

RODRIGO GUEDES DE MORAES

**SECAGEM POR RADIAÇÕES MICROONDAS E SEUS
EFEITOS NAS PROPRIEDADES DE PAPÉIS RECICLADOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2004

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M827s
2004

Moraes, Rodrigo Guedes de, 1976-

Secagem por radiações microondas e seus efeitos nas propriedades de papéis reciclados / Rodrigo Guedes de Moraes. – Viçosa : UFV, 2004.
xi, 78f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Rubens Chaves de Oliveira
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 68-72.

1. Papel - Secagem. 2. Papel - Propriedades - Efeito da radiação. 3. Resíduos de papel - Reaproveitamento. 4. Celulose - Refinação. 5. Secadores microondas. 6. Ultrason. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 20.ed. 634.98612

RODRIGO GUEDES DE MORAES

**SECAGEM POR RADIAÇÕES MICROONDAS E SEUS
EFEITOS NAS PROPRIEDADES DE PAPÉIS RECICLADOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

Aprovada: 8 de março de 2004

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Conselheiro)

Prof. Luis Henrique Mendes da Silva
(Conselheiro)

Prof. José Lívio Gomide

Prof. Cláudio Mudado Silva

Prof. Rubens Chaves de Oliveira
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais Ilca Helena e José Guedes.

Aos meus avôs Izaura e Rômulo (in memoriam).

Aos meus Irmãos Priscila e Rafael.

AGRADECIMENTO

Ao professor Rubens Chaves de Oliveira, por todo o conhecimento transmitido, pelos inúmeros incentivos, e principalmente, pela amizade.

Aos professores José Lívio Gomide, Jorge Luiz Colodette e Cláudio Mudado Silva pelos valiosos ensinamentos e auxílios concedidos.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores, Eldo Antônio Monteiro da Silva, Luis Henrique Mendes da Silva e Hélio Garcia Leite, pelas contribuições prestadas.

Aos colegas e funcionários do Laboratório de Celulose e Papel, pela convivência de amizade. Como também a funcionária do Departamento de Fitopatologia Cláudia Vanetti, pela sua disponibilidade profissional.

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

BIOGRAFIA

RODRIGO GUEDES DE MORAES, filho de José Guedes de Moraes e Ilca Helena de Araújo Guedes, nasceu em 2 de junho de 1976, na cidade de Vila Velha - Espírito Santo.

Concluiu o curso de segundo grau - técnico em processamento de dados no Centro Capixaba de Informática, na cidade de Vitória - ES, em dezembro de 1995.

Em março de 1996, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, no curso de Engenharia Florestal, formando-se em março de 2001.

Em agosto de 2001, ingressou no curso de Pós-graduação em Ciência Florestal em nível de mestrado, na área de Tecnologia de Celulose e Papel, pela Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Radiações microondas	3
2.1.1. Aquecimento através de radiações microondas	4
2.1.2. Geração de radiações microondas	6
2.1.3. Mecanismo de aquecimento dielétrico	7
2.1.3.1. Influência das propriedades dielétricas na secagem dos papéis.....	8
2.1.4. Controle do perfil de umidade do papel através da secagem por radiações microondas.....	9
2.1.5. Influência da secagem por radiações microondas nas propriedades dos papéis.....	10
2.1.6. Desenvolvimento dos equipamentos de secagem de papel por radiações microondas.....	10
2.2. Secagem convencional de papéis.	12
2.3. Diferenças entre secagem convencional e secagem por radiações microondas.	13

2.4. Atividade de refino da polpa de celulose através da aplicação de ultra-som.	15
2.5. Influência do processo de reciclagem na qualidade do papel..	17
2.6. Propriedades das fibras.....	19
2.6.1. Índice de retenção de água das fibras (WRV)..	19
2.6.2. Propriedades dimensionais das fibras.....	20
2.6.3. Propriedades do material fibroso.....	20
2.6.4. Teor de carboidratos do material fibroso.....	21
2.7. Propriedades dos papéis.....	22
2.7.1. Índice de tração. ..	22
2.7.2. Índice de rasgo.	22
2.7.3. Módulo de elasticidade específico. ..	23
2.7.4. Resistência à passagem de ar. ...	24
2.7.5. Volume específico aparente.	24
2.7.6. Maciez Gurley. ...	24
2.7.7. Capilaridade Klemm.	25
2.7.8. Propriedades ópticas.	25
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1. Material de estudo	27
3.2. Atividade de ultra-sonificação da polpa	27
3.3. Formação das folhas de papel	28
3.4. Secagem do papel através de ar quente (secagem convencional).....	29
3.5. Secagem de papel por radiações microondas.....	30
3.6. Atividade de reciclagem de papel.	33
3.7. Métodos e realização das análises	34
3.7.1. Análises dimensionais das fibras	34
3.7.2. Análise do material fibroso	35
3.7.3. Análise da seção transversal da parede das fibras	36
3.7.4. Análise de carboidratos	37
3.7.5. Análises físicas e mecânicas dos papéis	37
3.7.6. Análise estatística	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1. Influência da secagem por radiações microondas e através de ar quente nas propriedades das fibras	40
4.1.1. Índice de retenção de água das fibras (WRV)	42
4.1.2. Propriedades dimensionais das fibras.....	43
4.1.3. Propriedades do material fibroso.....	45
4.1.4. Análise da seção transversal da parede das fibras.....	47

4.2. Teor de carboidratos	50
4.3. Influência da secagem por radiações microondas e através de ar quente nas propriedades dos papéis	52
4.3.1. Índice de tração	52
4.3.2. Índice de rasgo.....	53
4.3.3. Módulo de elasticidade específico	55
4.3.4. Resistência à passagem de ar	56
4.3.5. Volume específico aparente	58
4.3.6. Maciez Gurley	59
4.3.7. Capilaridade klemm.....	61
4.3.8. Propriedades ópticas	62
5. CONCLUSÕES	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
APÊNDICE	73

RESUMO

MORAES, Rodrigo Guedes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Março de 2004. **Secagem por radiações microondas e seus efeitos nas propriedades de papéis reciclados.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Conselheiros: Jorge Luiz Colodette e Luis Henrique Mendes da Silva.

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de avaliar a aplicação das radiações microondas, como uma tecnologia alternativa para secagem de papéis. As alterações ocorridas nas características tecnológicas das fibras e nas propriedades dos papéis foram analisadas e comparadas, paralelamente, com as alterações ocorridas pela secagem de papéis por ar quente. Para um melhor entendimento sobre as tecnologias de secagem estudadas, foram avaliados, iterativamente, também os efeitos ocorridos nas propriedades das fibras, como também dos papéis formados em sucessivas etapas de reciclagem. A secagem dos papéis por meio de ar quente foi feita, utilizando-se, uma estufa com circulação de ar. A secagem dos papéis por meio de radiações microondas foi realizada, utilizando-se, um secador microondas adaptado para alcançar os objetivos do estudo. De acordo com os resultados obtidos, a secagem por radiações microondas permite maior preservação das propriedades estruturais das fibras,

quanto a seu comprimento, largura e espessura de parede celular, em comparação com a secagem de papéis por ar quente. Possivelmente, tal fato seja devido a um mecanismo de aquecimento relacionado a uma excitação de moléculas de água, promovida pela energia de microondas, o que permitiu que as fibras dos papéis secados por radiações microondas também apresentassem um maior conteúdo de xilanas. Quanto às propriedades físicas e mecânicas dos papéis, os dois processos de secagens proporcionaram efeitos semelhantes, com exceção da propriedade de maciez, que apresentou maiores valores com a secagem por radiações microondas. Este comportamento permite ressaltar a importância para estudos de implantação desse sistema de secagem para indústrias de papéis, principalmente, do segmento tissue, apesar de esta tecnologia ainda ser de custo elevado, em relação a outros sistemas de secagem utilizados comercialmente.

ABSTRACT

MORAES, Rodrigo Guedes, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2004.
Use of the microwave radiation in paper drying and its effects on the properties of the recycled papers. Advisor: Rubens Chaves de Oliveira.
Committee members: Jorge Luiz Colodette and Luis Henrique Mendes da Silva.

This study was carried out to evaluate the application of the microwave radiation as an alternative drying technology for papers. The changes in either the technological characteristics of the fibers and the properties of the papers were analyzed and compared to the changes happening over the drying of the papers by hot air. To better understanding the drying technologies under study, the effects occurred in the properties of the paper fibers were iteratively analyzed, as well as those on the papers properties formed in successive recycling stages. The hot-air drying of the papers was performed in an oven provided with air circulation. By the other hand, the microwave radiation drying was accomplished by a microwave dryer, which was adapted in order to reach the desired targets. According to the obtained results, the microwave radiation drying allows for a better preservation of the fiber structural properties concerning to their length and

width, as well as to the thickness of the cellular wall, compared to the hot-air drying of the papers, what is possibly due to a heating mechanism related to an excitement of the water molecules promoted by the energy of the microwaves, so allowing that the fibers of the papers dried by microwave radiation to present a higher xylan content too. Concerning to the physical and mechanical properties of the papers, it was shown that both drying types provided similar effects, except for the softness property that presented higher values when the microwave radiation drying was used. This behavior allows to emphasize the importance for the studies related to the implantation of the microwave radiation system in the paper industries, mainly the tissue segment, in spite of this technology presenting a high cost, compared to the other drying systems still commercially used.

1. INTRODUÇÃO

A seção de secagem é uma das etapas da fabricação de papéis que mais influencia sua qualidade, causando alterações na maioria de suas propriedades, principalmente aquelas diretamente associadas às alterações estruturais das fibras. O consumo de energia e a capacidade de produção das máquinas de papéis são, também, influenciados pela operação de secagem.

Existem diversas tecnologias industriais para a secagem de papéis como, por exemplo, o uso de cilindros aquecidos com vapor quente, cilindros vazados e transpassados por fluxo de ar quente e sistemas de colchões de ar. A escolha do sistema depende da qualidade desejada para o produto final, facilidade de controle e custo do processo.

A utilização da tecnologia de microondas pode ser uma eficiente alternativa para a etapa de secagem da máquina de papel. A literatura disponível apresenta as seguintes vantagens da aplicação deste sistema: obtenção de um perfil de umidade no papel mais homogêneo, permanência de uma temperatura menos elevada na tela de secagem e secagem mais rápida do papel. Outra importante vantagem que pode ser agregada a esta tecnologia de secagem, a qual foi observada durante a execução deste trabalho, é a possibilidade de produção de

papéis com melhores propriedades de maciez. Esta propriedade é de extrema importância para a comercialização de papéis do tipo tissue, papéis esses, na qual grande parte da produção da polpa nacional de eucalipto é destinada. Outro fato é que a maior parte da produção de celulose, no Brasil, é originada de fibras de eucalipto, as quais também apresentam características favoráveis à produção de papéis para o segmento de impressão e escrita, principalmente, os papéis do tipo “high bulk”.

A secagem por radiações microondas requer um maior consumo de energia, em relação aos sistemas de secagem de papéis tradicionais, tornando-se uma tecnologia consideravelmente cara. Tal desvantagem desestimulou o avanço de pesquisas relativas à implantação deste sistema na seção de secagem da máquina de papel. Porém, é importante ressaltar que a maior parte destes estudos foi realizada nas décadas de 60 e 70, período em que a tecnologia de microondas ainda não estava tão avançada. Atualmente, existem poucas informações sobre os efeitos da secagem por radiações microondas na estrutura do papel. Através de testes preliminares, foi observado que a secagem por radiações microondas proporcionava um efeito positivo na maciez dos papéis. Portanto, o objetivo do presente estudo foi proporcionar informações técnicas sobre a influência da secagem por radiações microondas no incremento da propriedade de maciez dos papéis, bem como avaliar o efeito desse processo de secagem em outras propriedades dos papéis e, inclusive, seus efeitos no processo de reciclagem dos papéis de eucalipto. Para isto, foram formados papéis de fibras primárias, em diversos níveis de reciclagem, comparando-se, paralelamente, a secagem por radiações microondas a um outro processo de secagem tradicional, baseado na aplicação de ar quente.

2. REVISÃO DE LITERATURA

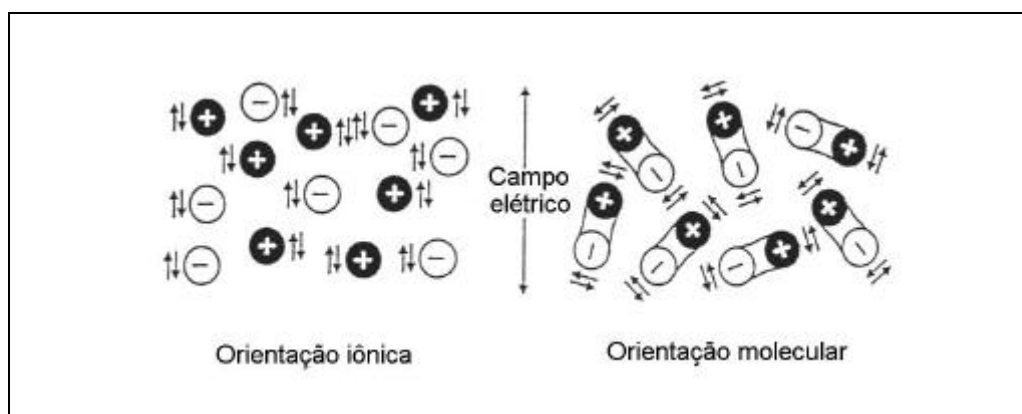
2.1. Radiações microondas

As radiações microondas são ondas eletromagnéticas, que apresentam um intervalo de comprimento entre 0,025m a 0,75m, o que corresponde às frequências de 20.000 MHz a 400 MHz, sendo que, em sistemas de secagem, a frequência de microondas mais comumente aplicada é a de 2.450 MHz. Uma corrente elétrica alternada comum reverte a direção da corrente 60 vezes por segundo, ou seja, há uma frequência de 60 Hz. As microondas fazem o mesmo, mas em uma frequência correspondente a 2.450 MHz. Como a luz, as microondas viajam em linha reta. Elas são refletidas pelo metal, passam através do ar e de muitos, mas nem todos, os tipos de vidros e materiais plásticos, sendo absorvidas por vários constituintes, inclusive a água. Quando as microondas são refletidas ou passam através de um material, sem serem absorvidas, elas não transmitem energia ao objeto, ou seja, o objeto não sofre aquecimento. Quando são absorvidas, elas aquecem os materiais absorventes (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

2.1.1. Aquecimento através de radiações microondas

Os papéis, como também outros tipos de materiais, contêm moléculas que agem como dipolo, ou seja, exibem cargas positivas e negativas. Essas moléculas são denominadas ‘polares’ como, por exemplo, as moléculas de água. Quando as radiações microondas passam por uma folha de papel, as moléculas de água e outras moléculas polares presentes tendem a alinhar-se ao campo elétrico. As moléculas tendem a oscilar na frequência deste campo elétrico, o que causa uma fricção intramolecular, caracterizada pelo movimento rotacional das moléculas de água, gerando, rapidamente, o aquecimento do papel. Segundo SOININEM (1988), o fenômeno de fricção intramolecular, ocasionado pela aplicação de um campo elétrico, tem sua origem atribuída ao movimento dos dipolos das moléculas.

GOULD (1995) relata que a aplicação de um campo elétrico permite, também, a movimentação de íons em uma solução, o que leva a uma orientação iônica. Assim, quando o campo elétrico alterna-se rapidamente, ocorre a geração de aquecimento. A Figura 1 representa, esquematicamente, o efeito da aplicação de radiação de microondas nos íons e nas moléculas polares.



Fonte: GOULD (1995).

Figura 1- Esquema da excitação iônica e molecular através da aplicação de radiações microondas.

O aquecimento através de radiações microondas pode ser classificado como fonte de calor volumétrico, ou seja, este tipo de secagem não se limita aos mecanismos de condução e convecção de calor (AHRENS & HABEGGER, 2001). Assim, ele também é influenciado por outros dois fatores, que são: constante dielétrica do material (ϵ') e fator de perda dielétrica do material (ϵ''). Segundo MUDGETT (1986), a constante dielétrica é a medida da habilidade de um material em armazenar energia elétrica, enquanto o fator de perda dielétrica é a medida da habilidade de um material em dissipar energia elétrica.

O fator de perda dielétrica é uma propriedade intrínseca do material. Ele indica a eficiência com que uma determinada radiação eletromagnética é convertida em calor. Dessa forma, um elevado fator de perda dielétrica indica que o material é aquecido rapidamente. Este fator é dependente da frequência da radiação de microondas e da temperatura do material (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

Algumas propriedades como a massa, teor de umidade, densidade, temperatura inicial, geometria, tamanho, forma, condutividade elétrica e condutividade térmica influenciam a capacidade de aquecimento de um material através das radiações microondas (SCHIFFIMANN, 1990).

O Quadro 1 apresenta a constante dielétrica, fator de perda dielétrica e HDP (profundidade, medida a partir da superfície do material, na qual a energia é reduzida à metade da energia incidente), para alguns materiais submetidos à radiação de microondas a 2.450 MHz.

Quadro 1- Constante dielétrica (ϵ'), fator de perda dielétrica (ϵ'') e HDP de vários materiais a 2.450 MHz.

Material	$\hat{\epsilon}'$	$\hat{\epsilon}''$	HDP (cm)
Água destilada a 25°C	78	12,0	1,0
Água + 0,5M de NaCl (25°C)	-	32	0,26
Gelo (-12°C)	3,2	0,003	800
Carne de boi (<i>bottom round</i> , cozido, 30°C)	-	12	0,7
Presunto (pré-cozido, 20°C)	-	23	0,4
Batata			
Inteira (25°C)	-	16	0,66
Triturada (25°C)	-	24	0,48
Papel	-	0,15	14,8
Polietileno	2,3	0,003	700

FONTE: SCHIFFMAN (1990), citado por POTTER & HOTCHKISS (1995).

