de comando e lado de acionamento). Na direção MD, esta propriedade tem outro formato, mantendo-se aproximadamente constante em toda a largura do papel.

Os valores encontrados para índice de tração na direção CD variam discretamente na direção transversal da máquina, apresentando valores maiores na região central e menores nas áreas das bordas (lado de comando e lado de acionamento da máquina de papel). Na direção MD mantém-se aproximadamente constante em toda a largura do papel.

Tabela IV.5 (continua) – Resultados das medições efetuadas em amostras coletadas na direção transversal da enroladeira (posições indicadas a partir do lado de comando da máquina de papel) – valores médios.

		Posição				
		1	2	3	4	5
Gramatura, g.m⁻²		77,7	77,5	77,4	77,1	77,2
Espessura, µm		96	97	98	99	100
Corpo (<i>bulk</i>)¹⁰², cm³.g⁻¹		1,24	1,26	1,25	1,27	1,30
Umidade¹⁰³, %	0'	3,9	3,6	3,6	3,8	4,0
	30'	6,5	7,0	6,8	6,6	7,3
Carga Mineral, %		17,9	18,2	18,1	17,9	18,0
Formação - índice, g.m⁻²		4,81	4,92	5,05	4,89	4,86
Formação, específica, g^{1/2}.m⁻¹		0,55	0,56	0,58	0,555	0,56
TSO, ° (grau)	MD	-5,20	-6,56	-3,40	-1,06	-1,88
TSI	MD/CD	3,34	3,18	3,11	3,03	2,86
Porosidade (<i>Gurley</i>) s/100ml		11,6	11,4	11,2	10,9	11,2
Aspereza (<i>Bendtsen</i>) ml.min⁻¹	LF	173	195	185	211	200
	LT	178	188	188	214	211
Resistência à Tração, kN.m⁻¹	MD	5,74	5,29	6,19	5,81	5,98
	CD	1,64	1,68	1,75	1,77	2,00
	MD/CD ¹⁰²	3,50	3,15	3,54	3,29	2,99
Índice de Tração¹⁰², N.m.g⁻¹	MD	73,84	68,31	80,01	75,30	77,50
	CD	21,12	21,72	22,59	22,89	25,90
Alongamento, %	MD	2,6	2,5	2,6	2,6	2,4
	CD	8,5	7,7	7,4	6,5	6,2
Energia abs. na tração, J.m⁻²	MD	99,1	87,8	107,8	101,3	96,3
	CD	108,9	100,8	99,8	88,5	96,5
Rigidez à tração, kN.m⁻¹	MD	619,3	596,9	638,8	628,0	651,9
	CD	136,5	148,8	159,2	162,3	188,0
Mód. de Elasticidade¹⁰², GPa	MD	6,45	6,09	6,59	6,41	6,52
	CD	1,42	1,52	1,64	1,66	1,88
Compr. Auto-Ruptura, km	MD	7,53	6,96	8,16	7,68	7,90
	CD	2,15	2,21	2,30	2,33	2,64
Resistência ao Rasgo, gf	MD	54,3	54,8	53,2	54,3	55,8
	CD	69,5	71,1	69,3	67,6	65,1
Rigidez (<i>Taber</i>), gf.cm	MD	2,05	2,05	2,17	2,11	2,17
	CD	0,64	0,67	0,73	0,73	0,80
Res. Estouro (<i>Mullen</i>), kPa		211,0	212,9	226,2	222,1	233,7
Higroexpansibilidade, %	MD	0,151	0,126	0,123	0,136	0,148
	CD	0,736	0,702	0,570	0,560	0,558

¹⁰² Valores calculados.

¹⁰³ Valores iniciais e após 30 minutos de condicionamento no ambiente do laboratório.

Tabela IV.5 (conclusão) – Resultados das medições efetuadas em amostras coletadas na direção transversal da enroladeira (posições indicadas a partir do lado de comando da máquina de papel) – valores médios.

		Posição				
		6	7	8	9	10
Gramatura, g.m⁻²		76,96	76,85	77,06	77,02	77,23
Espessura, µm		99	100	100	98	98
Corpo (<i>bulk</i>)¹⁰⁴, cm³.g⁻¹		1,29	1,29	1,30	1,27	1,24
Umidade¹⁰⁵, %	0'	3,8	3,5	3,4	3,4	3,3
	30'	7,4	7,3	7,0	7,2	7,1
Carga Mineral, %		17,9	18,3	18,5	18,7	18,5
Formação - índice, g.m⁻²		4,79	5,08	4,69	4,93	4,95
Formação, específica, g^{1/2}.m⁻¹		0,55	0,59	0,54	0,57	0,57
TSO, ° (grau)	MD	-1,48	-3,23	-2,62	1,60	-2,68
TSI	MD/CD	2,81	2,93	3,04	3,14	3,40
Porosidade (<i>Gurley</i>) s/100ml		10,6	11,16	11,24	10,80	12,04
Aspereza (<i>Bendtsen</i>) ml.min⁻¹	LF	206	205	203	204	235
	LT	199	210	209	205	222
Resistência à Tração, kN.m⁻¹	MD	5,50	5,73	5,47	5,67	5,66
	CD	1,87	1,84	1,93	1,70	1,56
	MD/CD ¹⁰⁴	2,94	3,12	2,84	3,33	3,62
Índice de Tração¹⁰⁴, N.m.g⁻¹	MD	72,6	74,6	71,0	73,6	73,3
	CD	24,6	23,9	25,0	22,1	20,3
Alongamento, %	MD	2,3	2,3	2,5	2,4	2,4
	CD	5,2	6,3	6,3	7,0	8,6
Energia abs. na tração, J.m⁻²	MD	85,9	89,2	90,9	93,5	92,1
	CD	75,0	89,1	94,2	91,7	103,9
Rigidez à tração, kN.m⁻¹	MD	648,8	649,4	625,1	618,5	628,7
	CD	175,7	167,9	182,7	151,0	131,3
Mód. de Elasticidade¹⁰⁴, GPa	MD	6,55	6,56	6,25	6,31	6,55
	CD	1,77	1,70	1,83	1,54	1,37
Compr. Auto-Ruptura, km	MD	7,29	7,60	7,24	7,50	7,47
	CD	2,48	2,44	2,55	2,25	2,07
Resistência ao Rasgo, gf	MD	52,6	53,9	56,4	55,3	55,7
	CD	65,6	66,1	65,9	68,7	66,0
Rigidez (<i>Taber</i>), gf.cm	MD	2,18	2,17	2,12	2,06	1,98
	CD	0,78	0,76	0,76	0,74	0,65
Res. Estouro (<i>Mullen</i>), kPa		241,7	218,3	210,4	200,7	204,3
Higroexpansibilidade, %	MD	0,135	0,134	0,124	0,134	0,144
	CD	0,456	0,510	0,544	0,660	0,700

¹⁰⁴ Valores calculados.

¹⁰⁵ Valores iniciais a após 30 minutos de condicionamento no ambiente do laboratório.

5 ANÁLISE DA HIGROEXPANSIBILIDADE DO PAPEL

A análise dos resultados obtidos nas medições de propriedades do papel, efetuadas nas amostras coletadas, tem os objetivos de discutir efeitos do processo de fabricação sobre a higroexpansibilidade e possíveis correlações entre ela e outras propriedades do papel.

5.1 Visualização de dados

Apresentam-se, a seguir, algumas técnicas para visualização de dados, utilizadas para a análise dos resultados de higroexpansibilidade.

5.1.1. Coordenadas paralelas

O método de visualização de dados através de coordenadas paralelas foi introduzido por Inselberg¹⁰⁶ [1985, apud Albazzaz; Wang, 2005] como recurso para a geometria computacional e, posteriormente, desenvolvido para outras aplicações por Inselberg *et al.* [1987], Inselberg [1998] e Inselberg [2002].

O método de coordenadas paralelas, bastante adequado para este trabalho, permite a visualização de dados multidimensionais em apresentações bidimensionais sem necessidade de cálculos adicionais, eliminando a limitação das representações no espaço euclidiano tridimensional.

Os pontos usados no espaço euclidiano são representados como uma série de linhas que passam através de eixos paralelos nas coordenadas paralelas, *i.e.*, cada variável é representada por um dos eixos paralelos. A Figura 5.1 mostra como uma sequência de pontos, representada em coordenadas cartesianas, é transformada em coordenadas paralelas.

¹⁰⁶ Inselberg, A. The plane with parallel coordinates. *The Visual Computer*, 1985

O método de coordenadas paralelas é especialmente útil para análise de processos iterativos, pois permite a seleção de um sub-conjunto das representações gráficas, a fim de destacar os dados de maior interesse.

Figura 5.1 Exemplo que ilustra a representação de uma sequência de pontos, transformada em coordenadas paralelas.

5.1.2. Matriz de Gráficos de Dispersão

O arranjo mostrado na Figura 5.2 refere-se a uma matriz de gráficos de dispersão, útil para estudar relações entre variáveis, duas a duas, ao mesmo tempo. Uma possibilidade interessante e prática é o uso de cores, uma vez que elas acrescentam uma dimensão adicional aos gráficos bidimensionais.

Figura 5.2 Matriz de gráficos de dispersão.

Um outro recurso, que também pode ser empregado nos gráficos de dispersão é a técnica de “coloração” (*brushing*), que permite ao analista, interagir como o programa de análise de dados. O exemplo mostrado na Figura 5.2 possui um retângulo sobre o gráfico localizado no canto superior esquerdo da matriz que, uma vez incluído, mostra, de modo automático, a mesma coloração para os mesmos pontos em todos os outros gráficos.

5.2 Discussão dos resultados

Cada operação envolvida no processo de fabricação, desde a refinação da pasta até o acabamento na máquina de papel, interfere no desenvolvimento das propriedades fundamentais da folha e, dentro de certos limites, influencia na consolidação da higroexpansibilidade do papel.