2.1.2. Geração de radiações microondas

A função básica do gerador de microondas é converter uma corrente elétrica alternada de 50 a 60 Hz em uma elevada frequência, correspondente às radiações microondas (MUJUMDAR, 1995).

O tipo mais comum de gerador de microondas é um dispositivo eletrônico denominado magnetron. Este dispositivo é uma espécie de tubo eletrônico, que se apresenta dentro de um campo magnético que propaga energia radiante em alta frequência (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

Um simples forno de microondas consiste de uma cabine de metal, na qual é inserido um magnetron. Usualmente, a cabine é equipada com um dispositivo de metal, que serve para distribuir as microondas ao longo do forno. O material a ser aquecido é colocado na cabine, onde recebe radiações microondas provenientes de todas as direções. Isto acelera o tempo de aquecimento e facilita a fuga de vapor d'água (POTTER & HOTCHKISS, 1995). Segundo FELLOWS (1994), nessas instalações é importante que a potência do magnetron esteja de acordo com as dimensões do secador.

As radiações microondas são altamente hostis ao ambiente, o que dificulta a realização de uma confiável medição da temperatura no interior do secador. As técnicas de instrumentação tradicionais não funcionam corretamente, devido a interação entre as microondas e os sensores elétricos. Devido a isto, desenvolveram-se técnicas de medição de temperatura mais eficazes, sendo que a principal baseia-se na utilização de sensores ópticos (WICKERSHEIM, 1990).

2.1.3. Mecanismo de aquecimento dielétrico

Segundo GALEANO e MACK (1970), as características do aquecimento dielétrico têm sido descritas por vários pesquisadores. Esta tecnologia permite um aquecimento tridimensional, com maior seletividade para áreas mais úmidas, possibilitando, assim a secagem mais uniforme do produto.

Diferentemente de outras formas de aquecimento, o aquecimento dielétrico não depende da transferência de calor através da superfície, mas gera aquecimento ao longo de todo o volume do material. Portanto, pode ser extremamente rápido, sem proporcionar intensas temperaturas na superfície (JONES et al., 1973).

Segundo JONES (1986), é conveniente classificar o aquecimento dielétrico em duas categorias, conhecidas como rádio frequência (r.f.) e microondas. O aquecimento por rádio frequência é definido, normalmente, para um intervalo de 10 MHz a 100 MHz, enquanto o aquecimento por microondas é definido para um intervalo entre 500 MHz a 5.000 MHz, sendo que a faixa de 100 MHz a 500 MHz é, raramente, utilizada.

O aquecimento por rádio frequência é, fisicamente, igual ao aquecimento por radiações microondas. A diferença está nos métodos de geração das ondas para os dois intervalos de frequência (SOININEN, 1988).

O fator de perda dielétrica de um dado material muda com a frequência do campo elétrico. Os papéis úmidos apresentam um maior fator de perda

dielétrica, durante a aplicação das radiações microondas, do que no aquecimento por rádio frequência. Por esta razão, alguns pesquisadores têm demonstrado preferência pelo sistema de secagem por microondas (JONES et al., 1973).

2.1.3.1. Influência das propriedades dielétricas na secagem dos papéis

A água tem uma importância fundamental na interação entre a folha de papel e as radiações microondas. Conseqüentemente, a densidade aparente da água (massa de água por volume de folha de papel) é um importante parâmetro na determinação das constantes dielétricas do papel (HABEGER & BAUM, 1983).

HABEGER e BAUM (1983) reportam que os papéis apresentam maiores valores de constante dielétrica ao longo das isotermas de desorção do que durante as isotermas de adsorção. Este fenômeno de histerese é atribuído à presença de maior taxa de água livre no papel, durante a secagem. Portanto, é possível que a associação da água com a celulose pode impedir a movimentação dos dipolos das moléculas de água, devido a estas não estarem livres durante a incidência das radiações microondas, o que reduz a constante dielétrica dos papéis.

As substâncias presentes na parede celular, tais como celulose, hemicelulose e lignina contribuem com os parâmetros dielétricos da fibra. Alguns constituintes inorgânicos estão, também, presentes na parede celular. Entretanto, por estarem em pequena quantidade, proporcionam uma fraca influência nos parâmetros dielétricos da fibra (TORGOVNIKOV, 1993).

As propriedades dielétricas do papel e de outros produtos celulósicos dependem de fatores, tais como a densidade, teor de umidade, tipo de fibra de madeira e materiais introduzidos e removidos na manufatura dos produtos (colas, amido, corantes, etc.). Os fatores externos, como a frequência de radiação eletromagnética utilizada e a temperatura, também podem influenciar (TORGOVNIKOV, 1993).

HABEGER e BAUM (1983) citam que o dióxido de titânio (TiO_2), utilizado como aditivo na fabricação de papel, possui uma elevada constante dielétrica, mas proporciona um pequeno efeito nas propriedades dielétricas do papel. Isto é devido, provavelmente, à geometria do TiO_2 que se dispõe em isoladas aglomerações. Entretanto, a água é distribuída ao longo da fibra, o que leva a uma topologia mais conectada, permitindo, com muito maior efetividade, o incremento na constante dielétrica do papel.

2.1.4. Controle do perfil de umidade do papel através da secagem por radiações microondas

A utilização de equipamentos de secagem por radiações microondas, em pontos selecionados na máquina de papel, apresenta um potencial para incrementar o controle do processo de remoção de água, melhorando assim, o perfil de umidade do papel (HANKIN et al., 1970).

Segundo AHRENS e HABEGER (2001), o fator de perda dielétrica é dependente da frequência aplicada e da temperatura, tendendo a aumentar com a elevação no teor de umidade. As características apresentadas pela secagem através de radiações microondas podem, assim, favorecer de forma mais homogênea a distribuição de umidade no papel.

GOERZ e JOLLY (1967) relatam que o perfil de umidade do papel, obtido pelo processo de secagem através de radiações microondas, proporciona uma aplicação de revestimento mais uniforme nos papéis.

HANKIN et al. (1970) realizaram um estudo computacional a respeito da instalação de secadores de microondas em máquina de papel. Concluíram que os secadores por microondas permitem um incremento global nas receitas devido a: (1) a maior retenção de água no papel, ocasionada pela melhor distribuição de umidade; e (2) incremento na eficiência dos cilindros aquecidos com vapor quente.

2.1.5. Influência da secagem por radiações microondas nas propriedades dos papéis

Segundo ANDERSSON et al. (1972), os papéis submetidos a um intenso campo elétrico não apresentam efeitos deletérios em suas propriedades. Em papéis industriais, foram avaliadas as seguintes propriedades: deformação, comprimento de ruptura, índice de rasgo, porosidade, maciez, opacidade e alvura. Nenhuma diferença foi encontrada para os papéis expostos à energia de microondas, comparativamente aos papéis secados apenas por cilindros aquecidos.

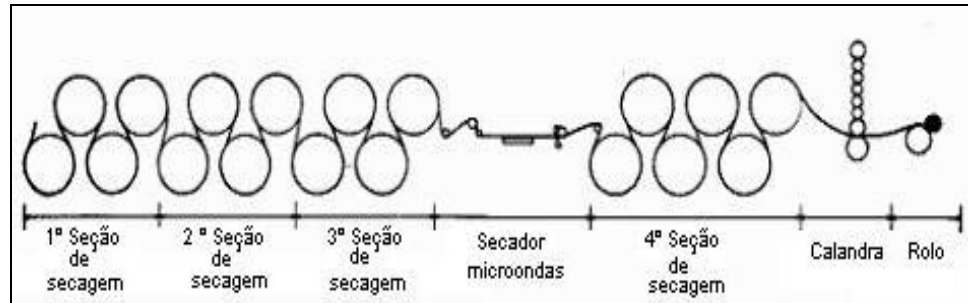
Durante um experimento piloto com utilização de secagem por radiações microondas, também nenhuma diferença foi encontrada no índice de arrebentamento, índice de rasgo e resistência à tração dos papéis. Entretanto, houve um incremento de 25%, aproximadamente, na energia de ruptura e de 40 % na resistência a dobras dos papéis. (HANKIN et al., 1970).

A variação de umidade ao longo da tela secadora da máquina pode provocar uma diferença substancial nas propriedades dos papéis, tais como a resistência à deformação, dobras e ao rasgo (JONES, 1986). Desta forma, por permitir um melhor controle no perfil de umidade, a secagem através de radiações microondas poderá favorecer a formação de papéis com menor variações nas propriedades físico-mecânicas.

2.1.6. Desenvolvimento dos equipamentos de secagem de papel por radiações microondas

Segundo ANDERSSON et al. (1972), os equipamentos de secagem por radiações microondas são estudados, em alguns casos, para nivelar a distribuição de umidade do papel ou para melhorar a capacidade de secagem da máquina. Esses autores fizeram um estudo, instalando um secador por microondas entre a

terceira e a quarta seção da etapa de secagem de uma máquina de papel. A Figura 2 mostra o esquema dessa instalação.



Fonte: ANDERSSON et al. (1972).

Figura 2- Posição do secador por microondas na máquina de papel.

Com base nos resultados obtidos por ANDERSSON et al. (1972), para obtenção de uma melhor eficiência de secagem, o emissor de microondas deve manter-se próximo à superfície do papel. Testes mostraram que acima de 0,5 mm de distância, entre a superfície do papel e o emissor de microondas, a eficiência de secagem decresce rapidamente, bem como o volume de ventilação do ar proporciona uma instabilidade na eficiência de secagem para uma distância acima de 0,5 mm.

Já estão sendo desenvolvidos secadores por microondas altamente modernos. Um modelo recente proposto por Joines e Drozd (1999), citados por AHRENS e HABEGER (2001), foi adaptado para a secagem da tela secadora da máquina de papel de forma eficiente e uniforme e com uma significativa melhoria na confiabilidade do magnetron e de sua potência disponível. Estes geradores de microondas têm apresentado redução de custos, o que favorece, ainda mais, sua implantação no processo de secagem da máquina de papel.

2.2. Secagem convencional de papéis

A primeira técnica de secagem, a ser utilizada na fabricação de papel, foi desenvolvida, utilizando-se ar natural. Esta prática foi mantida até o advento dos cilindros secadores, os quais se caracterizam por proporcionar um aquecimento alternado em ambos os lados do papel (MUJUMDAR, 1995).

Segundo POIRIER e PIKULIK (2003), a secagem de papel para impressão e escrita tem sido sempre um processo lento, baseado no princípio de condução, segundo o qual o papel passa ao redor de cilindros secadores de ferro fundido, habitualmente dispostos em duas fileiras.

A secagem de papel ao longo do cilindro secador abrange quatro etapas. A primeira compreende o período em que a folha de papel entra em contato com o cilindro secador, mas não está envolvida pelo feltro da tela de secagem. Na segunda, a folha está entre a superfície quente do secador e a do feltro; nesta etapa existe um rápido aquecimento e o processo de vaporização inicia. Na terceira etapa, o feltro deixa de envolver a folha, o que provoca uma intensa evaporação, seguindo-se uma redução na temperatura e velocidade de evaporação. Na última etapa, a folha separa-se da superfície do secador, causando um rápido resfriamento e decréscimo brusco na evaporação (D'ALMEIDA, 1988).

Segundo MUJUMDAR (1995), é muito difícil operar uma seção de secagem de cilindros convencionais para máquinas de papel com velocidade acima de 1.000 m/min. Conseqüentemente, aconselha-se a pesquisa por um método de secagem alternativo para que a tendência de incremento de velocidade das máquinas de papel continue a crescer.

Apesar da predominância da utilização do sistema de cilindros aquecidos a vapor quente, existem outras tecnologias de secagem de papel, sendo que algumas baseiam-se na aplicação de ar. Como exemplo, citam-se: “impingement drying” (aplicação de jatos de ar sob elevadas temperaturas); “through-drying”

(processo adaptado para telas de secagem permeáveis, em que o ar quente passa por intermédio de sua estrutura); e colchões de ar (sistema baseado na secagem de papel livre de contato mecânico).

2.3. Diferenças entre secagem convencional e secagem por radiações microondas

No aquecimento convencional empregando ar quente, elementos infravermelhos, contato direto através de superfície aquecida e outros, a fonte de calor aquece a superfície de um dado material até que suas sucessivas camadas internas aqueçam. Isto produz um gradiente de temperatura, que pode permitir a queima da parte exterior do material antes que a temperatura interna se eleve de forma apropriada (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

GOERZ e JOLLY (1967) recomendam que, na aplicação de secagem por cilindros aquecidos com vapor quente deve-se aquecer intensamente o papel a fim de alcançar o nivelamento do seu perfil de umidade. Isto seria conseguido na obtenção de papéis com teor de umidade próximo a 1%, enquanto os secadores por microondas somente necessitam de remover a umidade do papel para um nível de cerca 5 %.

A tecnologia de radiações microondas tem a vantagem de proporcionar uma secagem do papel mais uniforme, bem como um melhor processamento, em comparação com os métodos convencionais (KUMAR & SMITH, 1976).

Segundo JONES (1986), todas as moléculas reativas presentes em um determinado produto absorverão energia, simultaneamente, se a massa for submetida a um campo elétrico de alta frequência. Isto ocorrerá, independentemente da posição dos componentes reativos na massa, resultando na eliminação da ineficiência normalmente associada ao estágio final de uma secagem convencional, que proporciona um aquecimento mais intenso na superfície do produto.

SMIT (1988), relata que os materiais termicamente isolantes, tais como madeira, plásticos e cereais, dificilmente se aquecem de modo homogêneo, através de processos de secagem convencionais, pois, dificultam a condução de calor em suas estruturas, resultando um aquecimento lento. Entretanto, as radiações microondas atravessam estes materiais, aquecendo seu interior imediatamente e possibilitando uma secagem rápida e uniforme.

Segundo SOININEN (1988), o sistema de aquecimento dielétrico, no qual inclui-se a secagem por radiações microondas, é uma tecnologia única devido ao fato de as substâncias serem aquecidas, simultaneamente, em toda a profundidade do papel. Proporciona uma secagem rápida e seletiva, porém apresenta, como desvantagem, um elevado custo de funcionamento.

Atualmente, na seção de secagem de uma máquina de papel industrial, utilizam-se tecnologias baseadas em sistemas de ar, ou um outro processo menos oneroso. A utilização de secadores microondas, em um sistema combinado, favorece a redução do contato mecânico do papel. Disto decorre que a tela de secagem da máquina mantém uma temperatura menos elevada, proporcionando uma secagem mais rápida e melhor controle de qualidade do papel (HANKIN et al., 1970).

Segundo MAFART (1994), os secadores por microondas não requerem uma forte ventilação, como ocorre com equipamentos de secagem que empregam aquecimento por convecção, proporcionando, assim, uma economia de energia não desprezível. Além disso, as microondas são absorvidas, seletivamente, pelo produto a ser aquecido, não aquecendo o ar ambiente nem o equipamento. Tal fato leva à conclusão que o rendimento de absorção das microondas aproxima-se de 100%. De forma alguma, entretanto, este será o rendimento global de aquecimento.

O rendimento global (η) é o produto do rendimento de transformação da eletricidade em microondas (η_T) com o rendimento de absorção das microondas (η_a), ou seja, $\eta = \eta_T * \eta_a$. O rendimento de transformação da eletricidade em

microondas pode ser inferior a 50%, podendo chegar, no melhor dos casos, a 70% (MAFART, 1994).

2.4. Atividade de refino da polpa de celulose através da aplicação de ultra-som

A aplicação de ultra-som como tecnologia de refino, ou seja, como alternativa para o desenvolvimento das propriedades físico-mecânicas dos papéis, foi inicialmente estudada nos anos de 60 a 70. Essas propriedades podem ser consideravelmente diferentes daquelas obtidas com o refino convencional da polpa, o que é devido, principalmente, ao modo de ação do refino ultra-sônico, conforme observado em estudos mais recentes por SILVA e OLIVEIRA (2002).

Uma forte evidência relacionada à ocorrência de despolimerização da celulose foi indicada por Dolgin et al., citado por LAINE et al. (1977), em uma série de experimentos a partir de suspensões em baixa consistência (0,1%). Esses autores relatam que fibras de várias fontes foram degradadas pela atividade ultra-sônica (23,6 kHz), sendo que o efeito foi maior quando se prolongou o tratamento.

O tratamento ultra-sônico provoca algumas alterações na estrutura da fibra, sendo que em geral, existem quatro estágios de mudanças morfológicas. O primeiro estágio caracteriza-se por um pequeno desprendimento da camada S2 da parede celular da fibra; o segundo seria um desprendimento da camada S1; o terceiro, um inchamento da camada S2, que geralmente começa nos pontos de desprendimento; e o quarto seria a fibrilação da camada S2 da parede celular da fibra (Iwasaki et al., 1962, citado por LAINE et al., 1977).

LAINE e GORING (1977), relatam que a principal conclusão, obtida em seus estudos, é que a radiação ultra-sônica afeta a morfologia das fibras celulósicas, sendo que ocorre um aumento no tamanho dos poros da parede celular e danificação da superfície das fibras, sem muita perda de material carboidrato.

LAINE et al. (1977) reportam que Simpson e Mason (1950) estão entre os primeiros pesquisadores a aplicar radiação ultra-sônica em suspensões de fibras. Esses autores conduziram, um estudo, utilizando uma frequência ultra-sônica de 500 kHz para diferentes intervalos de tempo. Encontrou-se um efeito similar àqueles das polpas refinadas mecanicamente, entretanto, o custo do processo ultra-sônico foi consideravelmente maior. Eles propuseram, então, que a tecnologia de ultra-som poderia ser utilizada como uma técnica destinada a produzir mudanças seletivas nas fibras para avaliação microscópica.

Comparando as propriedades dos papéis produzidos a partir de fibras refinadas mecanicamente e através de ultra-som, para um mesmo valor de “freeness”, observou-se que a radiação ultra-sônica possibilitou a produção de papéis com maiores valores de resistência ao rasgo, opacidade e volume específico. Entretanto, as propriedades de resistência à tração e ao arrebentamento do papel foram favorecidas pela técnica de refino mecânico (LAINE & GORING, 1977).

SILVA e OLIVEIRA (2002) reportam que a aplicação de refino ultra-sônico na polpa proporciona ganho em propriedades físicas dos papéis, além da vantagem de permitir a preservação de sua maciez. Esses autores acrescentam que tais vantagens constituem um fator animador para implantação desta tecnologia, principalmente no segmento de papéis do tipo tissue.

Uma outra característica que poderia favorecer a utilização da tecnologia de ultra-som é a possibilidade de esta ser mais econômica. Segundo LAINE et al. (1977), o custo dos equipamentos de emissão ultra-sônica poderia ser balanceado com algumas vantagens, como a utilização de equipamentos auxiliares de menor tamanho, menor consumo de químicos e, provavelmente, a obtenção de um produto de melhor qualidade.

2.5. Influência do processo de reciclagem na qualidade do papel

Embora a reciclagem seja uma atividade promissora, existem problemas de caráter tecnológico, relativamente ao produto no final do processo, que exigem intensivos estudos voltados para o desenvolvimento de soluções viáveis. Tais problemas referem-se à perda de qualidade e às propriedades finais do papel reciclado, em relação ao produto original. Em decorrência dessas perdas, ocorrem limitações quanto à qualidade das fibras celulósicas nos sucessivos processos de reciclagem (SILVA & OLIVEIRA, 2000).

A perda em qualidade das fibras recicladas como matéria-prima para a produção de papéis é decorrente de transformações físicas e químicas na parede celular das mesmas, interferindo na capacidade de formação de ligações interfibrilares (CASTANHO & OLIVEIRA, 2002).

HOWARD (1990) relata que a principal causa da mudança nas propriedades das folhas de papéis, devido à reciclagem, é a redução na habilidade de ligação das fibras. Entretanto, a perda de resistência intrínseca das fibras também tem sido observada por alguns autores, sendo considerada um problema menos importante.

A redução na habilidade de ligação das fibras é um fenômeno bastante conhecido, tradicionalmente descrito como “irreversible hornification”, que implica em enrijecimento da fibra. (HOWARD, 1990). Segundo HOWARD e BICHARD (1992), este termo foi criado por Jayme em 1944, para descrever o efeito da secagem de polpas químicas.

HOWARD e BICHARD (1992) reportam que Scallan estudou o mecanismo envolvido na perda da capacidade de intumescimento da fibra. Esse autor menciona que as lamelas da parede celular das fibras intumescidas unem-se durante os processos de formação, consolidação e secagem das folhas de papel. Esta união das lamelas ocorre, provavelmente, através de ligações de hidrogênio. A incompleta reversão dessas ligações internas da parede celular impede o total

reintumescimento, quando a fibra é reciclada. As fibras tornam-se, então, mais rígidas e menos conformáveis, levando à formação de folhas de papel com maior volume específico e menor resistência.

Segundo SPANGENBERG (1993), em estudos de laboratório e na indústria, tem sido observado que as polpas que já sofreram processo de secagem levam à produção de papéis com menores propriedades de resistência. Isto é devido ao fato de as paredes celulares das fibras perderem água no início do processo de secagem, acarretando, assim, uma união das lamelas da parede celular. Essas lamelas, ligadas no mesmo plano, são tão unidas que algumas regiões não permitem a penetração de moléculas de água, quando a fibra é novamente hidratada. As fibras que sofreram esses efeitos nunca recuperaram seu diâmetro original, quando novamente intumescidas. Portanto, não terão mais a flexibilidade ou conformação que apresentavam antes de serem secadas.

As fibras recicladas apresentam maior cristalinidade e um menor número de poros em sua parede celular do que as fibras primárias, o que é devido, provavelmente, à alta temperatura de secagem a que foram submetidas durante a fabricação do papel. O que diminui a probabilidade de ligações interfibras durante a formação da folha, resultando em um papel com características físicas inferiores (D'ALMEIDA, 1988).

As ligações intrafibras, entre as moléculas de carboidratos, assim como as ligações interfibras são responsáveis por inúmeras propriedades de resistência do papel. Acredita-se que, em algum ponto crítico do processo de secagem, as fibras que compõem a estrutura do papel, ao contraírem sob a ação da secagem, geram forças de tensões internas que causam delaminação de suas camadas. Assim, durante o processo de reciclagem e, portanto, com as sucessivas ações de secagem, ocorrem rearranjos físicos das cadeias poliméricas de carboidratos, gerando maior cristalinidade nessas cadeias (OLIVEIRA & SABIONI, 1998).

Uma vez que as fibras são submetidas ao processo de secagem, suas paredes celulares sofrem alterações. Assim, elas apresentam redução em suas

espessuras, tornam-se mais densas, enquanto o volume e diâmetro de seus poros são reduzidos (BAWDEN & KIBBLEWHITE, 1997).

NAZHAD e PASZNER (1994) relatam que as mudanças irreversíveis na parede celular das fibras, devido à secagem do papel, têm sido historicamente atribuídas ao fechamento dos poros e às rachaduras da parede celular. Além disso, quando a fibra sofre processo de secagem, as superfícies adjacentes da celulose e hemicelulose, antes separadas, podem ligar-se formando ligações irreversíveis, modificando a estrutura de sua parede celular.

A formação de fibras colapsadas, devido à etapa de secagem, indica a presença de ligações irreversíveis na parede celular, resultando em diminuição do lúmen da fibra (KLUNGNESS & CAULFIELD, 1982). Essa redução no diâmetro do lúmen da fibra prejudica sua capacidade de intumescimento.

O efeito da secagem nas propriedades das fibras tem sido reportado por vários pesquisadores. É consenso que a capacidade de intumescimento das fibras sofre uma perda irreversível, que é intensificada com o aumento do nível e duração da secagem do papel (NAZHAD & PASZNER, 1994).

2.6. Propriedades das fibras

2.6.1. Índice de retenção de água das fibras (WRV)

Este índice expressa a capacidade da fibra em reter água, quando submetida à uma força centrífuga. Segundo Scallan & Carles (1972), citados por LEBEL et al. (1979), este índice proporciona uma estimativa bem precisa do ponto de saturação de água das fibras.

De acordo com ZHANG et al. (2002), a reciclagem dos papéis proporciona uma redução nos valores de WRV das fibras, devido à cristalinização de suas paredes celulares. Conforme Kast (1953), citado por NAZHAD e PASZNER (1994), quanto maior for a cristalinização da parede

celular, menor será a área superficial capaz de proporcionar ligação de hidrogênio e, conseqüentemente, a absorção de água pela parede celular da fibra será menor.

2.6.2. Propriedades dimensionais das fibras

As fibras submetidas a tratamentos de secagens apresentam-se, geralmente, colapsadas. A extensão deste fenômeno é incrementada com a redução da espessura de suas paredes celulares (KIBBLEWHITE & BAILEY, 1988). Este colapsamento da fibra é, também, acompanhado da redução de seu lúmen (KLUNGNESS & CAULFIELD, 1982). Assim, com o prolongamento dos ciclos de reciclagem, estes efeitos são intensificados (OLIVEIRA & SABIONI, 1998).

2.6.3. Propriedades do material fibroso

Baseado na característica do material fibroso, pode-se prever o comportamento de formação do papel na máquina. Dependendo do tipo de papel a ser produzido, é possível privilegiar algumas propriedades das fibras. Como exemplo, CLARK (1985) relata que a utilização de fibras com maior valor de coarseness é ideal para fabricação de sacos de papéis multifolhiados, em que se requer uma elevada resistência ao rasgo. Por outro lado, o uso de fibras com baixa propriedade de coarseness é desejável para a produção de papéis do tipo tissue, que necessitam de uma melhor maciez superficial. O valor de coarseness representa a quantidade em massa de fibra por unidade de comprimento. Segundo JANG et al. (1991), esta propriedade apresenta relação com a dimensão transversal das fibras, mas é, também, influenciada por outros fatores. Deste modo, além da espessura da parede celular, o número de fibras por grama e o comprimento das fibras afetam a propriedade de coarseness.

2.6.4. Teor de carboidratos do material fibroso

A variação do teor de carboidratos no material fibroso proporciona uma considerável influência na fabricação dos papéis. Segundo NAZHAD e PASZNER (1994), a precipitação de hemicelulose na superfície das fibras, no estágio final do cozimento alcalino, proporciona melhorias na formação dos papéis.

Segundo Stamm (1964), citado por HILLIS (1984), a secagem de papel em elevada temperatura pode levar à degradação das hemiceluloses, proporcionando a transformação destas em polímeros de furfural, os quais apresentam menos afinidade com a água, ou seja, a capacidade de intumescimento das fibras é reduzida e, conseqüentemente, também sua flexibilidade durante a formação das folhas de papel.

As diferenças nas propriedades físicas da parede celular das fibras, devido à variação no conteúdo de hemicelulose, podem estar relacionadas à organização das microfibrilas que compõem a parede celular. Deste modo, as fibras com menor conteúdo de hemicelulose apresentam uma estrutura fibrilar mais agregada e compacta, em comparação, com as fibras contendo elevado teor de hemicelulose (DUCHESNE et al., 2001; OKSANEN et al., 1997), citados por MOLIN & TEDER (2002).

Segundo BOUCHARD e DOUEK (1994), não existe uma relação direta entre remoção de hemicelulose e perda, ou ganho, de resistência do papel com a reciclagem. No presente trabalho, entretanto, observou-se que apesar da ocorrência de uma discreta perda de hemicelulose durante a reciclagem, os papéis apresentaram mudanças significativas em suas propriedades mecânicas.

2.7. Propriedades dos papéis

O processo de reciclagem proporciona consideráveis mudanças nas propriedades dos papéis, sendo que a etapa que mais contribui para essas alterações é a secagem. Existem autores, como BOBALEK e CHATURVEDI (1989), que citam que as mudanças na resistência dos papéis podem ser atribuídas, inteiramente, aos efeitos da secagem, o que ressalta, ainda mais, a importância desta etapa na fabricação de papéis.

2.7.1. Índice de tração

O índice de tração expressa a resistência dos papéis à tração. Este índice é derivado da força de tração, responsável pela ruptura do corpo-de-prova, em relação à largura e sua gramatura. O número de ligações interfibrilares, apresentadas na formação do papel, é o parâmetro que mais influencia o índice de tração. Ao passo que a resistência individual das fibras também é um fator importante, mas de menor influência na determinação deste índice.

A principal causa relacionada à mudança nas propriedades dos papéis, devido à reciclagem é a redução da habilidade de ligação das fibras (OLIVEIRA & SABIONI, 1998; HOWARD, 1990; NAZHAD & PASZNER, 1994). Conseqüentemente, espera-se uma redução no índice de tração com a reciclagem dos papéis.

2.7.2. Índice de rasgo

O índice de rasgo expressa a resistência dos papéis ao rasgo, sendo esta resistência definida como o trabalho necessário para rasgar um conjunto de folhas, após um corte inicial realizado pelo aparelho de teste. O valor de índice

de rasgo é derivado da força necessária para rasgar o conjunto de folha pela média de gramatura destas.

A resistência ao rasgo é influenciada por três propriedades: número total de fibras, que participam na ruptura da folha; comprimento da fibra; e número e resistência das ligações interfibras (CASEY, 1966). Portanto, a estrutura da fibra também influencia a determinação do índice de rasgo dos papéis.

Além de provocar perdas no número de ligações interfibrilares, a secagem proporciona uma redução na espessura das fibras e de suas paredes celulares (BAWDEN & KIBBLEWHITE, 1997), o que pode afetar, negativamente, a resistência intrínseca das fibras. Desta forma, uma expectativa durante a condução do presente trabalho é que o índice de rasgo dos papéis sofresse redução com o prolongamento do número de ciclos de reciclagem.

2.7.3. Módulo de elasticidade específico

O módulo de elasticidade específico expressa a capacidade de uma amostra de papel em resistir a deformações, em função de um esforço de tensão crescente por unidade de massa específica da amostra. Esta propriedade foi obtida, através da inclinação da porção linear da curva de tração x deformação, e determinada, dividindo-se o valor da tensão (esforço de tração) pela correspondente deformação da amostra de papel.

O valor do módulo de elasticidade dos papéis é afetado pelo módulo de elasticidade das fibras em sua direção axial e, principalmente, pela ineficiência na distribuição da tensão, causada pela transferência de carga de uma fibra para outra (PAGE & SETH, 1980). Portanto, esta propriedade é intensamente influenciada pelo número de ligações interfibrilares. Os papéis que apresentam fibras mais unidas em sua estrutura terão, conseqüentemente, maior resistência à deformação, quando submetidos a um esforço.

2.7.4. Resistência à passagem de ar

A resistência à passagem de ar é uma medida do tempo necessário para que um determinado volume de ar atravesse uma amostra de papel, sendo que essa amostra apresenta-se fixada por dois anéis concêntricos. O ar é, então, forçado através do papel por uma pressão resultante do peso de um cilindro padrão. Esta propriedade é influenciada pelas características da estrutura interna dos papéis. Assim, o comprimento, orientação e, principalmente, a capacidade de ligação das fibras determinarão a maior ou menor quantidade de espaços vazios na estrutura do papel.

2.7.5. Volume específico aparente

O volume específico aparente é obtido, dividindo-se o valor da espessura do papel por sua gramatura. Segundo CASEY (1967), além da espessura, esta propriedade é dependente da compressibilidade do papel. As características estruturais das fibras também influenciam a determinação desta propriedade. Assim, as fibras mais rígidas contribuem com o incremento no volume específico dos papéis por apresentarem menor capacidade de conformação (HOWARD & BICHARD, 1992).

2.7.6. Maciez Gurley

Esta propriedade é de fundamental importância na determinação da qualidade de papéis tipo tissue, uma vez que está relacionada à sensibilidade humana quanto à estrutura e superfície desses papéis.

A maciez é influenciada pelo número de ligações interfibrilares e pelo volume específico dos papéis. Uma redução na capacidade de ligação das fibras, ou seja, a formação de papéis com uma estrutura fibrilar menos unida permitirá

um ganho no valor desta propriedade, relacionada ao aumento do volume específico dos papéis. As características estruturais da fibra, também, afetam a propriedade de maciez. Assim, fibras com menor valor de coarseness proporcionam tendência à formação de papéis mais macios.

2.7.7. Capilaridade Klemm

Assim como a maciez, o valor de capilaridade klemm é muito importante na avaliação da qualidade de papéis do tipo tissue. Esta propriedade indica a facilidade com que a água é absorvida pelos capilares do papel, sendo influenciada, principalmente, pelo número de ligações interfibrilares e características estruturais das fibras. Assim, os papéis que possuem uma estrutura fibrilar menos unida, ou seja, que apresentam uma maior quantidade de espaços vazios, tendem a proporcionar maiores valores de capilaridade klemm.

2.7.8. Propriedades ópticas

As propriedades ópticas como a alvura, brancura, índice de amarelecimento, coeficiente de dispersão de luz e opacidade são influenciadas pela maneira com que uma luz incidente é refletida, transmitida e absorvida pelo papel. Deste modo, essas interações são influenciadas, principalmente, pela natureza química dos constituintes do papel, assim como, pelo grau de organização de sua rede fibrilar.

As polpas de fibras primárias com baixo grau Schopper-Riegler, como a utilizada no presente trabalho, proporcionam menores possibilidades de mudanças de propriedades ópticas, durante as sucessivas etapas de reciclagem dos papéis. BOBALEK e CHATURVEDI (1989) relatam que, sob condições mínimas de refino, as propriedades de opacidade e coeficiente de dispersão de luz apresentam apenas uma sutil redução em seus valores com o incremento dos

ciclos de reciclagem dos papéis, apesar de ter sido observado um considerável decréscimo de resistência mecânica. Tal decréscimo é devido ao menor efeito dessa fraca intensidade de refino na organização da estrutura fibrilar, que, por sua vez, foi suficiente para permitir alterações na resistência dos papéis reciclados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material de estudo

O material utilizado no estudo foi uma polpa kraft-ECF de eucalipto, proveniente da Celulose Nipo-Brasileira S.A. – CENIBRA, localizada no município de Belo Oriente-MG.

Preparou-se uma quantidade suficiente de polpa para realização do experimento. Essa polpa foi submetida a uma ultra-sonificação, para a obtenção de um grau Schopper-Riegler de 21° SR e posterior formação de folhas de papel. Optou-se por baixo valor de Schopper-Riegler a fim de preservar, ao máximo, a propriedade de maciez dos papéis.

3.2. Atividade de ultra-sonificação da polpa

O aparelho utilizado para proceder à ultra-sonificação da polpa foi o modelo Virsonic 475, que apresenta uma produção máxima de energia de aproximadamente 475 W, frequência de 20 kHz e 10 níveis de potência.

Seguindo a orientação contida no manual do aparelho, o trabalho foi realizado, aplicando-se apenas 40% da geração de energia máxima do instrumento.

A consistência da polpa utilizada na ultra-sonificação foi de 1%. Assim, em cada procedimento de ultra-sonificação, utilizou-se um becker de 2.000 mL, no qual foram inseridos 1.500 mL de suspensão de fibra em água. A suspensão foi mantida em constante movimento por meio de um agitador magnético a fim de proporcionar uma ultra-sonificação mais uniforme. O tempo de ultra-sonificação foi de 30 minutos.

O transdutor ultra-sônico do aparelho foi inserido na suspensão de fibra com, aproximadamente, 2 cm de sua haste mantida submersa. O procedimento de ultra-sonificação foi realizado dentro de uma câmara acústica, para reduzir o elevado ruído proveniente do aparelho.