A operação de refinação da pasta celulósica desenvolve o potencial de ligação entre as fibras que formam a folha de papel. Na caixa de entrada e no formador, os componentes do papel que são distribuídos na folha, formam uma estrutura tri-dimensional e estabelecem o grau de orientação das fibras na direção longitudinal da máquina. A prensagem úmida altera a estrutura do papel. Nesta seção, a folha é compactada, importantes ligações interfibras se estabelecem, algumas partículas e fibras são redistribuídas internamente e propriedades superficiais da folha de papel são desenvolvidas.

A operação de secagem também constitui um processo de densificação do papel, durante o qual ocorrem alterações estruturais significativas na folha. Novas ligações entre as fibras de celulose são consolidadas, juntamente com a indução e distribuição de tensões internas na folha. Nesta seção, determina-se a umidade final do papel. O grau de liberdade para o encolhimento da folha tem forte influência em várias propriedades. A aplicação de amido superficial conduz o papel a um reumedecimento e secagem adicionais, submetendo a folha, novamente, a encolhimento e redistribuição de tensões internas de secagem. Finalmente, na calandra da máquina, a folha é prensada, a fim de se determinar sua espessura final e contribuir para a melhoria de características superficiais do papel.

A fabricação de papel se constitui, atualmente, em um processo dinâmico, multi-variável, não linear e altamente complexo. Muitos fenômenos presentes nas etapas de fabricação são determinísticos – podem ser explicados pela ciência clássica e até certo ponto, são previsíveis – porém as operações deste sistema tão complexo também são alvo de comportamentos caóticos, que não são facilmente explicáveis e previsíveis (por exemplo, o encolhimento diferencial encontrado em certas partes da folha de papel, que resulta em deformações irregulares, os quais induzem à formação de rugas e ondulações superficiais). Ordem e caos atuam em concerto para definir a estrutura final da folha, em cada bobina de papel [MacGregor, 2001].

A análise dos resultados de testes e ensaios, realizados com as amostras de papel, está apresentada, a seguir, com enfoque no comportamento da higroexpansibilidade ao longo da máquina do papel e transversalmente na enroladeira.

5.2.1 Higroexpansibilidade ao longo da máquina de papel

A Figura 5.3 mostra os resultados das medições de higroexpansibilidade realizadas ao longo da máquina de papel, em coordenadas paralelas.

Inicialmente, é importante recordar a metodologia utilizada, a fim de disponibilizar as amostras secas para medição das propriedades do papel. O processo de secagem de cada amostra tem características únicas, em função do ponto onde foi coletada.

As amostras representativas da caixa de entrada e formador foram tomadas com consistências de 0,9% e 21,6%, respectivamente. Após dissolução do material e homogeneização, foram formadas folhas laboratoriais, que secaram com restrição ao encolhimento, sobre placas metálicas, até a umidade de equilíbrio com o ambiente¹⁰⁷. As amostras da 3ª prensas foram coletadas com teor de umidade de 53,3% (teor seco de 46,7%) e secadas livremente sobre a bancada do laboratório, até atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente. As amostras do secador no. 11 foram coletadas com teor de umidade de 36,9% (teor seco de 63,1%) e secadas livremente sobre a bancada até atingir a umidade de equilíbrio. As amostras tomadas antes da prensa de cola foram coletadas com teor seco de máquina de 97% (teor de umidade de 3%). Após a

¹⁰⁷ Ver seção 3.3.2.

prensa de cola, as amostras foram coletadas com teor de umidade de 19,2% (teor seco de 80,8%) e secadas livremente até a umidade de equilíbrio. Antes da calandra e na enroladeira, as amostras foram coletadas com teor seco de máquina de 96,1% (teor de umidade de 3,9%). A Tabela IV.4 indica as umidades finais das amostras submetidas aos testes para medição das propriedades do papel.

Figura 5.3. Higroexpansibilidade medida ao longo da máquina de papel nas direções MD e CD, de acordo com a norma ISO 8226-1 [1994]. Os valores apresentados para a caixa de entrada e formador foram medidos em folhas manuais isotrópicas.

Na Figura 5.3, nota-se que, para a caixa de entrada e o formador, somente um resultado foi apresentado em cada posição, indicado pelas amostras CXA e FMR, que se refere às medições realizadas em folhas manuais isotrópicas, para as quais não se definem direções MD ou CD, uma vez que não possuem orientação predominante de fibras.

Nas demais posições, para as quais se realizaram testes e ensaios com folhas de papel da máquina industrial, já estruturadas, observa-se que a higroexpansibilidade é diferente nas direções MD e CD. Os valores encontrados na direção CD são maiores que na direção MD, com exceção daqueles medidos em amostra tomada após a 3ª prensa que, adversamente, apresentaram valores contrários ao esperado, ou seja, um valor de higroexpansibilidade na direção MD maior que na direção CD (indicados pelas amostras PSA-01 e PSA-02, respectivamente).

Devido à limitação de acesso à área compreendida entre a 4ª prensa e a seção de secagem da máquina de papel e, sobretudo, por questões de segurança pessoal, as amostras representativas da seção de prensagem, usadas para a análise, foram tomadas após a 3ª prensa úmida. Porém, nesta posição, o papel que se encontrava aderido ao rolo central foi destacado, por meio de uma raspa de limpeza, fato que provocou a formação de rugas e certo grau de crepagem na amostra, suficientes para tornar a medição da higroexpansibilidade sensivelmente instável (os resultados apresentaram grande desvio padrão).

Além do encolhimento resultante da secagem sem restrição à contração da folha, a crepagem da amostra produziu um encolhimento adicional no papel, responsável por um aumento extra na higroexpansibilidade, pois a crepagem tem efeito similar ao do encolhimento livre da folha [Guess; Wilson, 2001b]¹⁰⁸. Desta forma, relaciona-se o acréscimo no valor de higroexpansibilidade, na direção MD, ao encolhimento adicional e indesejado, provocado pela crepagem do papel. O mesmo efeito pode ser verificado no estudo desenvolvido por Nordman [1958] que mostra uma relação diretamente proporcional entre o encolhimento e a higroexpansão do papel¹⁰⁹. O efeito da crepagem na estrutura do papel pode ser comprovado, também, pela influência sobre o alongamento. O valor encontrado na direção MD é, aproximadamente, 33% superior ao da direção CD (ver dados na Tabela IV.4).

¹⁰⁸ De acordo com estes autores, o aumento do potencial de alongamento da folha tem efeito negativo sobre estabilidade dimensional do papel. Altos índices de encolhimento indicam baixa estabilidade dimensional.

¹⁰⁹ Ver seção 2.3.5.

A crepagem e a formação de rugas na amostra coletada após a 3ª prensa, certamente, influenciaram o resultado de higroexpansibilidade na direção CD. Uma destruição de ligações entre fibras, causada pela crepagem e enrugamentos provocados pelo raspador do rolo central da 3ª prensa, altera a transmissão de tensões entre fibras e a rede de fibras, diminuindo a higroexpansão na direção CD. Esperava-se, portanto, que a amostra PSA-02 apresentasse valor de higroexpansibilidade maior ou, pelo menos, superior ao da amostra SCA-02, expectativa reforçada pelo regime de secagem do papel, pois a amostra da 3ª prensa (PSA-02) teve pouca restrição ao encolhimento, já que foi secada livremente a partir do teor seco de 46,1%, enquanto a amostra do secador nº 11 (SCA-02) foi mantida com retenção durante a secagem nas primeiras baterias de secadores até o teor seco de 63,1%, antes da secagem livre fora da máquina.

A higroexpansibilidade mais elevada na direção transversal (CD) da folha de papel, observada nos pontos subseqüentes, resulta essencialmente da associação entre o grau de orientação das fibras predominantemente na direção longitudinal (MD) e a anisotropia da higroexpansão das fibras individuais, as quais se dilatam radialmente de 20 a 25 vezes mais que na direção axial [Galay, 1973 e Page; Tydeman, 1962 apud Uesaka, 1994]¹¹⁰. A orientação das fibras no papel analisado, com predominância na direção MD, foi claramente constatada pelos resultados das medições de *TSO* e pelas relações MD/CD de algumas propriedades medidas no papel. Os dados indicados na Tabela IV.5 mostram valores de *TSO* que variaram de $-6,56^\circ$ a $+1,60^\circ$, com valor médio igual a $-2,65^\circ$. A relação MD/CD da resistência à tração mostra valores de 2,84 a 3,62 com valor médio igual a 3,23. Outra confirmação para o alto grau de orientação de fibras na direção MD decorre dos resultados encontrados para o módulo de elasticidade do papel, cuja relação MD/CD variou de 3,47 a 4,79.

¹¹⁰ Ver seção 2.2.1.4.

Os pequenos ângulos de *TSO* e as relações MD/CD elevadas para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade resultam do alto grau de orientação de fibras na direção MD das amostras analisadas¹¹¹.

Os resultados de higroexpansibilidade mencionados acima concordam, também, com um trabalho de Uesaka [1994]¹¹², que constatou que a higroexpansão de folhas anisotrópicas (com orientação de fibras predominante na direção MD) havia sido maior na direção CD e que a diferença entre os valores CD e MD havia sido tanto mais acentuada quanto mais orientadas estivessem as fibras e quanto maior fosse a densidade da folha, após a operação de prensagem. É oportuno lembrar que o papel analisado foi submetido à prensagem de alta intensidade, durante o processo de fabricação (prensa de sapata na 3ª posição). Este tipo de prensa produz, potencialmente, folhas mais densas (com menos corpo) que as prensas de rolo convencionais e, assim, pode colaborar para acentuar a diferença entre a higroexpansão na direção CD e na direção MD.