Utilizou-se a condição ótima de funcionamento do aparelho sonificador, conforme a técnica empregada por SILVA e OLIVEIRA (2002) visando um melhor ganho de qualidade da polpa, o que permitiu a formação de folhas de papéis com incremento de propriedades físicas e mecânicas, além da preservação da maciez do papel.

3.3. Formação das folhas de papel

As folhas de papel foram formadas, em uma formadora laboratorial, com uma gramatura de aproximadamente 60 g/m², baseando-se na norma TAPPI T 205 sp-95.

Após essa etapa, as folhas foram submetidas aos procedimentos de secagem. Foram utilizados dois processos de secagem: secagem através de ar quente (neste trabalho, denominada secagem convencional) e secagem através de radiações microondas.

3.4. Secagem do papel através de ar quente (secagem convencional)

O processo de secagem das folhas de papel através de ar quente foi realizado em uma estufa laboratorial com circulação de ar, modelo MA 035, fabricada pela empresa Marconi. Utilizou-se uma temperatura constante de 120 ± 3 °C.

A temperatura do papel, durante a operação de secagem apresentou-se diferente da temperatura no interior da estufa, sendo, então, plotadas uma curva de temperatura do papel em relação ao tempo de secagem. Na Figura 3, observou-se a ocorrência de incremento na temperatura do papel ao longo do procedimento de secagem, com a temperatura máxima do papel aproximando-se de 95 °C.

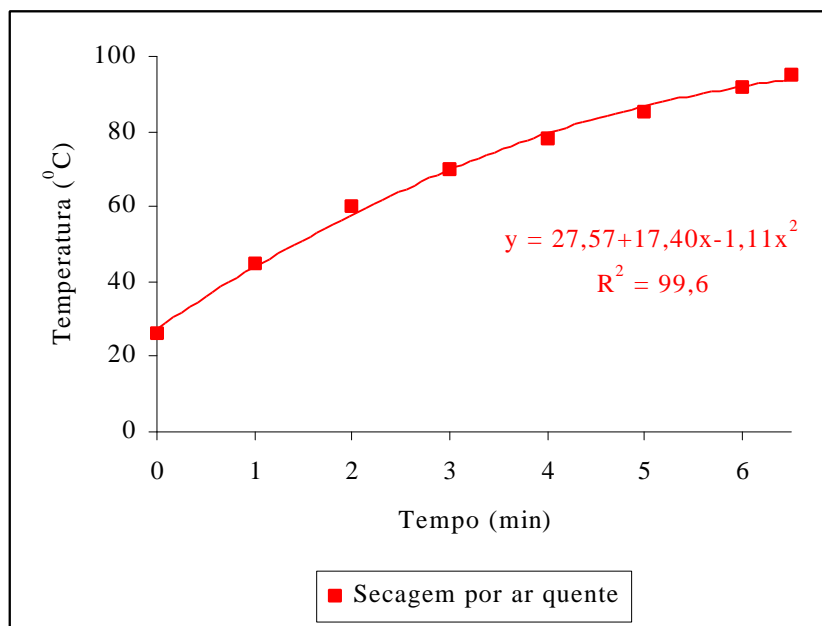


Figura 3 - Curva da temperatura de secagem dos papéis por ar quente em função do tempo.

Para permitir que as folhas fossem secadas sob restrição de encolhimento, foi utilizado um suporte convencional laboratorial metálico capaz

de resistir à alta temperatura presente no interior da estufa, que possibilitava a secagem de um conjunto de 11 folhas. Nesse suporte, cada folha de papel foi fixada de forma intercalada por arcos de diâmetros similares.

O procedimento de secagem dos papéis consistiu, simplesmente, em colocar o suporte com as folhas no interior da estufa, durante um período de tempo de 6 minutos e meio à uma temperatura constante de 120 ± 3 °C. Assim, as folhas de papéis, que apresentavam uma consistência inicial em torno de 43%, atingiam uma consistência final de aproximadamente 95%, após a secagem.

3.5. Secagem de papel por radiações microondas

O secador microondas utilizado na secagem das folhas de papel foi derivado de um modelo NN-S62B, fabricado pela empresa Panasonic. Esse instrumento apresenta modificações técnicas, realizadas pelo presente autor, em relação ao modelo original. Tais modificações possibilitaram não somente a realização da secagem dos papéis como também, a avaliação do efeito das radiações microondas, ao longo do procedimento de secagem.

As dimensões internas do secador microondas com relação à altura, largura e profundidade são 306 mm, 555 mm e 428 mm, respectivamente. Esse aparelho apresenta uma frequência de operação de microondas de 2.450 MHz, 10 níveis de potência e um consumo de energia total, utilizando a potência máxima, da ordem de 1.600 W por hora.

Para a realização das modificações técnicas no secador microondas, utilizou-se um sensor óptico de temperatura do tipo Thermalert MI, pelo fato de este sensor não sofrer nenhum tipo de interferência ocasionada pelas radiações microondas. Assim, este sensor foi instalado no aparelho de forma a permitir a medição da temperatura da superfície da folha presente no interior do secador.

Os sensores ópticos foram conectados a um controlador de temperatura, denominado Controlador Universal de Processos modelo N1100 que possui

função automática/manual e três saídas de alarme na versão básica, com funções de mínimo, máximo, diferencial (desvio), etc. Este controlador de temperatura foi conectado a um microcomputador, provido de um software capaz de armazenar os dados obtidos e transportá-los em forma de planilha ou gráfico.

Uma ventoinha foi também adaptada ao secador microondas a fim de permitir que o vapor d'água liberado dos papéis fosse eliminado do secador, facilitando, assim, a secagem das folhas.

Uma curva de temperatura do papel foi plotada, durante a secagem por radiações microondas, com a finalidade de se fazer uma comparação com a curva de temperatura do papel, durante a operação de secagem por ar quente.

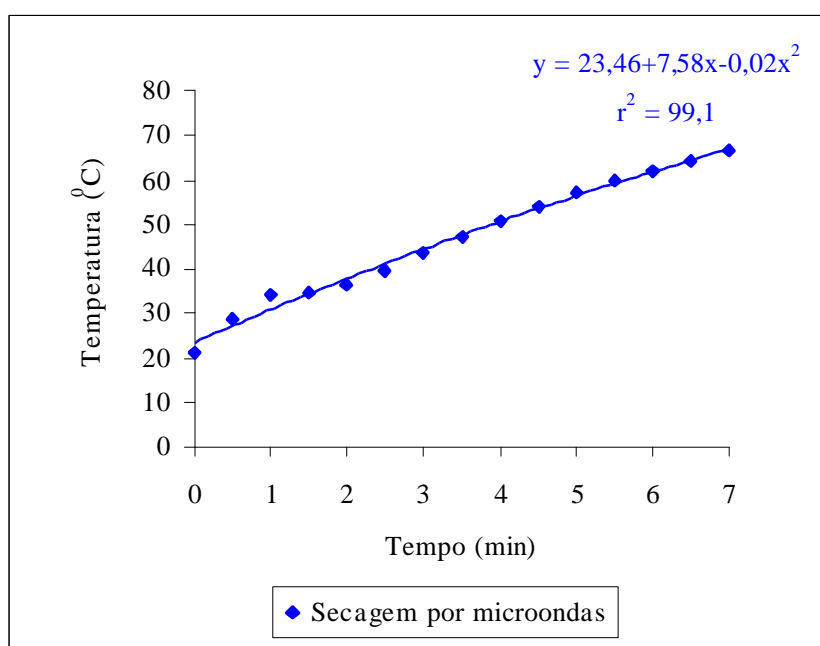


Figura 4 - Curva da temperatura de secagem dos papéis por radiações microondas em função do tempo.

Neste processo de secagem, a temperatura máxima do papel apresentou-se próxima a 70 °C, ou seja, relativamente menor que aquela obtida no processo de secagem através de ar quente (95 °C, aproximadamente). O tempo de secagem

necessário para elevar a consistência dos papéis de 43 %, aproximadamente, para uma consistência final em torno de 95% foi de 7 minutos, ou seja, pouco maior que o tempo de secagem das folhas, realizada na estufa.

Foram avaliados vários tempos de secagem a fim de obter uma melhor condição para o procedimento de secagem dos papéis através de radiações microondas. Assim, o tempo de secagem que proporcionou a obtenção de folhas de papel, com melhor qualidade, para uma consistência final próxima a 95%, foi de 7 minutos.

As folhas de papel foram secadas sob restrição de encolhimento, utilizando-se um suporte, que possibilitou a secagem de um conjunto de 11 folhas. Nesse suporte, cada folha de papel apresentava-se intercalada por arcos de polipropileno. Devido à utilização de radiações microondas, tornou-se necessário o desenvolvimento de suportes especiais, feitos através de polipropileno, os quais possuem a característica de serem transparentes às radiações microondas, ou seja, não sofrem aquecimento durante a secagem do papel por radiações microondas.

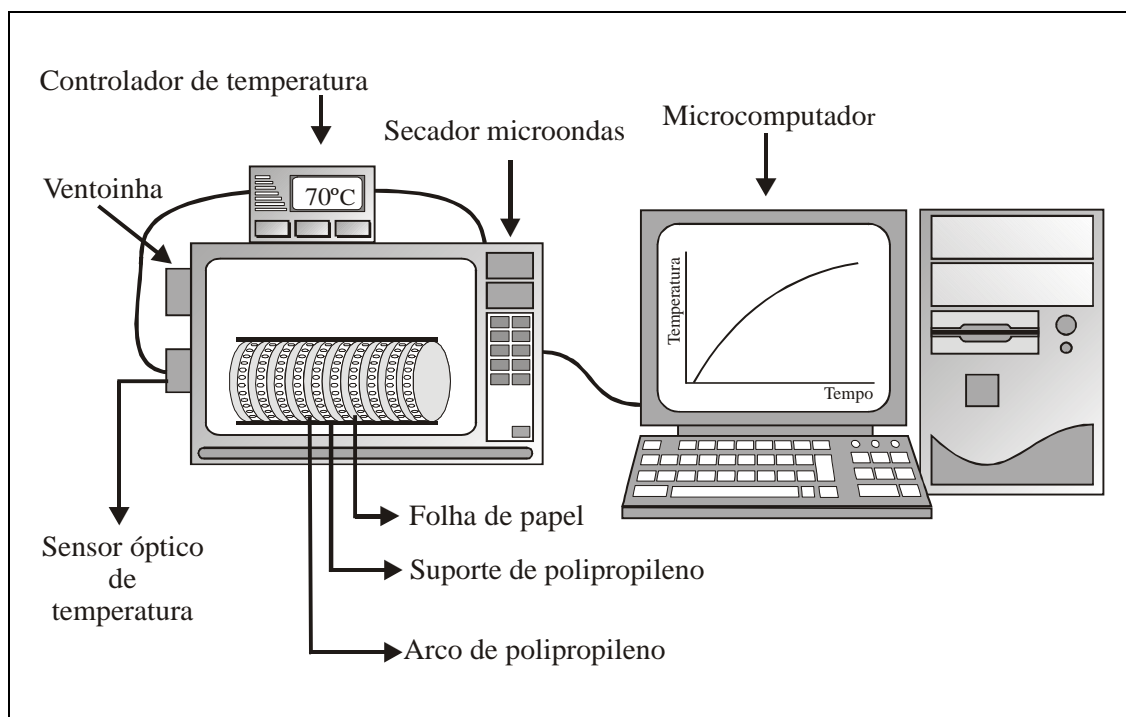


Figura 5 - Esquema representativo da secagem de papel por radiações microondas.

3.6. Atividade de reciclagem de papel

Foi produzida uma quantidade suficiente de folhas de papel, provenientes de fibras primárias. Uma parte dos papéis foi condicionada para testes, enquanto a restante foi hidratada por um período de 24 horas e, posteriormente, desagregada em um desagregador laboratorial para confecção de novas folhas, compondo, assim, o primeiro ciclo de reciclagem. Esta operação de reciclagem ocorreu por mais três vezes, formando um total de quatro ciclos de reciclagem: nível 0 ou papel não reciclado; primeiro ciclo; segundo; terceiro e quarto ciclos de reciclagem.

Um número de quatro ciclos de reciclagem foi estabelecido, em razão de as maiores alterações de qualidade dos papéis ocorrerem nos dois primeiros ciclos de reciclagem, havendo posteriormente, tendências à estabilização, principalmente a partir do quarto ciclo (OLIVEIRA & SABIONI, 1998). Vale

ressaltar que, por ter sido utilizada uma polpa primária de baixo Schopper-Riegler (21° SR), existe uma menor probabilidade de ocorrência de alterações nas propriedades dos papéis, em comparação, com uma eventual utilização de polpa primária de elevado Schopper-Riegler.

3.7. Métodos e realização das análises

Os efeitos da secagem por microondas foram analisados nos papéis produzidos com polpas primárias e recicladas, sendo em seguida, comparados àqueles da secagem por ar quente (convencional). As análises das folhas de papel, para todos os tratamentos experimentais, foram realizadas em uma sala de ambiente climatizado, com temperatura de $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 2\%$, segundo a norma TAPPI T 402 om-93.

Foi analisado um total de dez tratamentos experimentais, ou seja, para os dois processos de secagem, foram avaliadas folhas de papel não recicladas e as produzidas em quatro diferentes níveis de reciclagem. Assim, foi feita uma comparação da influência desses dois sistemas de secagem nas propriedades dos papéis e suas fibras, principalmente em relação aos efeitos que cada um desses processos de secagem acarretam nas propriedades dos papéis e de suas fibras, quando submetidos a sucessivos ciclos de reciclagem.

3.7.1. Análises dimensionais das fibras

As características dimensionais de comprimento, largura, diâmetro de lúmen e espessura de parede das fibras foram determinadas, utilizando-se um microscópico óptico-digital do tipo Olympus modelo PV10-CB. O sistema possui uma câmara de vídeo, que permite a apresentação das imagens lidas. Esse vídeo microscópico é conectado a um microcomputador, dotado de um software

analisador de imagens com capacidade para armazenar e mensurar as imagens captadas.

Para proceder esta análise, as fibras foram hidratadas durante, no mínimo, 24 horas e, em seguida, submetidas à agitação para completa individualização. Assim, foram analisadas 100 fibras por cada tratamento.

As análises foram realizadas em fibras inteiras. As fibras quebradas ou com defeitos em sua estrutura não foram avaliadas para efeito de suas dimensões. Fato este, não considerado na análise com Galai CIS-100 ou Kajaani. Nestes aparelhos, todo o material fibroso é mensurado, incluindo fibras inteiras e quebradas, o que acarreta diferenças nos resultados das dimensões médias das fibras avaliadas no microscópio óptico digital.

3.7.2. Análise do material fibroso

Nesta análise, mensurou-se, o número de fibras/grama, o valor de coarseness e teores de finos presentes no material fibroso. Como finos, considerou-se todos os elementos com dimensões iguais ou inferiores a 0,07 mm. Esta análise foi realizada com o auxílio do equipamento do tipo Galai CIS-100. Este instrumento é conectado a um microcomputador, que permite armazenamento dos dados e a determinação das propriedades físicas do material fibroso.

Na realização das análises em triplicatas, foram preparadas, para cada amostra, suspensões em água do material fibroso na consistência de 0,001%, com um tempo de hidratação de 24 horas, aproximadamente. A preparação das suspensões foi feita, utilizando-se balão volumétrico, água destilada, dispersante (2,0 % base polpa) e agitador magnético.

Amostras, equivalente a 700 mL cada de suspensão de fibras, foram inseridas no Galai CIS-100. O sistema computadorizado deste aparelho permite que a suspensão de fibras seja circulada, através de uma cubeta de quartzo, numa

velocidade constante, ocorrendo a incidência de um feixe de laser gerador das imagens, que são coletadas por uma vídeo câmara e, então, armazenadas e analisadas com auxílio do software Wshape. Os resultados das análises, fornecidos pelo software, são apresentados em forma de gráficos e planilhas.

3.7.3. Análise da seção transversal da parede das fibras

Uma análise da seção transversal da parede das fibras dos papéis foi feita através de microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se um microscópio do tipo Jeol modelo JCXA733. Assim, para os dois processos de secagem realizados, foram avaliadas as alterações ocorridas nas fibras dos papéis não reciclados e dos papéis do quarto nível de reciclagem.

O procedimento de preparo das amostras de papel foi realizado em cinco etapas: manutenção das amostras em álcool a 95%, durante 2 horas, para permitir a desidratação do material; transferência das amostras para uma solução de álcool + resina do tipo metacrilato na proporção de 1:1, por um intervalo de tempo de 4 horas, sob vácuo; permanência do material em resina pura, durante 12 horas; adição de resina + endurecedor para proporcionar a solidificação dos blocos, contendo as amostras de papel; execução do corte transversal das amostras de papel em espessura de 4 μm , utilizando-se micrótomo.

As seções transversais, obtidas com os cortes, foram transferidas para um suporte apropriado e submetidas a um procedimento de metalização, ou seja, as amostras foram encobertas por ouro-paládio (25 ηm de espessura), a fim de permitir a visualização das fibras no microscópio eletrônico. Posteriormente, as imagens foram obtidas com uma ampliação de 3.000 vezes.

3.7.4. Análise de carboidratos

Inicialmente, foi feita a hidrólise de 300 mg de cada amostra de papel, absolutamente seca, com 3 mL de H₂SO₄ a 72 % por um período de 60 minutos, sob uma temperatura de 30^oC. Após esta etapa, as amostras foram transferidas para frascos de vidro de 100 mL, juntamente com 84 mL de água deionizada. Esses frascos foram lacrados e levados para uma autoclave, a fim de concluir a hidrólise do material, sob uma pressão em torno de 103 kPa e temperatura próxima a 120 ^oC, por um período de 60 minutos. Em seguida, foram transferidos para balões volumétricos de 250 mL, completando-se o volume com água deionizada.

Na preparação final de cada amostra, foi transferido para um becker, 50 mL do material hidrolisado, ajustando-se o pH para 5,00 a 5,50, através da neutralização com hidróxido de bário. Logo após, esse material foi filtrado sem aplicação de vácuo.

As amostras, já preparadas, foram analisadas por cromatografia líquida de alta eficiência, através de um cromatógrafo do tipo Shimadzu, modelo SCL-10A. O tempo gasto para análise de cada material foi de 70 minutos, aproximadamente.

3.7.5. Análises físicas e mecânicas dos papéis

As análises físicas e mecânicas dos papéis foram realizadas com base nas normas TAPPI, exceto aquela da propriedade de maciez do papel, que foi realizada conforme a norma da ABTCP, apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Análises físicas e mecânicas realizadas nas folhas de papéis e suas respectivas normas.

Testes	Normas
Gramatura	TAPPI T 410 om-98
Espessura	TAPPI T 411 om-97
Peso específico aparente	TAPPI T 220 sp-96
Volume específico aparente	TAPPI T 220 sp-96
Maciez	ABTCP P 35/94
Capilaridade Klemm	TAPPI T 441 om-90
Resistência à passagem de ar	TAPPI T 536 om-96
Índice de rasgo	TAPPI T 414 om-98
Índice de tração*	TAPPI T 494 om-96
Módulo de elasticidade específico*	TAPPI T 494 om-96
Energia de deformação*	TAPPI T 494 om-96
Índice de brancura CIE**	TAPPI T 560 pm-96
Alvura**	TAPPI T 452 om-99
Opacidade**	TAPPI T 519 om-96
Coeficiente de dispersão de luz***	TAPPI T 220 sp-96
Índice de amarelecimento***	TAPPI T 1216 sp-98
Índice de retenção de água	TAPPI Useful Method 256

* Realizado no aparelho INSTRON modelo 4204 com sistema computadorizado de aquisição, análise e saída de dados, com distância entre garras de 100 mm, velocidade de teste de 25 mm/minuto e capacidade da célula de carga de 1.000 N.

** Realizado no aparelho DATACOLOR modelo ELREPHO 450X.

*** Realizado no aparelho DATACOLOR modelo ELREPHO 2000.

3.7.6. Análise estatística

A avaliação estatística dos resultados foi feita, através da análise de identidade de modelos. Segundo REGAZZI (1993), este procedimento permite a comparação estatística entre curvas. Assim, esta análise foi realizada, comparando-se o *F calculado* com *F tabelado* dos parâmetros das regressões, ao nível de 5% de probabilidade.

As curvas gráficas, que não apresentaram diferenças estatísticas significativas, aparecem representadas por uma mesma linha. Devido ao fato de

todos os tratamentos experimentais apresentarem o mesmo número de repetições, permitiu-se que os valores do coeficiente de determinação (R^2) de todas as curvas de regressão fossem obtidos, considerando-se os valores médios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Influência da secagem por radiações microondas e através de ar quente nas propriedades das fibras

Segundo os autores ELLIS e SEDLACHEK (1993), HOWARD (1990), NAZHAD e PASZNER (1994), os efeitos provocados pela secagem levam a um enrijecimento da fibra, o que proporciona uma redução em sua capacidade de intumescimento, quando hidratada. Além da perda de flexibilidade das fibras, o processo de reciclagem proporciona alterações nas dimensões e propriedades estruturais do material fibroso.

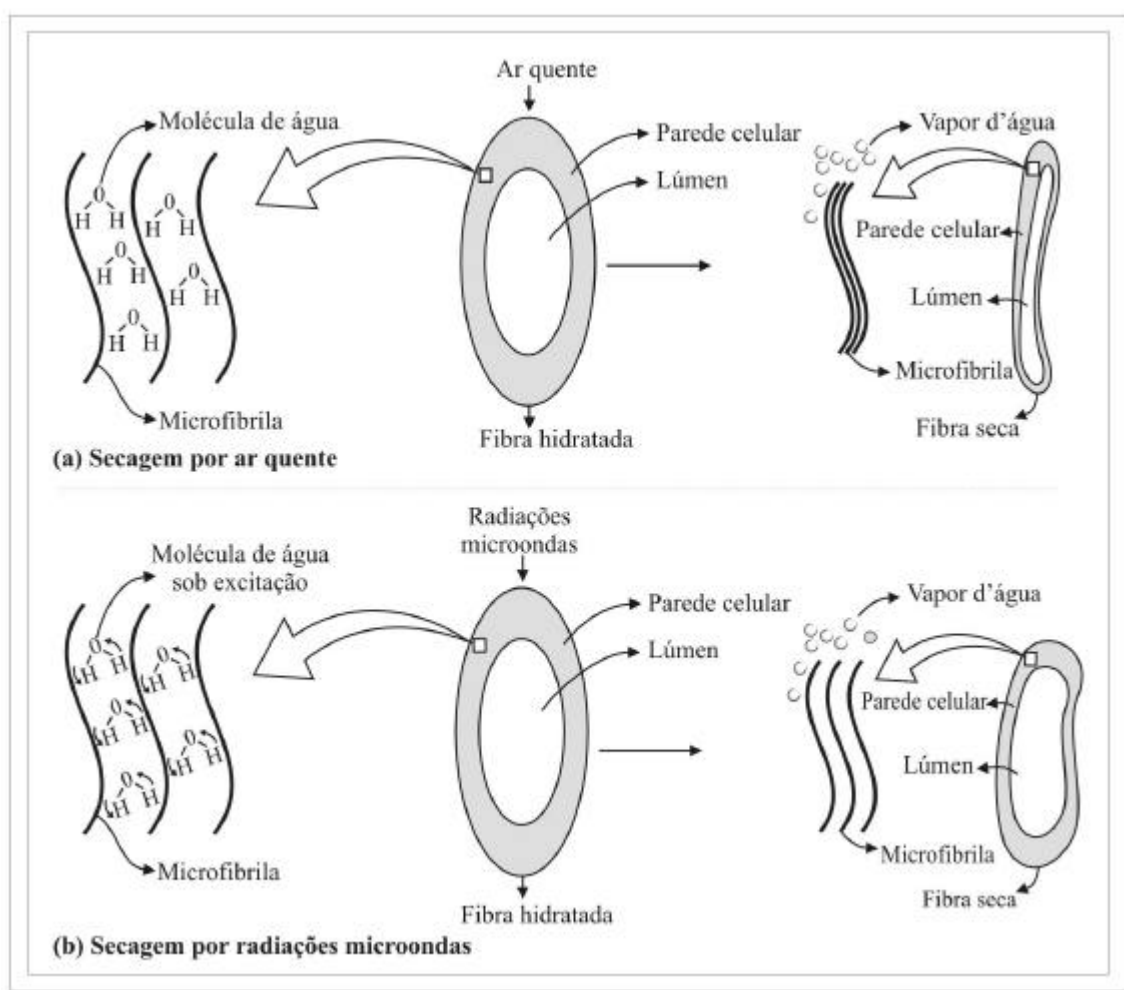


Figura 6 - Esquema diferenciando os efeitos dos mecanismos de secagem por ar quente e por radiações microondas nas fibras dos papéis.

A Figura 6 apresenta uma proposta esquemática, em que o processo de secagem por radiações microondas é diferenciado daquele da secagem por ar quente. Observou-se que a secagem por radiações microondas, por proporcionar uma excitação e, conseqüentemente, um aquecimento preferencial das moléculas de água, presentes na estrutura da fibra, permite uma secagem menos drástica, em comparação com a secagem por ar quente. Isto parece causar maior preservação das microfibrilas, que compõem a parede celular, causando, conseqüentemente, menores danos e colapso na estrutura das fibras.

4.1.1. Índice de retenção de água das fibras (WRV)

Não houve diferença estatística significativa entre os dois processos de secagem, quanto ao índice de retenção de água das fibras. Portanto, pode-se representar por uma única curva de regressão, o comportamento do WRV das fibras com o incremento dos ciclos de reciclagem dos papéis para os dois processos de secagem utilizados.

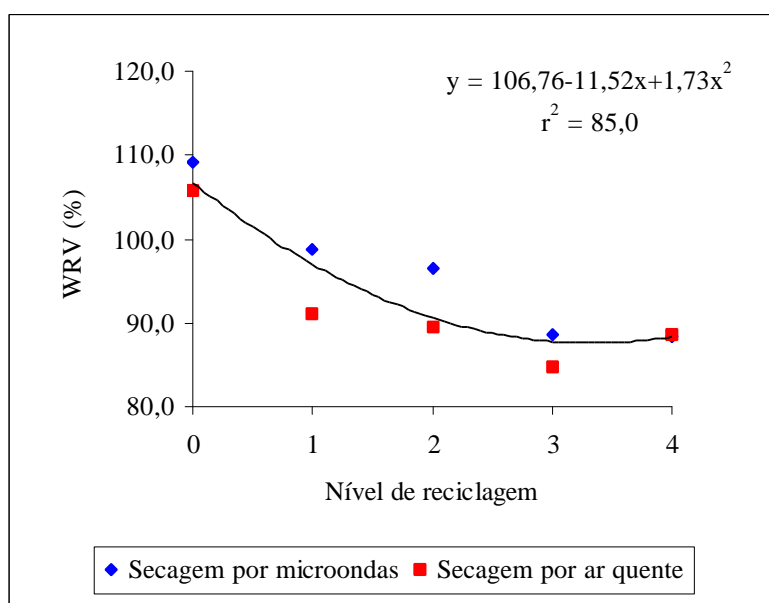


Figura 7 - WRV das fibras em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Na Figura 7, observa-se uma tendência geral de redução do WRV das fibras com o incremento dos ciclos de reciclagem dos papéis, em relação aos dois processos de secagem. A maior taxa de redução (9,2%) desta propriedade, entre todos os níveis de reciclagem, ocorreu durante o primeiro reciclo. Tal fato mostra que a reciclagem afeta, negativamente, a capacidade de absorção de água das fibras, assim como a grande perda ocorrida, durante o primeiro reciclo, é intensificada com o prolongamento dos ciclos de reciclagem dos papéis.

4.1.2. Propriedades dimensionais das fibras

As propriedades de espessura de parede celular, comprimento e largura de fibra apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os dois processos de secagem. No entanto, a tendência do comportamento do diâmetro de lúmen das fibras com o incremento dos ciclos de reciclagem não apresentou diferença estatística significativa, em relação aos dois processos de secagem e, portanto, é representada por uma única curva de regressão.

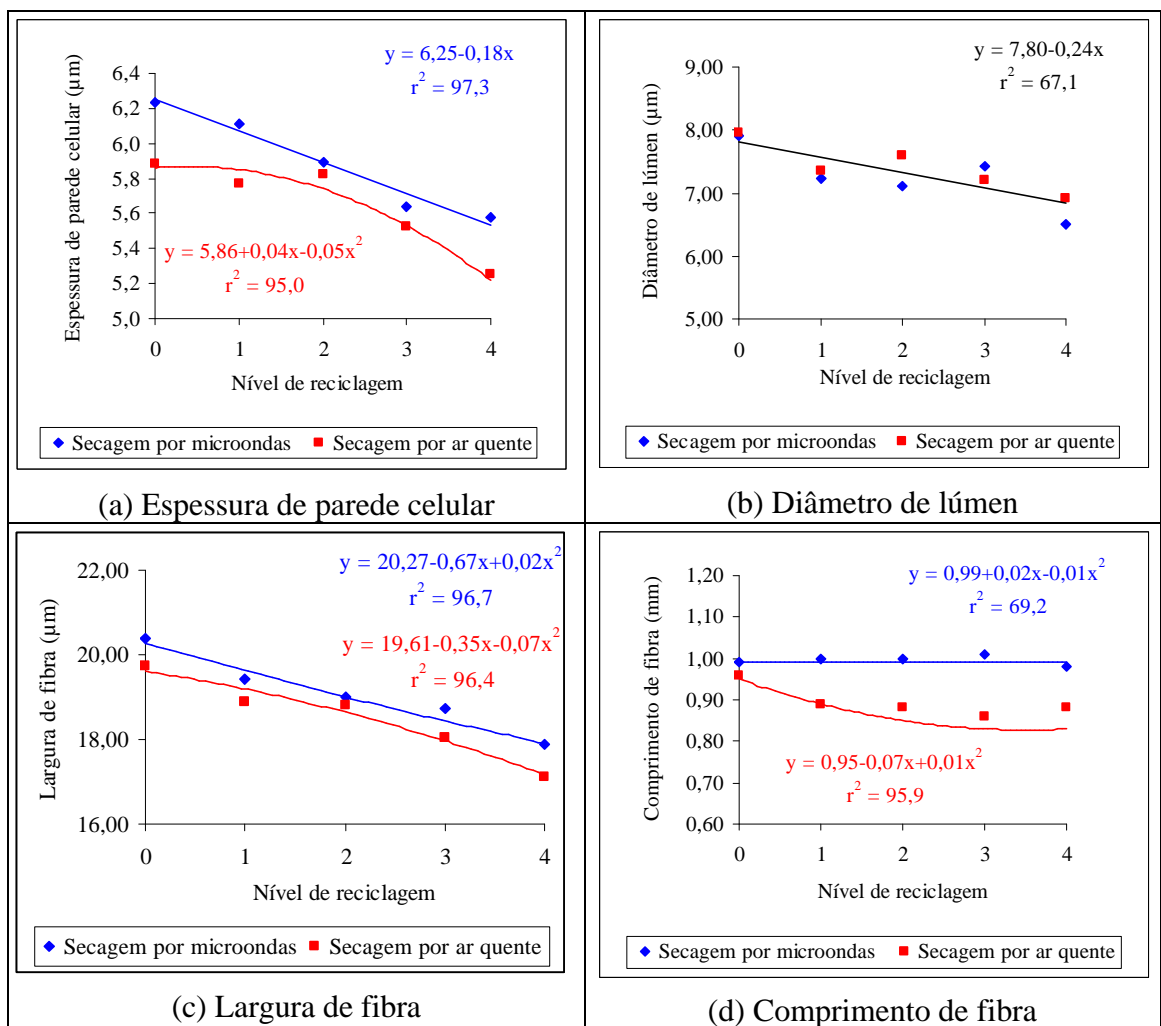


Figura 8 - Espessura de parede celular, diâmetro de lúmen, largura e comprimento de fibra em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

O prolongamento dos ciclos de reciclagem dos papéis proporcionou uma redução na espessura da parede celular, diâmetro de lúmen e largura das fibras para os dois processos de secagem. O comportamento dessas propriedades, com o incremento dos ciclos de reciclagem dos papéis, pode ser observado nas Figuras 8a, 8b e 8c, respectivamente. O desempenho do comprimento das fibras com o incremento dos ciclos de reciclagem (Figura 8d) apresentou tendências diferentes para os dois processos de secagem. A secagem por radiações microondas, ao contrário da secagem através de ar quente, permitiu a preservação desta propriedade durante os sucessivos ciclos de reciclagem dos papéis.

Conforme descrito, a espessura de parede celular, a largura e o comprimento das fibras, representados nas Figuras 8a, 8c e 8d, foram as únicas propriedades a apresentar diferenças significativas quanto aos dois processos de secagem, sendo os maiores valores obtidos na secagem por radiações microondas, indicando que esta proporciona menos danos a essas estruturas. Possivelmente, isto ocorre devido a um aquecimento preferencial das moléculas de água presentes na estrutura das fibras, permitindo que a secagem por radiações microondas seja menos intensa e mais homogênea.

4.1.3. Propriedades do material fibroso

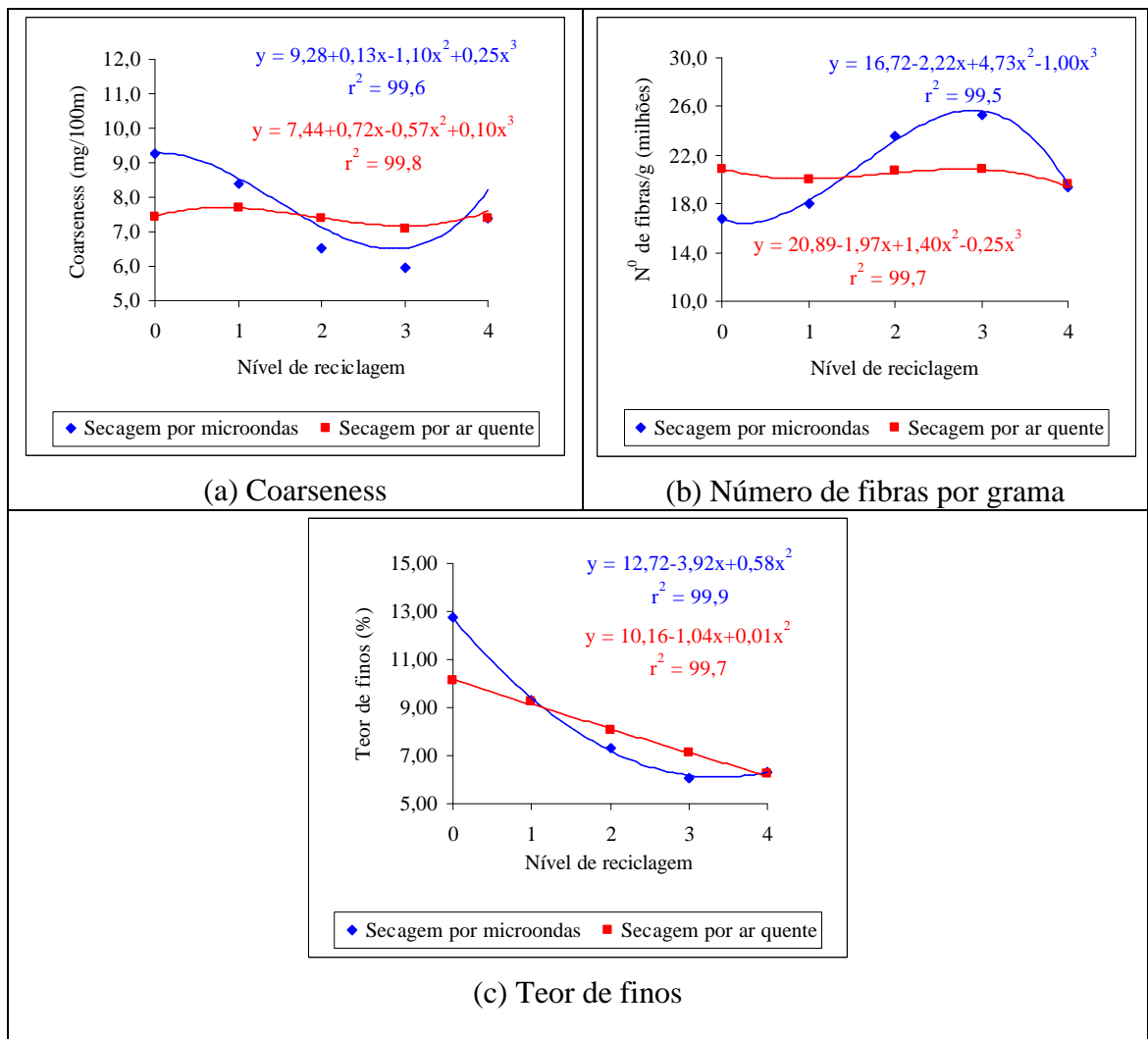


Figura 9 - Coarseness, número de fibras por grama e teor finos em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

As Figuras 9a, 9b e 9c relacionam a propriedade de coarseness, o número de fibras por grama e o teor de finos ao incremento no nível de reciclagem dos papéis, respectivamente, indicando uma diferença significativa para as três propriedades entre os dois processos de secagem utilizados.