A diminuição da higroexpansibilidade observada entre a prensa úmida e a prensa de cola (observada nas amostras SCA-01; SPA-01 na direção MD e SCA-02; SPA-02 na direção CD do papel) é resultante do efeito da operação de secagem e da restrição ao encolhimento imposto ao papel durante este processo. Retomando estudos apresentados por vários pesquisadores, entre os quais Nordman [1958]; Salmén *et al.*³⁴ [1987, apud Chance, 1991]; Nanri; Uesaka [1993] Juppi; Kaihovirta [2002]; Juppi; Kaihovirta [2003]; Fellers *et al.* [2003], os quais mostraram que a restrição ao encolhimento durante a secagem produz diminuição na higroexpansibilidade, encontra-se total coerência com o comportamento observado na máquina de papel. Primeiramente, a diferença entre os níveis de higroexpansibilidade, nas direções CD e MD, além do efeito da orientação e anisotropia higroexpansiva das fibras, se relaciona também com a intensidade da restrição ao encolhimento aplicada ao papel longitudinalmente e transversalmente na seção de secagem. Durante esta operação

¹¹¹ O valor do ângulo de *TSO* é inversamente proporcional à orientação de fibras. As relações MD/CD da resistência à tração e do módulo de elasticidade são diretamente proporcionais à orientação de fibras.

¹¹² Apresentado na seção 2.3.3.

em máquinas industriais convencionais¹¹³, o papel permanece bastante tensionado na direção MD, em particular nos passes entre os secadores, o que representa uma forte restrição ao encolhimento. Porém, na direção transversal da máquina, a folha se encontra parcialmente retida. Apesar de ser pressionada, por meio das telas secadoras, contra a superfície dos cilindros secadores, no percurso entre a saída de um secador e a entrada no secador subsequente (passe entre secadores), quase não há restrição à contração do papel na direção transversal, principalmente nas bordas da folha. Esta condição explica a diferença crescente de higroexpansibilidade entre as direções CD e MD ou a relação MD/CD decrescente em direção ao extremo seco da máquina, *cf.* mostram os dados da Tabela IV.5. O gradiente de diminuição da higroexpansibilidade na direção MD é maior que na direção CD, pois, na máquina de papel, a restrição ao encolhimento é maior na direção longitudinal.

Este mesmo mecanismo pode explicar as diferenças entre a higroexpansibilidade medida nas folhas manuais e nas amostras de papel da máquina. Como a secagem das folhas manuais se fez com restrição ao encolhimento, é coerente que os valores de higroexpansibilidade encontrados sejam baixos e inferiores aos valores das amostras dos estágios iniciais da máquina de papel (3ª prensa e secador no. 11). Na medida em que o papel é secado e submetido a tensões longitudinais e transversais, a higroexpansibilidade diminui, marcadamente, na direção MD que atinge valores inferiores aos das folhas laboratoriais, devido à maior tensão aplicada à folha nesta direção, até a secagem final do papel.

A aplicação de amido na prensa de cola também afeta a higroexpansibilidade, mais significativamente na direção CD, como sugere a comparação entre os resultados das medições nas amostras SPA-01; SPA-02 (antes da prensa de cola) e SPD-01; SPD-02 (após a prensa de cola). No processo de colagem, com aplicação total de $2,5 \text{ g.m}^2$ (peso seco) de amido na forma de solução aquosa com baixo teor de sólidos (em torno de 10%), uma quantidade aproximada de 22 g.m^{-2} de água na fase líquida é adicionada ao papel. Este re-umedecimento provoca uma alteração dimensional no papel, denominada expansão úmida ou hidroexpansão, cuja magnitude é superior à

¹¹³ Máquinas com cilindros secadores, aquecidos a vapor, dispostos em duas fileiras.

da higroexpansão [Galay, 1973]. Por outro lado, o umedecimento do papel na prensa de cola causa relaxamento nas tensões internas, criadas na operação de pré-secagem, as quais se contrapõem à expansão do papel. Desta forma, como o papel foi secado com restrição ao encolhimento, a contração produzida pela liberação das tensões de secagem atua em direção oposta à expansão provocada pelo aumento de umidade¹¹⁴. Espera-se, portanto, que nas direções MD e CD, os valores de higroexpansibilidade resultantes após a aplicação de amido sejam diferentes e que na direção CD, seja maior, em função das diferentes grandezas das tensões internas nestas direções. Esta expectativa se confirma pela observação desta propriedade nas amostras SPA-01; SPD-01 (direção MD) e SPA-02; SPD-02 (direção CD). A variação de higroexpansibilidade observada na direção MD é muito menor que a verificada na direção CD, pois, durante a secagem na máquina de papel, a restrição ao encolhimento é intensa na direção longitudinal e parcial na direção transversal.

A operação de colagem sugere, também, uma influência sobre a largura final da folha na enroladeira. Uma vez que a aplicação da solução de amido produz um considerável re-umedecimento da folha – no caso analisado, o teor de umidade da folha aumentou de 3%, na saída da pré-secagem, para o patamar de 19%, após a prensa de cola – a secagem subsequente produzirá uma contração maior que a expansão durante o re-umedecimento da folha, pois o grau de umidade atingido leva ao relaxamento das tensões internas produzidas na pré-secagem devido à restrição ao encolhimento na direção CD. Em outras palavras, embora se espere que a largura da folha na enroladeira seja igual à largura antes da prensa de cola, já que na pós-secagem apenas se remove a água adicionada durante a aplicação da solução de amido, o re-umedecimento e posterior secagem produzem um encolhimento maior que a hidroexpansão na prensa de cola :

$$L_{enr} = L_{apc} - \Delta L_{us} \quad (5.1)$$

onde:

¹¹⁴ Os autores indicam, também, que no caso de folhas de papel secadas livremente, a expansão úmida tem magnitude similar a do encolhimento de secagem.

L_{enr} largura da folha na enroladeira, mm

L_{apc} largura da folha antes da prensa de cola, mm

ΔL_{us} variação dimensional devido ao re-umedecimento e secagem, mm

O mecanismo descrito acima é endossado pelos dados obtidos nas medições da largura da folha nos dois pontos da máquina. A diferença (ΔL_{us}) de 19 mm ou 0,36% ($L_{enr} = 5278$ mm e $L_{apc} = 5297$ mm) se relaciona com a irreversibilidade do encolhimento do papel após o ciclo de umedecimento e secagem (ver Figura 5.4). Quando a umidade da folha, na enroladeira, retorna ao teor original (em torno de 3%, como antes da prensa de cola), o encolhimento irreversível se manifesta. Sua magnitude equivale ao encolhimento que o papel sofreria, na pré-secagem, se fosse secado livremente, na etapa de 80% a 97%¹¹⁵.

Figura 5.4. Higroexpansão vs. umidade do papel para folhas manuais secadas com restrição ao encolhimento. As amostras utilizadas são de papel produzido com pasta química sulfito não refinada [Uesaka; Moss; Nanri, 1991].

O potencial aumentado de encolhimento do papel, após a operação de colagem, foi também observado em estudos realizados por Lipponen *et al.* [2005] para verificar os efeitos da aplicação de amido sobre propriedades mecânicas e elásticas do papel. É conveniente observar ainda que, ao encolhimento adicional assumido após a prensa

de cola, na direção transversal da máquina, pode ser relacionado o incremento no valor de higroexpansibilidade na direção CD do papel, observado durante o processo de colagem. Novamente, lembrando Nordman [1958], que mostrou uma relação diretamente proporcional entre o encolhimento e a higroexpansão do papel, encontra-se aí mais um argumento para explicar o aumento da higroexpansibilidade na direção CD ocorrido após a prensa de cola.

Na seqüência da máquina, verifica-se uma diminuição da higroexpansibilidade na direção CD, enquanto que esta se mantém na direção MD até a saída da pós-secagem (marcada pela posição antes da calandra). A pouca variabilidade na direção MD se deve à secagem do papel sob tensão. Na direção CD, a higroexpansibilidade decrescente está associada a fatores apresentados anteriormente, principalmente no que se refere ao grau de orientação das fibras e sua anisotropia higroexpansiva, segundo o mesmo mecanismo verificado na pré-secagem.

A observação dos resultados obtidos com as amostras coletadas na bobina de papel da enroladeira (ENT-1A; ENT-1B) revela uma variação de higroexpansibilidade a partir da posição anterior à calandra (amostras SCD-01 e SCD-02 respectivamente). Na direção CD, a variação encontrada não foi significativa. Na direção MD, a diminuição da higroexpansibilidade, em torno de 43%, não deve ser atribuída a um efeito de calandragem, pois esta operação se realiza com baixa carga de calandragem (ver dados em Apêndice), o que não poderia produzir alterações expressivas na estrutura da folha. Sabe-se que o processo de enrolamento do papel se faz com alto nível de tensionamento da folha, a fim prover dureza e tensões internas adequadas para a correta estruturação da bobina jumbo. A grande tensão aplicada à folha no trajeto entre a calandra e a enroladeira, provavelmente, causa deformação (estiramento) da folha na direção longitudinal da máquina, que produz redução da higroexpansibilidade na direção MD do papel, pois se o papel é estendido quando contém alto teor de sólidos, a higroexpansão diminui linearmente com o aumento do estiramento [Kajanto; Niskanen, 1998].

¹¹⁵ Ver seção 2.2.1.3.

5.2.1.1 Outras propriedades ao longo da máquina

A Figura 5.5 mostra, em coordenadas paralelas, resultados de várias propriedades na direção MD do papel medidas ao longo da máquina, nos mesmos pontos indicados anteriormente para as medições de higroexpansibilidade.

Figura 5.5 Comparação entre propriedades na direção MD do papel, em posições ao longo da máquina. Os valores apresentados para a caixa de entrada e formador foram medidos em folhas laboratoriais isotrópicas.

Observe-se que os resultados das medições mostram que os valores das propriedades estão delimitados, superior e inferiormente, pelos pontos correspondentes à saída da 3ª prensa e à enroladeira (início e final das medições em amostras com propriedades anisotrópicas, resultantes das operações de fabricação do papel). Os destaques da

Figura 5.5, indicados por círculos, mostram a consolidação da higroexpansibilidade do papel após a operação de secagem.

O cruzamento das linhas do gráfico, entre as propriedades de corpo (*bulk*) e as propriedades de resistência e de elasticidade do papel, se justifica pela relação inversamente proporcional inerente a elas. Menores valores de corpo significam maiores níveis de compactação da folha e, conseqüentemente, maiores graus de interligação das fibras, que conferem mais resistência mecânica e menor elasticidade ao papel. De forma similar, ocorre cruzamento de linhas entre as propriedades de resistência e de elasticidade e a propriedade de alongamento o papel como esperado, pois, naturalmente, à maior resistência da folha corresponde um módulo maior de elasticidade e menor alongamento.

A Figura 5.6 ilustra uma comparação da higroexpansibilidade do papel com outras propriedades na direção MD, ao longo da máquina. Observa-se, por intuição, a possibilidade de inferir correlações entre a higroexpansibilidade e algumas outras propriedades na direção MD do papel. Exemplo disto é o corpo (*bulk*) e o alongamento do papel, de forma direta, e propriedades de resistência (*tensile stiffness* e índice de tração) de forma inversamente proporcional. Entretanto, convém notar que estas correlações não devem ser, de imediato, aceitas como verdadeiras, pois podem ser inadequadas em certas situações.

No caso do corpo do papel (*bulk*), os dados mostram a diminuição da propriedade em direção ao extremo seco da máquina, como se espera, dada a compactação da folha durante o processo de secagem. A diminuição da higroexpansibilidade MD na mesma região não deve ser associada à compactação da folha (diminuição de corpo), pois, ao contrário, ao aumento de densidade da folha corresponde, em geral, incrementos de higroexpansão do papel, causado pelo aumento no grau de ligação entre as fibras que a compõem que, desta forma, podem transferir com maior eficiência as deformações das fibras individuais para a rede de fibras que forma a folha de papel¹¹⁶. A análise de correlação entre corpo e higroexpansibilidade deve ser

¹¹⁶ Ver na Figura 2.14 [Uesaka, 1994] o aumento da higroexpansibilidade do papel decorrente do aumento da densidade de folhas anisotrópicas, em função do grau de orientação das fibras.

feita para cada posição, em particular, pois não representa uma tendência ao longo da máquina, uma vez que vários fatores que interferem na higroexpansão do papel variam ao longo da máquina.

Figura 5.6. Propriedades na direção MD do papel ao longo da máquina. Os valores apresentados para a caixa de entrada e formador foram medidos em folhas manuais isotrópicas.

A análise conjunta da variação do alongamento e das propriedades de resistência do papel na direção MD, mostra que o comportamento encontrado satisfaz as expectativas. A diminuição no valor do alongamento e simultâneo aumento de *tensile stiffness* e do índice de tração se devem à compactação da folha e à produção de

tensões internas residuais, resultantes do processo de secagem. O mesmo efeito se reflete em diminuição da higroexpansibilidade do papel (MD) na mesma região, *cf.* discutido anteriormente nesta seção. A correlação entre o alongamento e a higroexpansibilidade do papel será discutida na próxima seção deste trabalho.

5.2.2 Higroexpansibilidade na direção transversal da enroladeira

Os perfis de higroexpansibilidade do papel mostrados na Figura 5.7 representam resultados de medições realizadas em amostras procedentes de uma bobina jumbo, coletadas ao longo da direção transversal da folha, na enroladeira da máquina.

As tendências observadas nestes perfis podem ser analisadas em termos do efeito da contração da folha durante o processo de secagem (que está associada à configuração da seção de secadores da máquina de papel) e da correlação entre o encolhimento do papel e sua subsequente expansão resultante de um aumento no teor de umidade (estas propriedades se relacionam de forma diretamente proporcional)¹¹⁷.

Figura 5.7. Perfis de higroexpansibilidade nas direções MD e CD do papel, medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina.

5.2.2.1 Higroexpansibilidade do papel na direção CD

O perfil da variação de higroexpansibilidade na direção CD é resultante do encolhimento transversal da folha de papel durante o processo de secagem. Embora os passes abertos no extremo úmido da máquina produzam certa contração da folha, a remoção de água do papel, na seção de secagem, é responsável pela maior parte do encolhimento da folha.

As alterações dimensionais em cada fibra, nas direções radial e axial, decorrentes da variação do teor de umidade constituem a causa fundamental para a correspondente modificação nas dimensões da folha de papel. Durante a evaporação da água contida na folha de papel, as contrações das fibras individuais se transmitem para a folha de papel, através das ligações entre elas. Como discutido anteriormente¹¹⁸, a contração ou expansão das fibras de papel é altamente anisotrópica e significativamente maior na direção CD.

Uma vez que o papel analisado neste trabalho apresenta um alto grau de orientação de fibras na direção MD¹¹⁹ o encolhimento natural da folha é significativamente maior na direção CD, mesmo sob efeito de tensões transversais aplicadas ao papel na seção de secagem. A pressão exercida pelas telas secadoras tensionadas sobre o papel durante sua passagem alternada sobre os cilindros secadores oferece certa resistência ao encolhimento da folha. Porém, esta restrição é relaxada de forma cíclica, à medida que a folha percorre os passes entre os secadores, *cf.* ilustrado na Figura 5.8.

Durante a passagem da folha na região compreendida entre um cilindro secador e o subsequente resulta em encolhimento transversal maior nas áreas próximas às bordas da folha, região onde a retenção do papel é menor. Foi observado por Wedel [1989b] que o grau de encolhimento nas extremidades da folha é próximo ao do encolhimento natural (secagem livre) do papel. Na região central da máquina, a folha se encontra parcialmente retida pelas porções externas do papel, que se acham presas pelas telas

¹¹⁷ Esta correlação foi apresentada, inicialmente, por Nordman [1958] e posteriormente discutida por outros autores e pesquisadores [Galay, 1973; Wedel, 1989a; Chance, 1991; Pulkowsky, 1991].

¹¹⁸ Ver seção 2.2.1.4.

¹¹⁹ Discutido na seção 5.2.1.

secadoras, o que resulta em um encolhimento transversal menor, nesta área, que nas laterais da folha.

Figura 5.8. Restrição ao encolhimento devido à tensão aplicada pelas telas secadoras sobre a folha de papel [Wedel, 1989a].

Neste ponto, convém considerar a influência da configuração da seção de secadores da máquina de papel utilizada sobre o nível de tensão aplicada na direção transversal da máquina e o regime de encolhimento da folha nas seções de secagem. O papel analisado neste estudo foi fabricado em uma máquina industrial, cuja configuração da seção de secadores é híbrida. Na parte inicial da pré-secagem e da pós-secagem, os secadores estão dispostos em fileira única na posição superior com rolos de sucção a vácuo na posição inferior (Figura 5.9). Esta configuração possibilita que o papel seja suportado e retido pelas telas secadoras e pelos rolos de sucção a vácuo, durante aproximadamente 84% do percurso da folha nesta região. No restante da seção, os secadores distribuídos em duas fileiras (Figura 5.10) oferecem menor retenção para a folha, em torno de 58% do percurso entre os cilindros, pois é produzida somente pela ação das telas secadoras, [Pulkowski, 1991].

No presente caso, os grupos formados por fileira única de secadores contribuem pouco para evitar o encolhimento da folha, embora produzam grande retenção à contração transversal, pois se localizam apenas no início da seção de secadores,

região em que o potencial de contração do papel é baixo. O encolhimento passa a ser mais significativo quando o teor seco do papel atinge valores a partir de 60% [Wedel, 1989a].

Figura 5.9. Seção de secagem com cilindros secadores dispostos em fileira superior única com rolos de sucção a vácuo na parte inferior - abraçamento da folha pela tela secadores em torno de 221° [Pulkowski, 1990].

Figura 5.10. Seção de secagem convencional com cilindros secadores dispostos em duas fileiras - abraçamento da folha pela tela secadora em torno de 173° [Pulkowski, 1990].

Tendo em vista que, na saída do secador nº 11 (último cilindro dos grupos formados por fileira única de secadores) foi medido um teor seco em torno de 63%, é natural que o maior encolhimento, neste caso, ocorra nas baterias subseqüentes, formadas por fileiras duplas de secadores, onde a retenção da folha é menor. Adicionalmente, deve-se considerar que o controle de encolhimento da folha não é determinado somente pelo percurso em que a folha encontra-se retida, mas também pela quantidade de água evaporada enquanto sujeita à retenção. Nas seções de secagem do tipo fileira dupla (Figura 5.10), a maior parte da evaporação acontece fora da área da restrição ao encolhimento, nos passes entre os secadores, região em que a folha encontra-se livre. Desta forma, este arranjo de secadores, instalados a partir do ponto em que o teor seco do papel é superior a 60%, resulta em elevados índices de encolhimento da folha na direção CD.

Devido às condições de secagem discutidas nos parágrafos anteriores, o perfil de encolhimento da folha na enroladeira tem forma similar ao apresentado por Kiisknen; Paltakari; Pakarinen [2000]¹²⁰ e interfere sobre várias propriedades do papel, *cf.* discutido mais adiante. O encolhimento lateral da folha pode ser deduzido, também, por meio da observação do perfil transversal de corpo (*bulk*) do papel, mostrado na Figura 5.11 - os valores reduzidos nas bordas da folha indicam os pontos de maior contração e conseqüente densificação do papel.

O encolhimento da folha durante o processo de secagem tem efeito importante sobre várias propriedades do papel, sendo de primordial interesse a forma como afeta as propriedades elásticas e a estabilidade dimensional. O encolhimento irregular na direção transversal da máquina é, portanto, a causa principal das variações das propriedades do papel na direção CD. Vários estudos comprovaram a influência do encolhimento transversal da folha sobre o alongamento, o módulo de elasticidade, a resistência à tração, TEA e encanoamento e higroexpansibilidade, medidos na direção CD do papel¹²¹.

¹²⁰ Ver Figura 2.24.

¹²¹ Discutido na seção 2.4.1.

Figura 5.11. Perfil transversal de corpo (*bulk*) na enroladeira da máquina de papel.