A utilização de um material fibroso com elevado teor de finos aumentará a resistência à drenabilidade da polpa, o que geralmente causa redução na velocidade da máquina de papel. Pelo fato de possuírem uma alta superfície de contato, as partículas de finos possibilitam um incremento no número de ligações entre a rede de fibras da estrutura do papel, o que permite uma redução no número de espaços vazios, como também uma possibilidade de melhora na resistência mecânica dos papéis.

Conforme a Figura 9a, a propriedade de coarseness das fibras apresentou um comportamento de redução até o terceiro ciclo de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas. Entretanto, o último nível de reciclagem proporcionou um considerável ganho percentual de 25,8% em relação ao nível anterior. Os papéis submetidos à secagem por ar quente apresentaram uma tendência um pouco diferente. Assim, após um discreto ganho no valor de coarseness das fibras (3,4%), com o primeiro ciclo de reciclagem, houve uma pequena perda no valor desta propriedade até o terceiro ciclo de reciclagem dos papéis. No último nível de reciclagem, houve um ganho de 6% em coarseness em relação ao nível anterior.

O comportamento do número de fibras por grama com o incremento no nível de reciclagem indica uma relação com a propriedade de coarseness das fibras (Figura 9b). Deste modo, o enfraquecimento das fibras devido às sucessivas etapas de secagem possibilita o surgimento de quebras e aumento no número de fibras por grama, resultando um decréscimo no valor de coarseness das fibras. A inversão de tendência ocorrida no último nível de reciclagem, em ambos os processos de secagem, ou seja, o decréscimo no número de fibras por grama pode estar indicando uma perda de parte dessas partículas de fibras quebradas e, conseqüentemente, acarretando tendência para preservação das fibras com maiores valores de coarseness.

A Figura 9c mostra que a secagem por microondas proporciona papéis primários com maior teor de finos, que decresce com o incremento no nível de

reciclagem. Este comportamento de redução no teor de finos apresentou-se um pouco diferente para os dois processos de secagem. Observa-se que a secagem por radiações microondas proporcionou uma perda de finos mais acentuada, com o primeiro ciclo de reciclagem dos papéis, ao passo que com o prolongamento dos ciclos houve uma tendência à redução das perdas. Entretanto, os papéis submetidos à secagem por ar quente apresentaram uma perda de finos mais constante, em todos os níveis de reciclagem.

4.1.4. Análise da seção transversal da parede das fibras

Na análise estrutural dos cortes transversais das fibras presentes nos papéis, em microscópico eletrônico de varredura foi possível comparar as alterações proporcionadas pelos dois processos de secagem das fibras dos papéis não reciclados e papéis do último nível de reciclagem.

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi um pouco prejudicada, em razão da fraca definição das imagens impressas. Provavelmente, tal ocorrência seja devido ao fato de o aparelho utilizado ser relativamente antigo e não proporcionar boa impressão das imagens. No monitor do microscópio, entretanto, foram encontradas alterações bastante visíveis na estrutura das fibras.

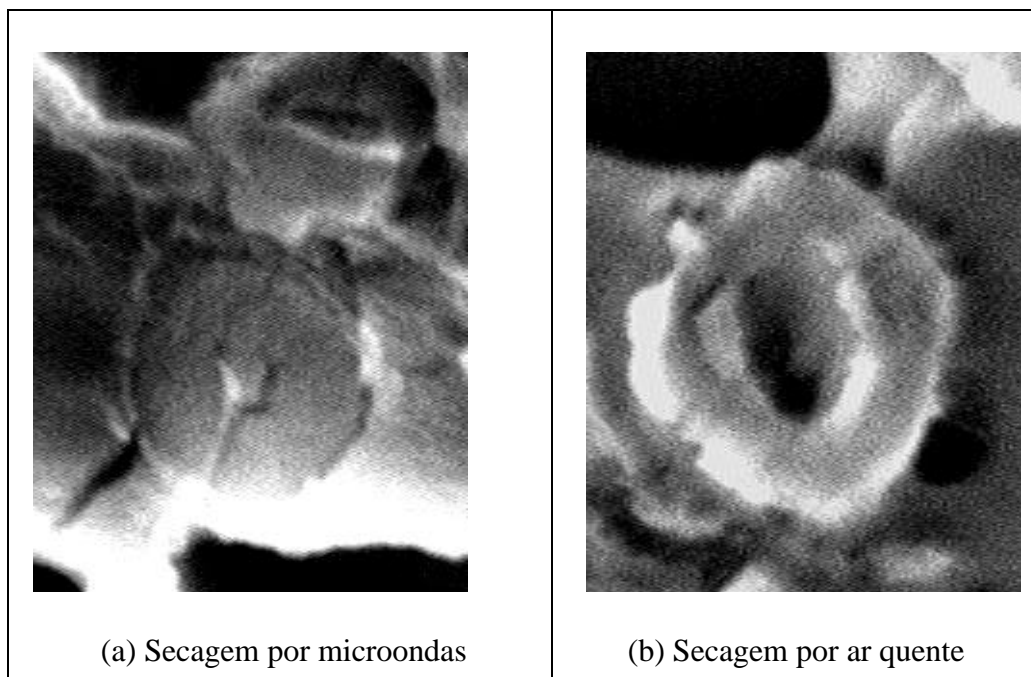


Figura 10 - Imagens de cortes transversais de fibras não recicladas, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura. Ampliação de 3.000x.

Nas Figuras 10a e 10b, ressaltam-se algumas diferenças na seção transversal das fibras entre os dois processos de secagem, realizados em papéis não reciclados. Nota-se que as fibras de papéis, secados por radiações microondas, possuem uma maior espessura de parede celular, bem como, o volume do lúmen apresenta-se reduzido, em comparação com as fibras dos papéis secados por ar quente.

Essas diferenças encontradas mostram que a secagem de papel por radiações microondas permite, através de seu mecanismo de aquecimento mais homogêneo, uma menor alteração estrutural das fibras. Deste modo, parece existir um aquecimento preferencial e simultâneo das moléculas de água, presentes na parede celular das fibras, evitando o colapso mais intenso das fibras. Este mecanismo de aquecimento parece proporcionar uma secagem uniforme e menos intensa, comparativamente ao sistema de ar quente.

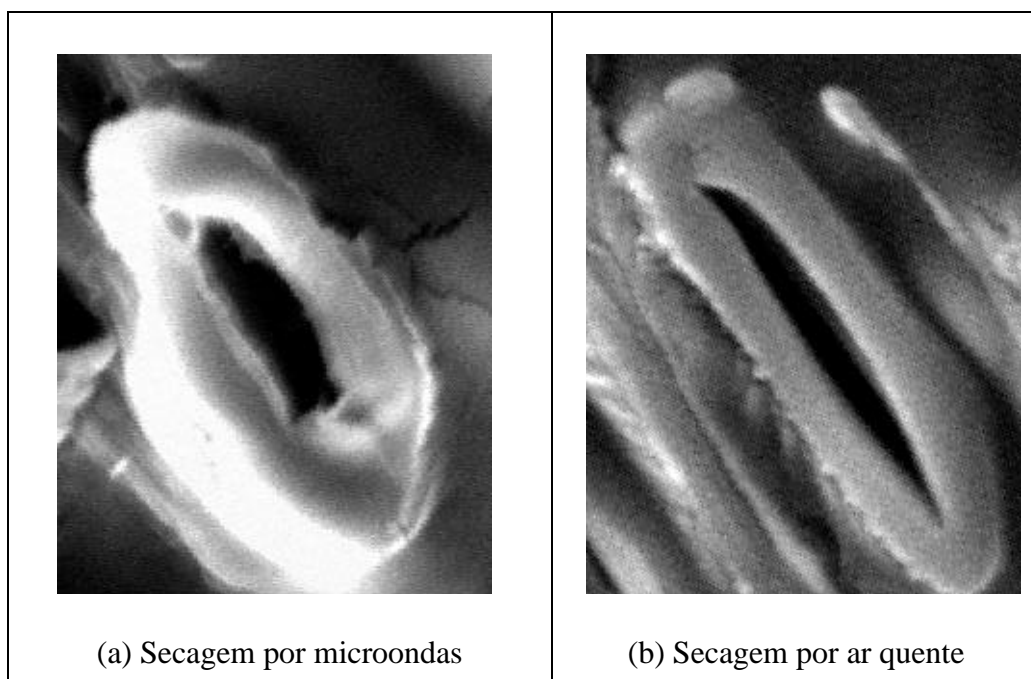


Figura 11 - Imagens de cortes transversais de fibras do quarto nível de reciclagem, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura. Ampliação de 3000x.

Nas Figuras 11a e 11b, observa-se que para as fibras dos papéis referentes ao quarto nível de reciclagem, também, ocorreram diferenças entre os dois processos de secagem. As fibras do papel, secado através de radiações microondas, apresentaram uma maior fração parede. Isto indica maiores possibilidades de preservação da estrutura da parede das fibras, ao longo dos sucessivos ciclos de reciclagem, na secagem por microondas.

Um fato importante a ser ressaltado refere-se às mudanças ocorridas na estrutura das fibras do papel do quarto nível de reciclagem (Figuras 11a e 11b), em comparação com as fibras do papel não reciclado (Figuras 10a e 10b). Observa-se que, para os dois processos de secagem, houve uma redução na espessura de parede celular e, principalmente, um visível colapso das fibras com o processo de reciclagem.

A redução na espessura da parede celular das fibras, com o tratamento de secagem dos papéis por ar quente, está de acordo com os resultados reportados na

literatura (KIBBLEWHITE & BAILEY, 1988; BAWDEN & KIBBLEWHITE, 1997).

4.2. Teor de carboidratos

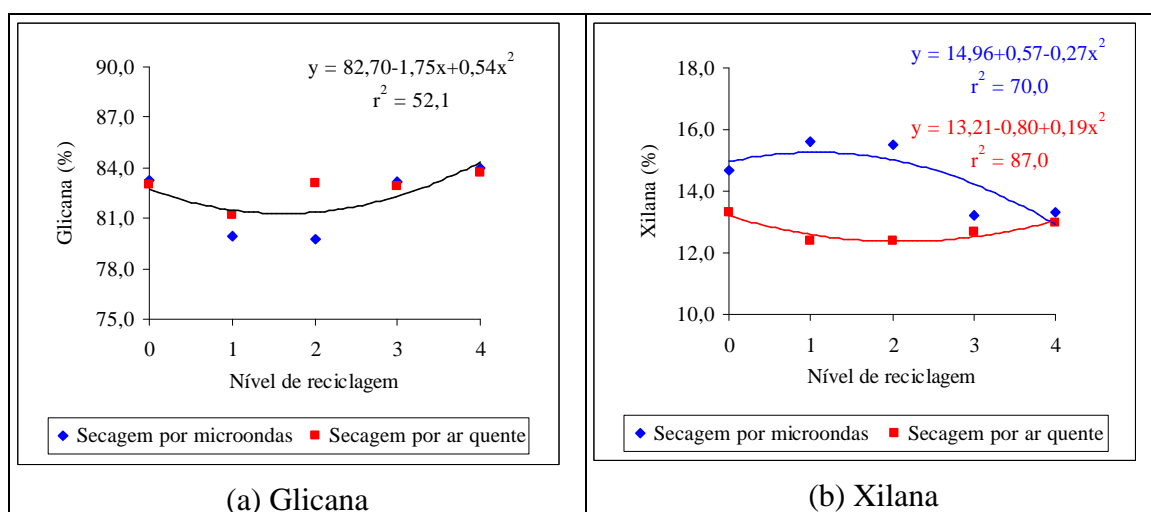


Figura 12 - Teor de glicana e de xilana em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Houve uma diferença significativa, em relação ao teor de xilana, entre os dois processos de secagem (Figura 12b). Já o gráfico que relaciona o teor de glicana com o incremento no nível de reciclagem dos papéis, para os dois processos de secagem, pode ser representado por uma única curva de regressão (Figura 12a).

Na Figura 12a, observa-se que para os dois processos de secagem, após uma pequena redução (1,5%) com os dois primeiros níveis de reciclagem, existe uma tendência ao incremento na preservação do teor de glicana com o prolongamento dos ciclos de reciclagem dos papéis. Assim, os papéis obtidos no último nível de reciclagem apresentaram um incremento na preservação do teor de glicana de, aproximadamente, 2,5% em relação aos papéis de fibras primárias,

indicando que as cadeias de celulose são consideravelmente resistentes à degradação, durante o processo de reciclagem dos papéis.

De acordo com a Figura 12b, o comportamento do teor de xilana com o incremento no nível de reciclagem dos papéis apresentou tendências diferentes, em relação aos dois processos de secagem. Desta forma, os papéis secados por radiações microondas tiveram uma pequena elevação na preservação do teor de xilana, no primeiro nível de reciclagem (aproximadamente 2,0%), seguido-se um decréscimo com o prolongamento dos ciclos de reciclagem. Os papéis do quarto nível de reciclagem apresentaram uma perda de xilana em torno de 13,6%, em relação aos papéis de fibras primárias.

Os papéis do quarto nível de reciclagem, secados por ar quente, também apresentaram perda de xilana em relação aos papéis de fibras primárias, sendo esta perda em torno de 1,2%, apesar de os dois últimos níveis de reciclagem proporcionarem um pequeno ganho percentual de preservação de xilana. Este comportamento causou uma certa estranheza, pois, esperava-se uma tendência de decréscimo com o prolongamento dos ciclos de reciclagem.

O maior conteúdo de xilana, presente nos papéis secados por radiações microondas, talvez esteja relacionado ao mecanismo de aquecimento, provocado pelas radiações microondas, em que se observa uma secagem mais seletiva e menos intensa que a secagem por ar quente. Isto pode estar proporcionando uma menor degradação das hemiceluloses. Por outro lado, a secagem por ar quente, por iniciar o aquecimento na superfície do papel, com o posterior aquecimento da parte interna, através de um gradiente de temperatura, favorece a uma secagem desigual, em que a parte externa do papel é intensamente aquecida, antes que a temperatura interna do papel se eleve de forma apropriada.

4.3. Influência da secagem por radiações microondas e através de ar quente nas propriedades dos papéis

Para a maioria das propriedades dos papéis, no presente estudo, não houve diferenças estatísticas significativas entre a secagem por radiações microondas e a secagem através de ar quente. A maciez dos papéis foi a única propriedade que apresentou valores, estatisticamente, diferentes entre os dois processos de secagem.

4.3.1. Índice de tração

Na Figura 13, observa-se que estatisticamente não houve diferença significativa no índice de tração dos papéis, quanto à secagem por radiações microondas e a secagem através de ar quente. Portanto, o comportamento do índice de tração dos papéis em relação ao incremento no número de ciclos para os dois processos de secagem, é representado por uma única curva de regressão.

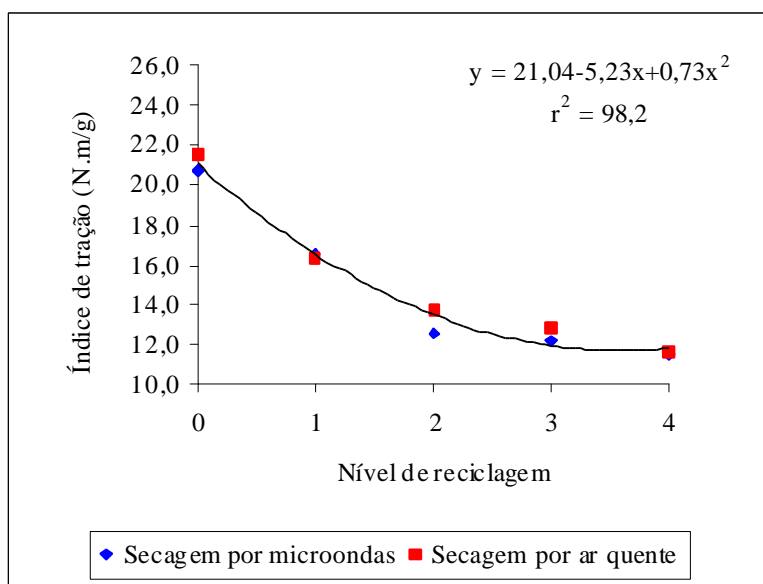


Figura 13 - Índice de tração em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

A Figura 13 mostra que os papéis tiveram uma tendência a reduzir seus valores de índice de tração, com o incremento no número de ciclos, sendo que os papéis do último nível de reciclagem apresentaram uma perda total de 43,9%, em relação aos papéis de fibras primárias. A reciclagem prejudicou consideravelmente, e com a mesma intensidade, a propriedade de índice de tração dos papéis, para os dois processos de secagem. Assim, como o índice de tração é influenciado, principalmente, pelo número de ligações interfibrilares, pode-se inferir que tanto a secagem por radiações microondas como a secagem por ar quente alteram a capacidade de ligação das fibras na formação das folhas de papéis, ou seja, os danos nas fibras proporcionados pelos dois diferentes processos de secagem causam redução na capacidade das fibras em formar ligações. Entretanto, a secagem por radiações microondas que, no presente trabalho, mostrou-se menos danosa às fibras, não permitiu melhores valores para esta propriedade do papel, mas, também não prejudicou.