O perfil de alongamento medido na direção CD (Figura 5.12) mostra a influência do encolhimento transversal do papel sobre esta propriedade – os maiores valores de alongamento foram encontrados para posições relativas às bordas da folha de papel.

De acordo com um estudo de Gates; Kenworth¹²² [1963, apud Gallay, 1973], existe uma correlação aproximadamente linear entre o alongamento e o encolhimento do papel, válida para as direções MD e CD da folha [Wedel, 1989b]. Desta forma, a medição do alongamento transversal do papel pode ser usada como indicação da magnitude e localização do encolhimento transversal da folha.

Ainda, lembrando o estudo de Nordman [1958]¹²³, no qual mostrou-se a existência de uma correlação entre o encolhimento e a higroexpansão da folha, pode-se, em função do exposto no parágrafo anterior, estabelecer uma relação, entre higroexpansibilidade e alongamento do papel, observada nos perfis similares encontrados para as direções MD e CD (Figuras 5.7 e 5.12), representada graficamente na Figura 5.13.

Figura 5.12. Perfis de alongamento nas direções MD e CD do papel, medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina.

Figura 5.13. Hígroexpansibilidade vs. alongamento do papel na direção CD.

5.2.2.2 Hígroexpansibilidade no papel na direção MD

Na direção MD, o encolhimento do papel durante a secagem é praticamente nulo, pois se encontra fortemente retido por meio do tensionamento longitudinal da folha

¹²² Ver seção 2.3.5.

¹²³ Ver seção 2.3.5.

nos passes entre as baterias de secagem e por meio do atrito entre ela e a superfície dos cilindros secadores.

Como resultado da operação de secagem sob forte tensão aplicada longitudinalmente sobre a folha de papel (ou seja, com restrição ao encolhimento), as tensões residuais resultantes determinam o baixo valor de higroexpansibilidade nesta direção. Uma vez que a tensão aplicada à folha apresenta certa uniformidade em todas as posições transversais da folha, o perfil de higroexpansibilidade é aproximadamente plano. Por consequência, o perfil transversal de outras propriedades na direção MD também apresentam característica uniforme – por exemplo, o alongamento (Figura 5.12) e o módulo de elasticidade (Figura 5.14).

Figura 5.14. Perfis do módulo de elasticidade nas direções MD e CD do papel, medidos ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina.

5.2.2.3 Outras propriedades na direção transversal da enroladeira

A razão MD/CD da resistência à tração também é afetada pelo encolhimento irregular do papel, *cf.* mostra a Figura 5.15.

Os valores mais altos encontrados nas bordas da folha se devem à diminuição da resistência à tração, na direção CD, nas posições laterais da folha onde o papel sofreu maior encolhimento, pois na direção MD esta propriedade se mantém relativamente constante (ver dados na Tabela IV.5).

Similarmente, o perfil de energia absorvida na tração (*TEA*) na direção CD (Figura 5.16) reflete a mesma forma geral em função do aumento do alongamento do papel nas bordas da folha, enquanto o perfil do módulo de elasticidade (Figura 5.14) apresenta o inverso, como esperado (nas bordas do papel ocorrem, simultaneamente, uma diminuição na resistência à tração e um aumento de alongamento na direção CD).

Figura 5.15. Perfil da razão de resistência à tração MD/CD ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina.

Figura 5.16. Perfil de *TEA* (direção CD) ao longo de posições transversais da folha, na enroladeira da máquina.

A Figura 5.17 corresponde a uma matriz de gráficos de dispersão, que foi usada para visualização de dados e análise de algumas propriedades na direção transversal da enroladeira e suas relações com a higroexpansibilidade do papel.

Figura 5.17. Matriz de gráficos de dispersão para propriedades transversais do papel medidas em amostras da enroladeira (direção CD do papel).

Além da correlação entre higroexpansibilidade e alongamento, mostrada na Figura 5.13 e discutida na seção anterior, a observação dos gráficos de dispersão acima revela algumas tendências associando a higroexpansibilidade com a razão MD/CD de resistência à tração (Figura 5.18) e com o encolhimento da folha, visualizada de forma indireta, por meio dos dados de corpo – a higroexpansibilidade apresenta uma relação inversamente proporcional ao corpo do papel (ver Figura 5.19).

Figura 5.18. Relação entre a hígroexpansibilidade do papel na direção CD e razão de resistência à tração MD/CD, na enroladeira.

Figura 5.19. Relação entre a hígroexpansibilidade na direção CD e corpo do papel, medidos na enroladeira da máquina.

6 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

A produção de papel em máquinas industriais está associada a um sistema multi-variável, não linear e bastante complexo. Cada operação envolvida no processo de fabricação, desde a refinação da pasta celulósica até o acabamento da folha, interfere na consolidação da higroexpansibilidade resultante no papel destinado ao usuário final.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de estudar fatores que interferem na higroexpansibilidade do papel. Estes estudos abordam aspectos específicos de cada um, de forma individualizada. Os trabalhos encontrados na literatura especializada discutem desde propriedades morfológicas das fibras celulósicas, até operações presentes nas máquinas de papel – podem ser citados, como exemplo, estudos que mostram os efeitos da orientação de fibras na folha (associada à seção de formação da máquina), efeitos da densificação da folha (associada à seção de prensagem úmida) e efeitos da evaporação da água contida na folha de papel após a prensagem úmida (associada à seção de secagem da máquina).

O presente trabalho apresenta em um único conjunto de dados, uma análise da variação da higroexpansibilidade ao longo do processo de fabricação do papel, mostrando resultados de medições realizadas em amostras coletadas simultaneamente em cada seção da máquina, a partir da caixa de entrada, até a enroladeira. Além de servir para corroborar as conclusões a respeito do efeito de certos fatores sobre a higroexpansibilidade do papel, obtidas anteriormente por diversos pesquisadores, apresenta o comportamento desta propriedade em função dos tratamentos da folha de papel envolvidos em cada seção da máquina. Os resultados das medições realizadas nas amostras coletadas ao longo da máquina revelam o efeito das operações da fabricação, das estratégias operacionais e da configuração das seções da máquina sobre a anisotropia da folha e suas implicações na consolidação da higroexpansibilidade do papel.

A análise dos resultados obtidos nas medições sugere que certas medidas para controle e minimização da higroexpansibilidade podem ser tomadas pelo fabricante de papel, a partir de práticas convencionais que compõem o processo de fabricação,

mesmo que tais medidas recaiam principalmente sobre o mecanismo de transferência de deformações das fibras celulósicas individuais para a estrutura de fibras interligadas que forma a folha de papel e não diretamente sobre a higroexpansibilidade inerente às paredes celulares das fibras celulósicas. O fabricante de papel poderá definir – entre alternativas disponíveis nos procedimentos de fabricação – ações que, mesmo sem alterar significativamente a natureza higroscópica das fibras, representem formas de interferir na consolidação da estrutura da folha e portanto, até certo limite, controlar a higroexpansibilidade do papel.

Dentre estes fatores, a orientação de fibras e a limitação da contração da folha na seção de secagem, em geral, representam os fatores de maior influência no resultado final da higroexpansibilidade do papel.

Na seção de formação, o ajuste das condições operacionais da caixa de entrada e do formador determina o grau de orientação de fibras, fator que afeta a diferença entre as propriedades do papel na direção MD e CD, *cf.* evidenciado nas amostras coletadas ao longo da máquina, cuja anisotropia de higroexpansibilidade é elevada (ver Figura 5.3). Deste fato, deduz-se que a associação entre a anisotropia intrínseca das fibras e o grau de orientação se torna um fator de controle da higroexpansibilidade na direção CD. Menores graus de orientação de fibras produzirão melhor estabilidade dimensional, devido à redução da higroexpansibilidade transversal da folha. Esta abordagem exige uma solução de compromisso entre necessidades operacionais da máquina e qualidade do papel, pois a orientação de fibras também exerce efeito sobre outras propriedades, principalmente, sobre a resistência da folha na direção MD, importante para a andabilidade (*runnability*) da máquina.

A operação de secagem apresenta interferências marcantes sobre a higroexpansibilidade do papel, pois, à medida que a folha percorre a seção de secadores, esta propriedade é afetada pelo grau de restrição ao encolhimento imposto ao papel durante o processo de secagem. Este fato revela a importância do controle sobre a aplicação de tensões longitudinais e transversais no papel, durante a secagem, como meio de interferir na característica de higroexpansão da folha. O ajuste dos

passes¹²⁴ entre as baterias de secadores atua sobre a tensão longitudinal aplicada ao papel e representa um meio de controle da propriedade na direção MD. A utilização de seções de secagem compostas por secadores dispostos em fileira única (*cf.* Figura 5.9) resultará em menores níveis de higroexpansibilidade na direção MD e principalmente na direção CD, resultantes da forte restrição ao encolhimento da folha durante a secagem (especialmente quando estão localizadas na região onde o encolhimento da folha é mais pronunciado, ou seja, a partir do ponto em que o papel apresenta teor seco superior a 60%). Como não representa um parâmetro ajustável durante a operação, a configuração da seção de secagem mais adequada poderá ser definida no projeto inicial da máquina de papel ou em projetos de reforma subseqüentes. Durante a operação, o fabricante de papel dispõe do controle da tensão da tela secadora como instrumento para pressionar a folha contra a superfície dos cilindros secadores e, desta forma, controlar a restrição ao encolhimento.

As medições realizadas nas amostras coletadas após a aplicação da solução de amido sobre a superfície da folha, na prensa de colagem, mostraram que, nesta seção o papel perde parte da tensão interna induzida na fase de pré-secagem, devido ao grande re-umedecimento da folha, o que aumenta o potencial de encolhimento na etapa de pós-secagem. Logo, intui-se que a aplicação de soluções de amido com teores de sólidos mais elevados poderá colaborar para a redução do potencial de encolhimento da folha durante a pós-secagem, já que o re-umedecimento do papel será em menor escala.

As medições realizadas na direção transversal da enroladeira também comprovam a grande influência da operação de secagem e da configuração da seção de secadores nos resultados do perfil de higroexpansibilidade do papel, pois mostram que seções de secadores dispostos em duas fileiras permitem grande encolhimento nas bordas da folha de papel e conseqüente aumento de higroexpansibilidade nesta região. Novamente, os resultados sugerem que seções de secagem formadas por fileira única de secadores oferecem maior retenção da folha na direção transversal da máquina e produzem uma diminuição significativa no nível e na uniformidade da higroexpansibilidade na direção CD do papel. O perfil de encolhimento transversal

¹²⁴ Diferenças de velocidade entre baterias de secadores.

também atinge outras propriedades do papel. Devido a este fato se estabelece uma relação diretamente proporcional entre a higroexpansibilidade e o alongamento e a razão MD/CD da resistência à tração (ver Figuras 5.13 e 5.18). De forma inversa, observa-se a relação entre higroexpansibilidade e corpo, *cf.* indicado na Figura 5.19.

Como a higroexpansibilidade do papel destinado ao uso final não é determinada somente por fatores externos, *i.e.*, não depende somente das operações que compõem o processo de fabricação, mas também de fatores internos encontrados nas fibras do papel, ou seja, da sua higroexpansibilidade intrínseca, indica-se, como sugestão, a realização de trabalhos adicionais para estudar de métodos de controle da característica higroscópica das fibras de eucalipto, de forma a estabilizar as paredes celulares das fibras, a fim de reduzir seu potencial de absorção de água. Outra sugestão para trabalhos futuros se refere ao desenvolvimento de metodologia apropriada à medição do encolhimento transversal real do papel reprográfico de fibras de eucalipto com a finalidade de estudar, de forma mais precisa correlações entre o estreitamento da folha na seção de secagem e as propriedades higroexpansivas do papel.

Finalmente, cabe ressaltar que o presente trabalho pode ser usado como referência de metodologia para o estudo do comportamento da higroexpansibilidade de outros tipos de papel ou para diferentes configurações de máquinas industriais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albazzaz, H.; Wang, X.Z. Historical data analysis based on plot of independent and parallel coordinates and statistical control limits. *Journal of Process Control*, vol.16, n.2, p.103-114, 2006. Disponível online em www.sciencedirect.com, acesso em 06.11.2005.
- Asensio, M.C.; Seyed-Yagoobi, J. Theoretical drying study of single-tier versus conventional two-tiered dryer configurations. *Tappi Journal*, vol.75, n.10, p. 203-211, Oct 1992.
- Back, E.L.; Klinga, L.O. Reactions in Dimensional Stabilization of Paper and Fibre Building Board by Heat Treatment. *Svensk Papperstidning*, vol. 66, n.19, p. 745-753, 1963.
- _____. The Effect of Heat Treatment on Internal Stresses and Permanent Dimensional Changes of Paper. *Tappi*, vol. 46, n.5, p. 284-288, May 1963.
- Borch, J. *Handbook of Physical Testing of Paper*. Vol.2. 2nd ed. CRC, 2001.
- Bortolin, G. *On Modelling and Estimation of Curl and Twist in Multi-ply Paperboard*. Licenciate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2002.
- Boström, B. How to Measure Dimensional Stability. *Paper Technology*. p.45-50, Nov. 2001.
- Callinan, T.D.; Crimi, J.S.; Schwartz, P.M.; Wirtz, L.H. The higoexpansivity of tabulating cards. *TAPPI*, vol.44, n.6, p.163A-171A, Jun 1961.
- Casey, J.P. *Pulp and Paper*. Wiley-Interscience; 1st edition, 1961.
- Caufield, D.F. Dimensional Stability of Paper: Papermaking Methods and Stabilization of Cell Walls. In: Suchsland, O., ed. *Wood science seminar 1: Stabilization of the wood cell wall*. Michigan State University, 1987, p. 87-98.
- Chance, L. Restrained Drying: Commercial Experience. p.1-6. *APPITA*, 1991.
- Chapman, J.; Kole, D.; Hellstrom, A. Papermaking with new online fibre orientation measurement. *Paper Technology*. p. 43-46. Apr 2000.
- Chatterjee, S.G.; Ramarao, B.V.; Tien, C. Water-Vapour Sorption Equilibria of a Bleached-Kraft Paperboard - A Study of the Hysteresis Region. *Journal of Pulp and Paper Science*, vol. 23, n.8, p. J366-J373, Aug 1997.
- Coffin, D.; Habeger, C.C.; The practical influence of heterogeneity on tensile accelerated creep in paper. *TAPPI Journal*, vol.84, n.3, p.59-59, Mar 2001.
- Constantino, R.P.A.; l'Anson, S.J.; Sampson, W.W. The Effect of Machine Conditions and Furnish Properties on Paper CD Shrinkage Profile. 13th. Fundamental Research Symposium, Cambridge, 2005, p. 283-306.

- Corson, S.R. Process impacts on mechanical pulp fibre and sheet dimensions. *Pulp and Paper Canada* 103(2)20-27 Feb 2002.
- Eklund, D. Dimensional stability of paper from different types of pulps. *Papper och trä*, n. 2, p. 153-161, 1969.
- Endres, I.; Engström, G. Influence of calendaring conditions on paper surface characteristics – a comparison between hard-nip, soft-nip, and extended soft-nip calendaring. *Tappi Journal*, vol. 4, n. 9, p. 9-14, Sep 2005.
- Fiadeiro, P.T.; Pereira, M.J.T.; Jesus, M.E.P.; Silvy, J.J. The surface measurement of fibre orientation anisotropy and misalignment angle by laser diffraction. *Journal of Pulp and Paper Science*, vol. 28, n.10, p.341-346, 2002.
- Fellers, C.; Panek, J.; Retuliainen, E.; Haraldsson, T. Condbelt drying and linerboard performance. *TAPPI International Paper Physics Conference*, 2003, p.143-150.
- Fernandes Diniz, J.M.B.; Gil, M.H.; Castro, J.A.A.M. Hornification - its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Science and Technology*. vol.37, n.6, p.489–494, April 2004.
- Fleischman, E.H.; Baum, G.A.; Habeger, C.C. A study of the elastic and dielectric anisotropy of paper. *Tappi Journal*. p.115-118, Oct 1992.
- Gallay, W. Stability of dimensions and forms of paper. *Tappi* 56(11)54-63; 56(12) 90-95. Nov, Dec, 1973.
- Gates, E.R.; Kenworthy, I.C. Effects of drying shrinkage and fibre orientation on some physical properties of paper. *Paper Technology*, vol.4, n.5, p.485-492, 1963.
- Gess, J.M.; Wilson, P.H. In: *Troubleshooting the Papermaking Process*. Tappi Press, Atlanta, 2001a.
- _____. Problems Related to Paper. In: *Troubleshooting the Papermaking Process*. Tappi Press, Atlanta, 2001b.
- Geankoplis, C.J. *Transport Processes and Unit Operations*, 3. ed.: Prentice Hall International, 1993, cap.9., p. 520-593: Drying of Process Materials.
- Haslach, H.W. The moisture and rate-dependent mechanical properties of paper: A review. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 4(3)169-210, 2000.
- Hoole, S.M.; I'Anson, S.J.; Ora, M.; Ashworth, T.N.; Briggs, D.; Phillips, B.; Hoyland, R.W. CD Shrinkage Profiles of Paper – Experiments on a Commercial Paper Machine. *Paper Technology*, vol.40. n.10, p. 63-70, Dec 1999.
- Huang, B.; Shah, S.L.; Kwok, K.E.; Zurcher, J. Performance assessment of multivariate control loops on a paper-machine headbox *Canadian J Chemical Engineers* 75(1)134-142 Feb 1997.
- Htun, M.; Ruvo, A. Correlation between the drying stress and the internal stress in paper. *TAPPI Journal*, vol. 61, n.6, p.75-77, 1978.

- Inselberg, A.; Chomut, T.; Reif, M. Convexity algorithms in parallel coordinates. *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol.34, p.765-801, 1987.
- Inselberg, A. Visual data mining with parallel coordinates. *Computational Statistics*, vol.13, p.47-63, 1998.
- _____. Visualization and data mining of high-dimensional data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol.60, n.1-2, p.147-159, 2002.
- Ivarsson, B.W. Introduction of Stress into a Paper Sheet During Drying. *TAPPI*, vol.37, n.12, p. 634-639, Dec 1954.
- Jayme, G. Properties of Wood Celluloses. II. Determination and Significance of Water Retention Value. *TAPPI*, vol.41, n.11, p.180A – 183A, Nov 1958.
- Juppi, K.; Kaihovirta, J. Paper Quality Control in a Dryer Section. 7th. International Conference on New Available Technologies, SPCI, Sweden, 2002, p. 55-59.
- _____. The effect of the dryer section on paper quality. *Pulp and Paper Canada*, vol.104, n.5, p. 58-61, 2003.
- Kajanto I.; Niskanen, K. Dimensional Stability. In: Niskanen, K. *Paper Physics*. Papermaking Science and Technology, Book 16. Finland, Fapet Oy, 1998, p. 223-259.
- Kato, K.L.; Cameron, R.E. A review of the relationship between thermally-accelerated ageing of paper and hornification. *Cellulose* vol.6, num.1, pp.23-40. March 1999.
- Ketoja, J.A.; Kananen, J.; Niskanen, K.J.; Tattari, H. Sorption and Web Expansion Mechanisms. 12th Fundamental Research Symposium, Oxford, Sep 2001, p.1357-1370.
- Kiiskenen H.; Paltakari, J.; Pakarinen P. Drying and paper quality. In: Karlsson, M. *Papermaking Part 2, Drying*. Papermaking Science and Technology, Book 9. Finland, Fapet Oy, 2000, p. 333-368.
- Klungness J.H, Sykes M.S., Tan F., Abubakr S., Eisenwasser J.D. Effect of fiber loading on paper properties *TAPPI J* 79(3) 297-301 Mar 1996.
- Kuan, G.S.S.; Benazzi, R.C.; Bergman, S. Matérias-Primas. In: Philip, P.; D’Almeida, M.L.O. *Celulose e Papel Vol II, Tecnologia de Fabricação do Papel*, São Paulo, SENAI/IPT, 2 ed., 1988, p. 561-581.
- Kwok, K.E.; Li, P. MD-CD interaction modeling and control of paper machines *Canadian J Chemical Engineers* 75(1)1 143-151 Feb 1997.
- Lavrykov, S.; Lyne, O.L.; Ramarao, B.V. A Mathematical Model for the Transient Higrexpansion of Copy Paper. International Paper Physics Conference, 2003, p. 273- 276.
- _____. The planar transient hygroexpansion of copy paper: Experiments and analysis. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 19(2)183-190 2004.