4.3.2. Índice de rasgo

Não houve diferença estatística significativa no índice de rasgo dos papéis, entre os dois processos de secagem. Pode-se então representar, por uma única curva de regressão, o comportamento do índice de rasgo dos papéis com o incremento no número de ciclos para os dois processos de secagem.

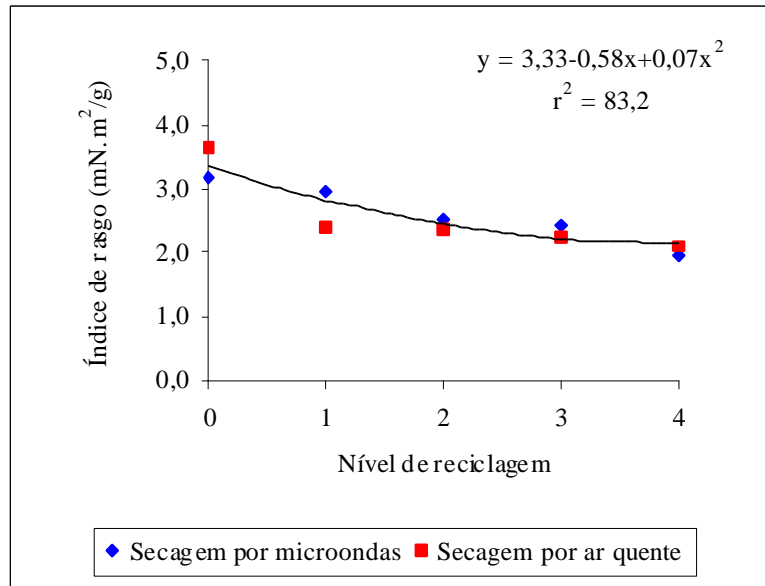


Figura 14 - Índice de rasgo em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Na Figura 14, observa-se que o índice de rasgo foi reduzido com o incremento no nível de reciclagem dos papéis. Deste modo, semelhantemente, ao que ocorreu com a propriedade de índice de tração, o primeiro ciclo de reciclagem proporcionou a maior taxa de redução (15,3%) no valor de índice de rasgo dos papéis, dentre todos os ciclos de reciclagem.

Os papéis referentes ao último ciclo de reciclagem apresentaram uma perda de 36,0% no índice de rasgo, em relação aos papéis de fibras primárias. Esta redução percentual da propriedade de índice de rasgo dos papéis, após o terceiro ciclo de reciclagem, foi um pouco menor, em comparação com a propriedade de índice de tração (apresentada no subitem 4.3.1). Uma provável explicação seria o fato de o índice de rasgo sofrer menos influência do número de ligações interfibrilares do que a propriedade de índice de tração.

Tanto o mecanismo de secagem por radiações microondas, quanto a secagem por ar quente afetaram, com a mesma intensidade, a propriedade de índice de rasgo dos papéis. Desta forma, tal como foi observado para o índice de tração, a secagem por radiações microondas, embora menos danosa às fibras, não

proporcionou melhores valores de índice de rasgo dos papéis, em comparação com a secagem por ar quente.

4.3.3. Módulo de elasticidade específico

Estatisticamente, não houve diferença significativa no módulo de elasticidade específico dos papéis entre os dois processos de secagem utilizados. Portanto, pode-se representar por uma única curva de regressão, o comportamento desta propriedade com o incremento do nível de reciclagem dos papéis para aos dois processos de secagem.

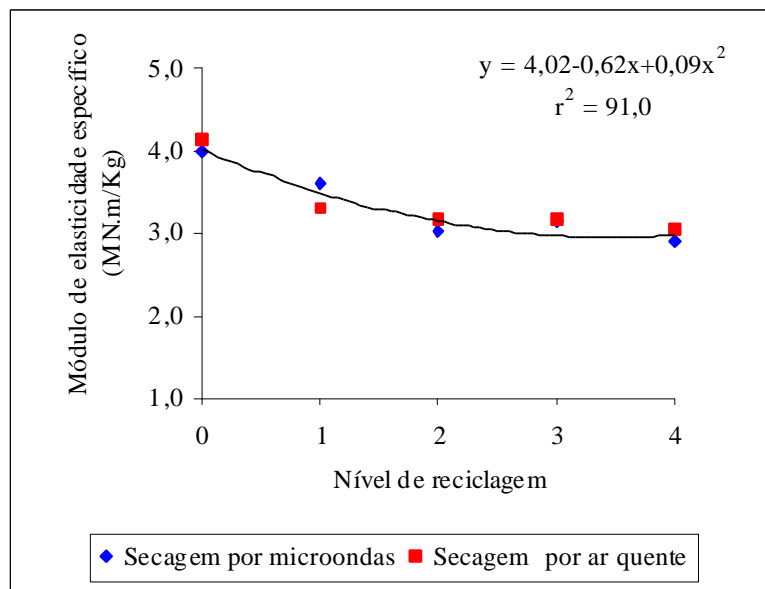


Figura 15 - Módulo de elasticidade específico em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Na Figura 15, observa-se que o módulo de elasticidade específico dos papéis foi reduzido com o incremento nos ciclos de reciclagem. Os papéis do último nível de reciclagem apresentaram uma perda de propriedade de 25,9%, em relação aos papéis de fibras primárias. Isto é devido, principalmente, à redução

na capacidade de ligação das fibras decorrente dos sucessivos processos de reciclagem dos papéis. Conforme observado para outras propriedades, houve um decréscimo na perda de módulo de elasticidade específico dos papéis, com o prolongamento no número de ciclos.

Apesar de proporcionar um aquecimento mais drástico e desigual, a secagem por ar quente não proporcionou menores valores de resistência à deformação dos papéis, em comparação com a secagem de papéis por microondas. Parece que os dois diferentes mecanismos de aquecimento dos papéis, apesar de interferirem, de diversos modos, nas propriedades das fibras, contribuem, com a mesma intensidade, na redução da habilidade de ligação das fibras dos papéis formados.

4.3.4. Resistência à passagem de ar

Não houve diferença estatística significativa, quanto à resistência à passagem de ar dos papéis, entre os dois processos de secagem. Pode-se, portanto, representar por uma única curva de regressão o comportamento desta propriedade com o incremento no nível de reciclagem dos papéis, em relação aos dois processos de secagem.

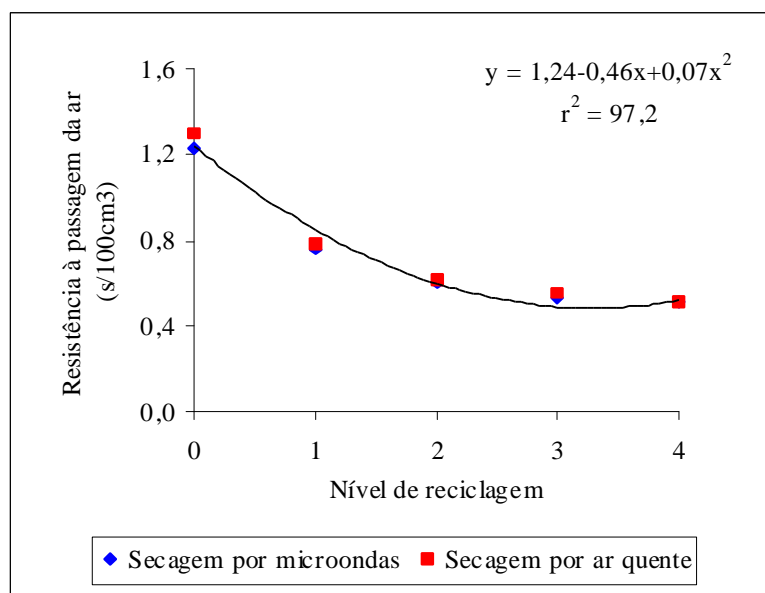


Figura 16 - Resistência à passagem de ar em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

De acordo com a Figura 16, existe uma tendência à redução da resistência à passagem de ar, com o incremento no nível de reciclagem dos papéis. A maior taxa de perda (31,5%), entre todos os níveis de reciclagem, foi encontrada durante o primeiro reciclo. Esta considerável redução da resistência à passagem de ar indica a ocorrência de alterações, na estrutura do papel, devido ao processo de reciclagem, ou seja, existe um aumento do conteúdo de espaços vazios na folha de papel, o que, por sua vez, facilita a passagem de ar.

O aquecimento mais drástico provocado pela secagem por ar quente, apesar de proporcionar uma maior alteração estrutural das fibras, não resultou em maiores danos à estrutura interna dos papéis, em comparação com a secagem por microondas, o que está de acordo com os resultados observados para outras propriedades. O potencial de ligação das fibras, um dos fatores que mais influencia a estrutura interna do papel foi afetado, sob mesma intensidade, tanto para secagem por microondas quanto para secagem por ar quente. Isto levou à obtenção de valores de resistência à passagem de ar, estatisticamente, iguais entre os dois processos de secagem de papéis.

4.3.5. Volume específico aparente

Estatisticamente, não houve diferença significativa no volume específico aparente dos papéis para os dois processos de secagem, o que possibilitou representar, por meio de uma única curva de regressão, o desempenho desta propriedade com o incremento do nível de reciclagem dos papéis para os dois processos de secagem.

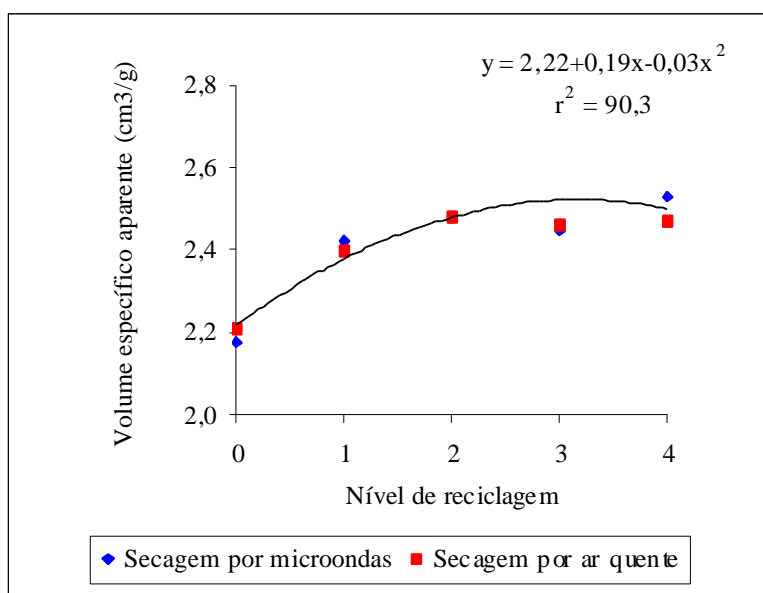


Figura 17 - Volume específico aparente em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Conforme a Figura 17, o comportamento do volume específico aparente dos papéis, com os sucessivos processos de reciclagem, indica que houve uma tendência de incremento em seu valor, sendo que os papéis referentes ao primeiro reciclo apresentaram o maior incremento de propriedade (13,5%), em relação a todos os níveis de reciclagem. Esta tendência permite inferir que o aumento na rigidez das fibras, devido às várias etapas de secagem e, conseqüentemente, a

redução na capacidade de conformação destas, estaria possibilitando a confecção de papéis mais volumosos, independente dos processos de secagem.

Houve uma tendência de decréscimo no ganho de volume específico aparente, em níveis mais elevados de reciclagem dos papéis, o que leva a supor que existe um limite para o aumento desta propriedade, com a elevação da rigidez das fibras.

As fibras dos papéis secados por microondas, por apresentarem uma menor alteração estrutural, comparativamente às fibras dos papéis secados por ar quente, apresentam-se menos rígidas, o que, teoricamente, permitiria a produção de papéis com menores volumes específicos do que os papéis secados por ar quente. Entretanto, isto não foi observado no presente trabalho, ou seja, não houve diferença estatística significativa entre os dois processos de secagem, quanto à propriedade de volume específico dos papéis. A diferença de rigidez entre as fibras, proporcionada pelos dois processos de secagem, não foi suficientemente significativa para possibilitar diferenças de volume específico dos papéis, entre os dois processos de secagem.

4.3.6. Maciez Gurley

Houve uma diferença, estatisticamente, significativa na maciez dos papéis, entre a secagem por radiações microondas e a secagem através de ar quente. As radiações microondas proporcionaram a obtenção de papéis com maior valor de maciez, comparadas à secagem através de ar quente, para todos os níveis de reciclagem.

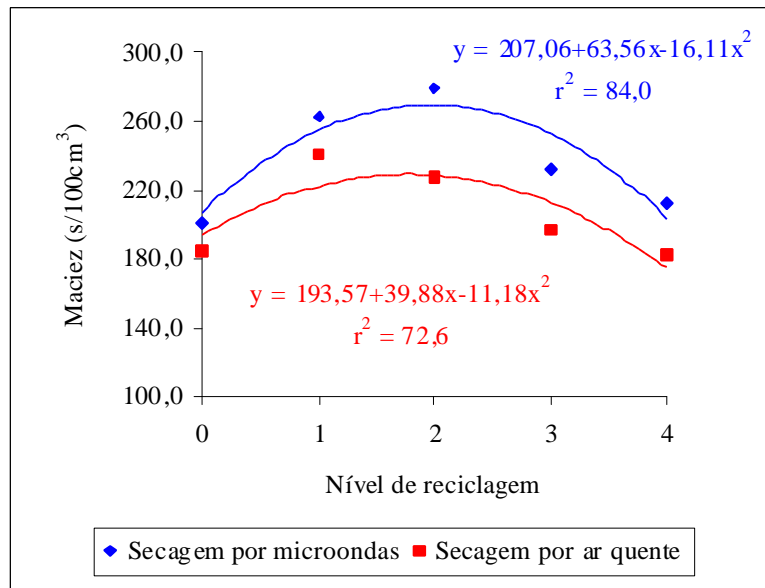


Figura 18 - Maciez em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Na Figura 18, observa-se que o maior incremento na propriedade de maciez, entre todos os níveis de reciclagem, tanto para os papéis secados por radiações microondas como para os papéis secados através de ar quente, ocorreu no primeiro ciclo de reciclagem, apresentando um aumento de 22,9% e 14,8%, respectivamente. Tanto os papéis submetidos à secagem por radiações microondas, quanto os papéis secados através de ar quente, apresentaram os maiores valores absolutos para esta propriedade, durante o segundo reciclo, tendendo à redução com o prolongamento dos níveis de reciclagem dos papéis.

Conforme observado, para as propriedades apresentadas anteriormente, a capacidade de ligação das fibras é reduzida com a reciclagem dos papéis, sendo esta tendência de redução minimizada com o incremento nos ciclos de reciclagem dos papéis. Por outro lado, a reciclagem proporciona um ganho de volume específico dos papéis, sendo este ganho também minimizado com o incremento nos ciclos de reciclagem. Portanto, a influência do potencial de ligação das fibras e do volume específico dos papéis na propriedade de maciez é diminuída com a elevação no nível de reciclagem dos papéis.

Provavelmente, a redução nos valores de maciez dos papéis, observada a partir do terceiro ciclo de reciclagem (Figura 18), pode estar relacionada às características estruturais das fibras. Assim, as contínuas modificações estruturais das fibras, que as leva a tornarem-se mais rígidas e danificadas devido às várias etapas de secagem, seria uma explicação para a redução na maciez superficial dos papéis com o prolongamento dos ciclos de reciclagem.

Devido a secagem por radiações microondas proporcionar um aquecimento preferencial das moléculas de água presentes na estrutura das fibras, ela afeta com menor intensidade as microfibrilas, que compõem a parede celular. Conseqüentemente, esta secagem proporciona uma maior preservação estrutural das fibras, em comparação com a secagem por ar quente. Tal fato pode ser relacionado ao ganho de maciez do papel submetido à secagem por radiações microondas, o que não ocorre no caso da secagem por ar quente.

4.3.7. Capilaridade klemm

Não houve diferença significativa no valor de capilaridade klemm dos papéis, estatisticamente, em relação aos dois processos de secagem. Assim, pode-se representar o comportamento desta propriedade, mediante o incremento nos ciclos de reciclagem dos papéis para os dois processos de secagem, por uma única curva de regressão.