- Levlin, J.E. General physical properties of paper and board. In: Gullichsen, J.; Paulapuro, H. *Pulp and Paper Testing*. Papermaking Science and Technology, CD ROM collection, Book 17. Finland, Fapet Oy, 2000.
- Lif, J.O.; Fellers, C.; Söremark, C.; Sjö Dahl, M. Characterizing the In-Plane Hygroexpansivity of Paper by Electronic Epeckle Photography. *Journal of Pulp and Paper Science*, vol. 21, n. 9, p. J302-J309, 1995.
- Lindblad, G. Fürst, T. *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. 1st. Edition. Lorentz & Wettre, Sweeden, 2001.
- Lindem, P.E. An Instrument to assess thee biaxial stress during paper drying. *Tappi Journal*, vol.77. n.5, 1994, p.169-173.
- Lipponen, J.; Pakarinen, J.; Jääskeläinen, J; Grön, J. Mechanical properties of woodfree paper sheets at different surface size starch amounts. *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, p. 1-6, 2005.
- Loewen, S.R. Fibre Orientation optimization. *Pulp and Paper Canada*, vol.98. n.10. p. 67-91, 1997.
- Lu. L.; Carlsson. L.A. Influence of Initial Deflections on Curl of Paper. *Journal of Pulp and Paper Science* 27(11)373-178 nov 2001
- Lu. L.; Carlsson. L.A.; Andersson, Y. Micromodels of paper. Part 1, *TAPPI Journal*, 78(12)155-164, Dec 1995.
- Lu. L.; Carlsson. L.A. Micromodels of paper. Part 2 *TAPPI Journal* 79(1)203-210, Jan 1996.
- Lu. L.; Carlsson. L.A.; Ruvo, A. Micromodels of paper. Part 3 *TAPPI J* 79(2)197-205 Feb 1996.
- Lyne, A.L.; Fellers, C.; Kolseth, P. The effect of filler on hygroexpansivity. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, n.3, p.152-156, 1996.
- MacGregor, M.A.; Conners, T.E. MD microstriation in paper: two-sided shrinkage phenomena? *Tappi Journal*, vol.74, n.4, p.177-181, Apr 1989.
- MacGregor, M.A. Some impacts of paper making on paper structure. *Paper Technology*, p. 30-44, Apr 2001.
- Mäkelä, P. Analysis of the paper web during its passage through the drying section. *TAPPI International Paper Physics Conference*, 2003, p. 151-155.
- Mark, R.E. *Handbook of Physical Testing of Paper*. Vol.1. CRC, 2001.
- Mujumdar, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. 2nd. Edition. Marcel Dekker. New York, 1995.
- Nanko, H.; Ohsawa, J. Scanning Laser Microscopy of the Drying Process of Wet Web. *Journal of Pulp and Paper Science*, vol.16, n.1, p.J6-J12, 1990.

- Nanko, H.; Asano, S.; Ohsawa, J. Shrinking Behavior of Pulp Fibers During Drying. *TAPPI International Paper Physics Conference* (Kona, HI) Proc. (Book 2), p. 365-374, 1991.
- Nanko, H.; Tada, Y. Mechanism of hygroexpansion of paper. *International Paper Physics Conference*. p.159-171. CPPA and TAPPI Proc. 1995.
- Nanko, H.; Wu, J. Mechanism of paper shrinkage during drying. *International Paper Physics Conference*. p.103-113. CPPA and TAPPI Proc. 1995.
- Nanri, Y.; Uesaka, T. Dimensional stability of mechanical pulps - drying shrinkage and hygroexpansivity. *Tappi* 76(6) 62-66 Jun 1993.
- Nilsson, P.; Larsson, K. O. Paper Web Performance in a Press Nip. *Pulp and Paper Canada* 69(24)T-438 Dec 1968.
- Niskanen, K. *Paper Physics*. Papermaking Science and Technology Series vol. 16. Finnish Paper Engineer's Association. Fapet Oy. Finland. 1998.
- Nissan, A.H.; Batten, G.L. The link between the molecular and structural theories of paper elasticity *TAPPI J* 80 (4)153-158 Apr 1997.
- Nissinen, A.I.; Shakespeare, J.; Kuusisto, R.; Huhtelin, T. Performance improvements through combined process and control modifications. *Pulp and Paper Canada* 102(8)40-43 Aug 2001.
- Nordman, L.S. Laboratory Investigations into the Dimensional Stability of Paper. *Tappi* 41(1)23-30 Jan 1958.
- Nordstrom, A.; Gudmundson, P.; Carlsson, L.A. Influence of sheet dimensions on curl of paper. *Journal of Pulp and Paper Science*, 24(1)18-25, Jan 1998.
- Nordstrom, A.; Carlsson, L.A.; Hagglund, J.E. Measuring curl of thin papers. *TAPPI Journal*, vol.80, n.1, p.238-244, Jan 1997.
- Odel, M.H.; Pakarinen P. The Complety Fibre Orientation Control and Effects on Diverse Paper Properties. *TAPPI Papermakers Conference Proceedings*, 2001.
- Östlund, M. et al. Residual Stress in Paperboard and the Influence of Drying Conditions. *PAPTAC International Paper Physics Conference*, Canada, 2003, p. 165-168.
- Paik, K.H.; Nam, W.S. Cockle Depending on Drying Conditions and Local Basis Weight Distribution *Journal of Pulp and Paper Science* 27(5)177-181 May 2001.
- Palazzolo, S. No draw drying. *TAPPI*, p.225-228. Sep 1990.
- Pauku, J.; Parola, M. Measurement Method and Analysis of Dinamic Dimensional Stability of Paper Web. 56th. Annual Technical Conference, TAGA, USA, 2004.
- Phillips, B.R.; l'Anson, S.J.; Hoole, S.M. CD shrinkage profiles of paper - curve fitting and quantitative analysis. *APPITA J.* 55(3)235- May 2002.
- Prahl, J.M. *Thermodynamics of paper fiber and water mixtures*. PhD Thesis Harvard Univ. Cambridge MA 1968 (citado em Kajanto; Niskanen, 1998).

- Provatas, N.; Uesaka, T. Modeling paper structure and paper-press interactions. *Journal of Pulp and Paper Science* 29(10)333-340 Oct 2003.
- Pulkowski, J.H. Operating results with the Bel-Champ single tier dryer. *TAPPI Proceedings, Engineering Conference*, p.393-398. 1990.
- _____. Restraint drying with the Bel-Champ single tier dryer. *CPPA Annual Meeting*, Montreal, Canada, 1991.
- Rance, H.F. Effect of water removal on sheet properties. *TAPPI* 37(12)640-654 Dec 1954.
- Saliklis, E.P.; Kuskowski, S.J. Constitutive modeling of paper accounting for rate of load and transient relative humidity effects. *TAPPI J* 81(2)181-188 Feb 1998.
- Skowronski, J.; Robertson, A.A. The deformation properties of paper: tensile strain and recovery. *Journal of Pulp and Paper Science* 12(1)J20-J25 Jan 1986.
- Scott, W.E.; Abott, J.C.; Trosset, S. *Properties of papers: An introduction*. Tappi Press. 1995.
- Shands, J.A.; Genco, J.M. Cross machine variations of paper curl on a twin wire machine. *TAPPI J* 71(9)165-169 Sep 1988.
- Sims, D.N.; Grunder, T.K. Enhanced runnability and improved sheet properties with a single-tier dryer section. *Tappi Engineering Conference*, p. 313-319. 1991.
- Setterholm, V.C.; Chilson, W.A. Drying restraint – Its Effect on the Tensile Properties of 15 Different Pulps. *TAPPI Journal*, 48(11)634-640, Nov 1965.
- Setterholm, V.; Kuenzi, E.W. Fiber Orientation and Degree of Restraint During Drying - Effect on Tensile Anisotropy of Paper Handsheets. *TAPPI* 53 (10): 1915-1920, Oct 1970.
- Thorpe, J.; Choi, D. Roll Cockle - Following Its Evolution *TAPPI J* 74 (5): 204-208 MAY 1991.
- Timofeev, O.; Keranen, J.; Kiiskinen, H. Paper curl induced by drying. *Pulp and Paper Canada* 103(8)25-28 Aug 2002.
- Uesaka, T. Dimensional stability of paper - upgrading paper performance in end use. *Journal of Pulp and Paper Science* 17(2)J39-J46 Mar 1991.
- _____. General formula for hygroexpansion of paper. *Journal of Materials Science* 29(9)2373-2377 May 1, 1994.
- Uesaka, T.; Kodaka, I.; Okushima, S.; Fukuchi, R. History-dependent dimensional stability of paper. *Rheologica Acta* 28(3) 238-245 May-Jun 1989.
- Uesaka, T.; Moss, S.; Nanri, Y. The characterization of hygroexpansivity of paper. *Tappi Proceedings. International Paper Physics Conference*, p.613-622, 1991 and *Journal of Pulp and Paper Science* 18(1) J11-J16 Jan 1992.
- Uesaka, T.; Qi, D. Hygroexpansivity of paper - effects of fiber-to-fiber bonding. *Journal of Pulp and Paper Science* 20(6) J175-J179 Jun 1994.

- Uesaka, T.; Moss, C. Effects of fiber morphology on hygroexpansivity of paper – a micromechanics approach. In: *The Fundamentals of Papermaking Materials*, vol.1, PIRA International, Surrey 1997, p.663-679.
- Viitaharju, P.H.; Niskanen, K.J. Chiral curl in thin papers. *Journal of Pulp and Paper Science* 20(5)J148-J152 May 1994.
- _____. Dried shrinkage profiles of paper webs. *TAPPI J* 76(8)129-134. Aug 1993.
- Wahlström, T.; Adolfsson, K.; Östlund, S.; Fellers, C. Numerical modeling of the cross direction shrinkage profile in a dryer section, a first approach. *TAPPI International Paper Physics Conference*, 1999.
- Wahlström, T.; Fellers, C. Biaxial straining of paper during drying, relations between stresses, strains and properties. *Tappi Engineering Conference*, 1999.
- _____. Biaxial straining of handsheets during drying - effects on in-plane mechanical properties. *TAPPI Journal*, vol.83, n.8, p.1-8, 2000.
- Wahlström, T. Influence of shrinkage and stretch during drying on paper properties. *Paper Technology*. p. 39-46. Jul 2000.
- Wahlström, T.; Fellers, C.; Htun, M. A laboratory method for biaxial straining of paper during drying. *TAPPI Journal Peer Reviewed Paper*, 2000.
- Wedel, G.L. No draw drying restraint. *Tappi Journal*, p.93-97, April 1989a.
- _____. Drying Restraint in a Single-Tier Dryer Section. *Tappi Proceedings, Annual Meeting*, 1989b.
- Wedel, G.L.; Palazzolo, S. Advances in dryer section runnability. *TAPPI* pp.65-69. Sep 1987
- Weise, U. *Characterization and mechanisms of changes in wood pulp fibers caused by water removal*. PhD Thesis Helsinki University Technology, Helsinki, Finland 1997.
- Wexler, A. Humidity standards. *TAPPI* 44(6)180A-191A. Jun 1961.
- Wink, W.A. The effect of relative humidity and temperature on paper properties. *TAPPI* 44(6):171A-180A. Jun 1961.
- Zauscher, S.; Caulfield, D.F.; Nissan, A.H. The influence of water on the elastic modulus of paper .1. Extension of the H-bond theory. *TAPPI J* 79(12):178-182 Dec 1996.
- _____. The influence of water on the elastic modulus of paper .2. Verification of predictions of the H-bond theory. *TAPPI J* 80 (1):214-223 Jan 1997.

APÊNDICE

Condições de Operação da Máquina de Papel

Os dados, a seguir, representam as condições de operação da máquina de papel no momento da coleta de amostras para realização do presente estudo, registrados no sistema digital de controle.¹²⁵

Data: 03.06.2004 / 08:25 h

Massa de papel

Composição nominal:	48 % massa refinada
	21 % massa recuperada
	12 % refugo próprio
	19 % carga mineral
Refinação:	410 CSF ¹²⁶

Velocidade da máquina

Telas formadoras:	1202 m.min. ⁻¹
Enroladeira:	1256 m.min. ⁻¹

Gramatura do papel

Enroladeira:	76,4 g.m ⁻²
--------------	------------------------

Umidade do papel

Antes da prensa de colagem:	3,0 %
Enroladeira:	3,4 %

Espessura do papel

Enroladeira:	86 µm
--------------	-------

Largura do papel¹²⁷

Saída da prensa:	5.600 mm
Saída da pré-secagem:	5.297 mm
Enroladeira:	5.278 mm

¹²⁵ Honeywell, modelo PHD.

¹²⁶ Canadian Standard Freness.

¹²⁷ Medição manual

Caixa de entrada

Razão Jato/Tela ¹²⁸ :	1,02
Consistência da massa:	0,94 %
pH da massa:	8,0
Abertura do lábio:	11,8 mm
Pressão:	2,3 bar

Formador

Vácuo / rolo formador:	-0,620 mca
Vácuo / rolo couch:	-4,5 bar (1 ^a . zona); -6,7 bar (2 ^a . zona)
Vácuo / Caixa D:	1 ^a . zona -1,1 mca
	2 ^a . zona -2,0 mca
	3 ^a zona -2,9 mca
	skimmer -0,25 bar
Caixa de alto vácuo:	-4,6 bar
Altura da caixa “D”:	16,2 mm
Pressão lâminas desaguadoras:	1 ^a 1,5 bar; 2 ^a 1,8 bar
	3 ^a 2,1 bar; 4 ^a 2,5 bar
Tensão nas telas formadoras:	8.8 kN/m

Prensas

Carga linear:	1 ^a prensa	70 kN.m ⁻¹
	2 ^a prensa	90 kN.m ⁻¹
	3 ^a prensa	690 kN.m ⁻¹
	4 ^a prensa	55 kN.m ⁻¹
Vácuo / rolo sucção:	1 ^a zona	-6,0 mca
	2 ^a zona	-3,5 mca
Vácuo / caixas sucção dos feltros:		-5,0 mca
Tensão nos feltros:		4,0 kN.m ⁻¹

¹²⁸ Razão entre a velocidade do jato de massa na saída da caixa de entrada e a velocidade das telas do formador.

Secadores

Pressão de vapor:

pré-secagem	Sec. 1	fechado
	Sec. 2	-1,0 bar
	Sec. 3	-0,3 bar
	Sec. 4,5	-0,2 bar
	Sec. 6,7 e 8-11	+0,1 bar
	Sec. 12-19	+0,3 bar
	Sec. 20-37	+2,7 bar
pós-secagem	Sec. 38	0 bar
	Sec. 39	0 bar
	Sec. 40	+0,4 bar
	Sec. 41-51	0,9 bar
	Sec. 42-52	2,4 bar

Tensão nas telas secadoras:

1º e 7º grupos	4,5 – 5,0 kN.m ⁻¹
demais grupos	2,7 – 3,2 kN.m ⁻¹

Prensa de Colagem

Solução de amido:	temperatura	50 °C
	viscosidade	50 cps
	concentração	9,8 %
	aplicação	32,7 kg.ton ⁻¹
Pressão de carga:	lado comando	5,5 bar
	lado acionamento	6,0 bar

Calandra

Pressão de carga:	lado comando	29,5 bar
	lado acionamento	29,5 bar
Pressão linear:		18,2 kN.m ⁻¹

Enroladeira

Pressão alavancas:	lado comando	25 bar
	lado acionamento	26 bar

Vestimentas

Formador:	posição superior	tela tripla, 480 g.m ⁻² , 372 cfm.ft ⁻²
	posição inferior	tela tripla, 450 g.m ⁻² , 376 cfm.ft ⁻²
Prensas:	rolo <i>pick-up</i>	feltro 2+1, 1849 g.m ⁻² , 60 cfm.ft ⁻²
	1ª prensa	feltro 1+1, 1275 g.m ⁻² , 61 cfm.ft ⁻²
	2ª e 3ª prensas	feltro 2+1, 1554 g.m ⁻² , 42 cfm.ft ⁻²
	4ª prensa	feltro 2+1
	prensa sapata	manta ranhurada
Secadores:	1º grupo	tela secadora, 1100 g.m ⁻² , 120 cfm.ft ⁻²
	2º grupo	tela secadora, 1100 g.m ⁻² , 150 cfm.ft ⁻²
	3º grupo	tela secadora, 1100 g.m ⁻² , 130 cfm.ft ⁻²
	4º grupo superior	tela secadora, 1787 g.m ⁻² , 250 cfm.ft ⁻²
	4º grupo inferior	tela secadora, 1785 g.m ⁻² , 200 cfm.ft ⁻²
	5º grupo superior	tela secadora, 1756 g.m ⁻² , 300 cfm.ft ⁻²
	5º grupo inferior	tela secadora, 1746 g.m ⁻² , 300 cfm.ft ⁻²
	6º grupo superior	tela secadora, 1756 g.m ⁻² , 350 cfm.ft ⁻²
	6º grupo inferior	tela secadora, 1800 g.m ⁻² , 350 cfm.ft ⁻²
	7º grupo	tela secadora, 1100 g.m ⁻² , 120 cfm.ft ⁻²
	8º grupo superior	tela secadora, 1700 g.m ⁻² , 290 cfm.ft ⁻²
	8º grupo inferior	tela secadora, 1700 g.m ⁻² , 290 cfm.ft ⁻²

SOBRE O AUTOR

Afonso Henrique T. Mendes, graduado pela Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, desempenha atividades técnicas no setor de Papel e Celulose desde 1981, como profissional de engenharia, dedicando-se, inicialmente, ao projeto e à operação de máquinas de papel e seus sistemas auxiliares.

O confronto com problemas operacionais em diversas seções da máquina e seus efeitos sobre as propriedades que interferem na qualidade do papel demandaram a busca do conhecimento de processos e o acompanhamento do desenvolvimento das máquinas papeleiras e equipamentos periféricos, sempre focados na melhoria da qualidade do produto.

O interesse por temas ligados à estabilidade dimensional do papel teve origem na necessidade de aumentar o conhecimento sobre os efeitos da operação de secagem nas propriedades do papel, visto que, nesta seção da máquina, é forte a manifestação de efeitos indesejáveis da higroexpansibilidade, tais como o encolhimento da folha e a produção de outros defeitos.

O autor encontra-se atualmente dedicado a atividades de docência, em cursos ligados à produção de papel, e à consultoria de empresas. Conhecer os mecanismos e encontrar caminhos para o controle da higroexpansibilidade do papel destinado ao uso final ou às operações de conversão tornaram-se o principal elemento motivador para a realização desta dissertação de mestrado.

Com o presente trabalho, colabora-se com o setor de Papel e Celulose, por meio da apresentação de aspectos que ajudam na identificação e entendimento das interferências das operações envolvidas na fabricação de papel reprográfico, a partir de fibras de eucalipto, sobre a higroexpansibilidade do produto destinado ao uso final.