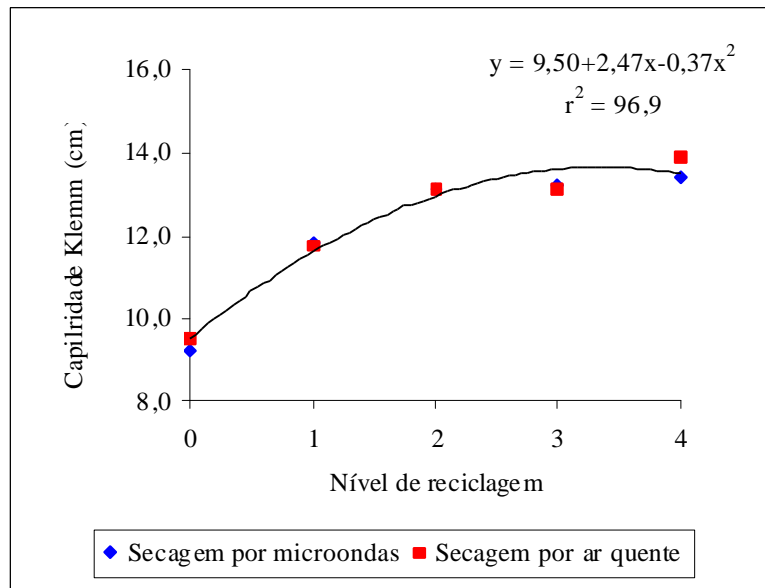


Figura 19 - Capilaridade klemm em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Na Figura 19, o perfil de comportamento, indica a ocorrência de elevação desta propriedade, com o incremento no nível de reciclagem dos papéis, sendo que o maior incremento entre todos os ciclos de reciclagem foi alcançado no primeiro ciclo (22,1%) em relação aos papéis de fibras primárias, porém ocorrendo logo após uma tendência de redução no ganho desta propriedade com o prolongamento dos níveis de reciclagem. Possivelmente, isto é devido à redução das perdas na capacidade de ligação das fibras, com o incremento nos ciclos de reciclagem dos papéis.

4.3.8. Propriedades ópticas

Não houve diferença estatística significativa para os valores de alvura, brancura, índice de amarelecimento, coeficiente de dispersão de luz e opacidade dos papéis, entre os dois processos de secagem. Pode-se representar por uma única curva de regressão, portanto, o comportamento das respectivas propriedades com o incremento nos níveis de reciclagem dos papéis em relação aos dois processos de secagem.

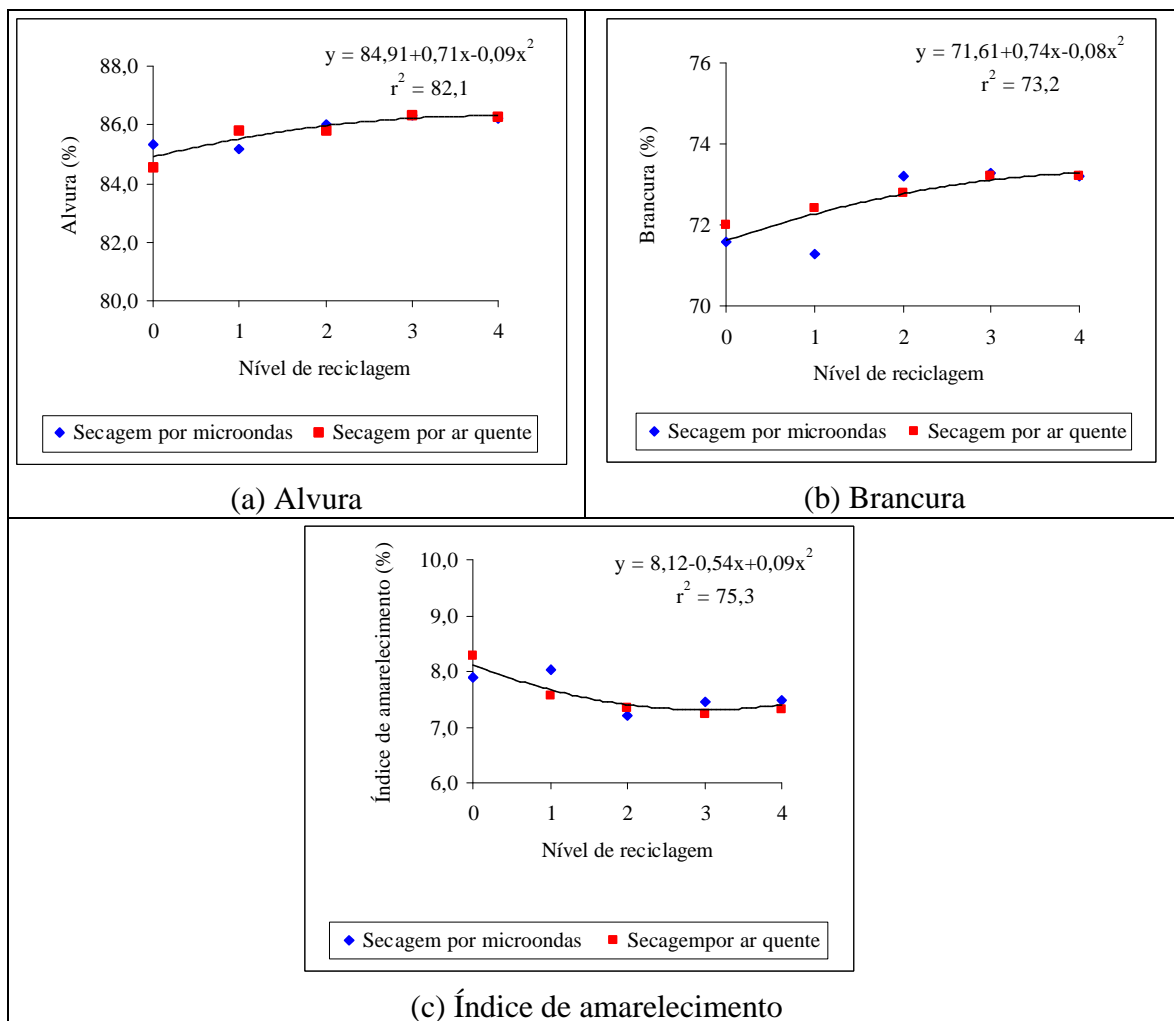


Figura 20 - Alvura, brancura e índice de amarelecimento em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

A propriedade de alvura não sofreu consideráveis mudanças, durante a reciclagem dos papéis (Figura 20a). Foi observada uma pequena elevação de seu valor, com o incremento nos níveis de reciclagem. Assim, o maior incremento entre todos os ciclos de reciclagem (0,7%) foi obtido, no primeiro reciclo dos papéis. Esta tendência foi, também, encontrada para a propriedade de brancura (Figura 20b), com o primeiro nível de reciclagem proporcionando um incremento de 0,9%.

Provavelmente, o discreto ganho de alvura e de brancura, esteja relacionado ao índice de amarelecimento dos papéis, mostrado na Figura 20c.

Nesta Figura, observa-se uma redução de 5,5% desta propriedade, com o primeiro reciclo dos papéis, seguindo-se de uma tendência à estabilização dos valores à medida que os ciclos de reciclagem prosseguem.

Provavelmente, as condições utilizadas no processo de reciclagem dos papéis estejam exercendo uma importante influência no comportamento das propriedades de alvura, brancura, e do índice de amarelecimento dos papéis, pois, não foi feito nenhum tipo de reaproveitamento de água, durante a formação dos papéis, ou seja, para cada nova etapa de reciclagem, foi utilizada água destilada para os procedimentos de hidratação, desagregação e formação dos papéis reciclados. Isto pode estar favorecendo uma limpeza da polpa e, conseqüentemente, proporcionando sua clarificação. Além disso, a ocorrência de perda de finos, com o incremento nos níveis de reciclagem, é também esperada.

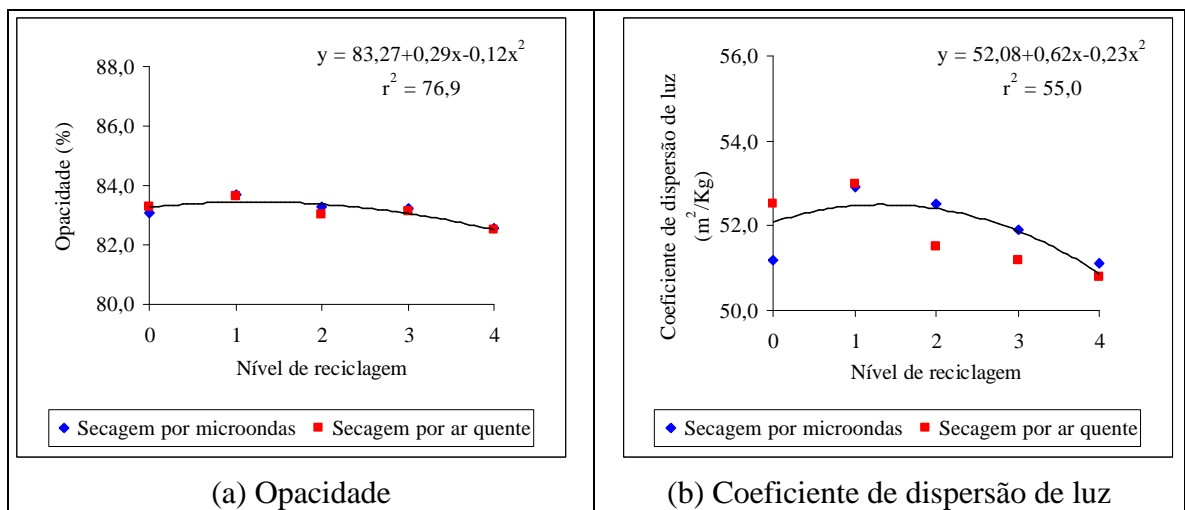


Figura 21 - Opacidade e coeficiente de dispersão de luz em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

O comportamento da opacidade e do coeficiente de dispersão de luz, mostrado nas Figuras 21a e 21b, respectivamente, indicam que houve poucas alterações em seus valores, com o incremento nos níveis de reciclagem dos papéis, para os dois processos de secagem. Deste modo, tanto para os valores de

opacidade quanto para o coeficiente de dispersão de luz, observou-se um discreto incremento de 0,2% e 0,7%, respectivamente, no primeiro ciclo de reciclagem dos papéis. Após esta fase, entretanto, houve uma inversão na tendência, ou seja, ambas as propriedades foram reduzidas com o incremento nos ciclos de reciclagem. Assim, os papéis do quarto nível de reciclo apresentaram uma perda de 0,9% para opacidade e 2,3% para o coeficiente de dispersão de luz, em relação aos papéis de fibras primárias.

A quantidade de superfícies de refração, ou seja, o número de interfaces fibra-ar na estrutura do papel, está diretamente ligada às propriedades de opacidade e coeficiente de dispersão de luz. Deste modo, um incremento de espaços vazios no papel proporciona uma elevação no coeficiente de dispersão de luz e, conseqüentemente, aumenta a opacidade do papel. Assim, o discreto ganho em relação às respectivas propriedades, com o primeiro nível de reciclagem, pode estar relacionado a este fenômeno.

Apesar de existir uma elevação no número de espaços vazios, na estrutura dos papéis reciclados, tal aumento não é muito pronunciado, provavelmente, devido à utilização de uma polpa de fibra primária com um baixo nível de refino. Assim, uma perda de finos com o incremento no nível de reciclagem, favorecendo a uma redução no número de superfícies de refração da estrutura do papel, pode explicar a pequena redução nos valores de opacidade e coeficiente de dispersão de luz, com o prolongamento nos ciclos de reciclagem dos papéis.

Apesar da secagem de papel por radiações microondas ser mais seletiva, em comparação com a secagem por ar quente, não foi encontrada nenhuma diferença de propriedades ópticas entre os dois processos de secagem de papéis. Tal fato leva a inferir que estes diferentes mecanismos de aquecimento não interferem, distintamente, na mudança da estrutura química dos constituintes do papel, nem na organização da estrutura interna dos papéis.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos, realizados em laboratório, mostram que a aplicação de radiações microondas é uma alternativa de secagem de papel, tecnologicamente viável.

Os papéis secados por radiações microondas comportaram-se semelhantemente aos papéis submetidos à secagem por ar quente, exceto quanto à propriedade de maciez, em que a secagem por radiações microondas destaca-se por permitir a produção de papéis com maiores valores. Tal fato reforça que esta tecnologia apresenta-se como uma possível alternativa para as indústrias de papel, principalmente, o segmento tissue.

A secagem por radiações microondas proporcionou maior preservação de algumas das propriedades estruturais das fibras do papel para todos os níveis de reciclagem, em comparação com a secagem por ar quente. Isto sugere que o mecanismo de aquecimento por radiações microondas permite uma secagem preferencial das moléculas de água presentes na estrutura das fibras, evitando, assim, maiores danos em suas paredes celulares, conseqüentes aos sucessivos ciclos de reciclagem.

Apesar das vantagens técnicas apresentadas, a secagem por radiações microondas apresenta maior custo em relação às secagens convencionais de papel, o que não impede que este sistema de secagem seja implantado industrialmente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP. Normas técnicas ABTCP. 1976. v1.

AHRENS, F. W.; HABEGER, C. C. Use a new applicator design ideas to improve uniformity of paper drying via microwave energy. **Drying Technology**, v. 19, n. 10, p. 2531-2548, 2001.

ANDERSSON, N. et al. Microwave drying of paper - An experimental study. **Svensk Papperstidning**, v. 75, n. 16, p. 663-671, 1972.

BAWDEN, A. D.; KIBBLEWHITE, R. P. Effects of multiple drying treatments on Kraft fibre walls. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 23, n. 7, p. j340-j346, 1997.

BOBALEK, J. F.; CHATURVEDI, M. The effects of recycling on the physical properties of handsheets with respect to specific wood species. **Tappi Journal**, v. 72, n.6, p. 123-125,1989.

BOUCHARD, J.; DOUEK, M. The effects of recycling on the chemical properties of pulps. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 20, n. 5, p. j131-136, 1994.

BRACELPA, **Relatório anual**. 2002, São Paulo, 16 p.

- CASEY, J. P. **Pulp and paper - chemistry and chemical technology. Paper testing and converting: Properties of paper.** New York: Interscience Publishers, v.3. 2^o ed. p. 1251-1519, 1966.
- CASTANHO, C. G.; OLIVEIRA, R. C. **Utilização de rejeito fibroso industrial da polpação Kraft de eucalipto para produção de papéis.** 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Curso de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- CLARK, J. d'A. **Pulp technology and treatment for paper: Fiber properties and tests.** San Francisco: Miller Freeman Inc., 2^o ed. p. 452-629, 1985.
- D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e papel. Tecnologia de fabricação do papel.** São Paulo: SENAI / IPT, v. 2, 2^o ed. p. 561-964, 1988.
- ELLIS, R. L.; SEDLACHEK, K. Recycled vs. virgin fiber characteristics: a comparison. **Tappi Journal**, v. 76, n.2, p. 142-146, 1993.
- FELLOWS, P. **Tecnologia del processado de los alimentos: Principios y Prácticas. Radiacion infrarroja y microondas.** Zaragoza: Acribia, p. 355-369, 1994.
- GALEANO, S. F.; MACK, R. A. Electromagnetic drying of linerboard in the rf band. **Tappi Journal**, v. 53, n.4, p. 586-591, 1970.
- GOERZ, D. J.; JOLLY, J. A. The economic advantages of microwave energy in paper drying. **American Paper Industry**, p. 48-62, 1967.
- GOULD, G. W. **News methods of food preservation: Microwave processing.** Glasgow: Chapman & Hall, p. 112-134, 1995.
- HABEGER, C. C.; BAUM, G. A. The microwave dielectric constants of water-paper mixtures. The role of sheet structure and composition. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 28, n. 3, p. 969-981, 1983.
- HANKIN, J. W.; LEIDIGH, W. J.; STEPHANSEN, E. W. Microwave paper drying. **American Paper Industry**, v. 51, n. 11, p. 32-32, 1969.
- HANKIN, J. W.; LEIDIGH, W. J.; STEPHANSEN, E. W. Microwave paper drying experience and analysis. **Tappi Journal**, v. 53, n. 6, p. 1063-1069, 1970.

- HILLIS, W. E. High temperature and chemical effects on wood stability. Part1: General considerations. **Wood Science and Technology**, v. 18, p. 281-293, 1984.
- HOWARD, R. C. The effects of recycling on paper quality. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 16, n. 5, p. j143-j149, 1990.
- HOWARD, R. C.; BICHARD, W. The basic effects of recycling on pulp properties. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 18, n. 4, p. j151-j159, 1992.
- JANG, H. F.; ROBERTSON, A. G.; SETH, R. S. Optical sectioning of pulp fibers using confocal scanning laser microscopy. **Tappi Journal**, v. 74, n. 10, p. 217-219, 1991.
- JONES, P. L. High frequency dielectric heating in paper making. **Drying Technology**, v. 4, n. 2, p. 217-244, 1986.
- JONES, P. L. et al. Moisture profile correction of paper and board by radio and microwave frequency fields. **Paper Technology**, v. 14, n. 2, p. 79-84, 1973.
- KIBBLEWHITE, R. P.; BAILEY, D. G. Measurement of fibre cross-section dimensions using image processing. **Appita Journal**, v.41, n. 4, p. 297-303, 1988.
- KLUNGNESS, J. H.; CAULFIELD, D. F. Mechanisms affecting fiber bonding during drying and aging of pulps. **Tappi Journal**, v. 65, n. 12, p. 94-97, 1982.
- KUMAR, A.; SMITH, D. G. The measurement of the complex permittivity of paper at microwave frequencies. **Tappi Journal**, v. 59, n. 1, p. 149-151, 1976.
- LAINE, J. E.; GORING, D. A. I. **Comparison of the Properties of ultrasonically and mechanically beaten fibers**. Present address: Laboratory of Wood Chemistry, Helsinki University of Technology, Otaniemi, Finland, p. 245-248, 1977.
- LAINE, J. E.; GORING, D. A. I. Influence of ultrasonic irradiation on the properties of cellulosic fibres. **Cellulose Chem. Technol.**, II, p. 561-567, 1977.

- LAINE, J. E. et al. Applications of ultrasound in pulp and paper technology. **Paperi já Puu**: Papper och Trä: Specialnummer, 4a, p. 235-247, 1977.
- LEBEL, R. G.; NOBLEZA, G. C.; PAQUET, R. Water retention value indicates machine runnability of pulp. **Pulp and Paper Canada**, v. 80, n. 5, p. 64-70, 1979.
- MAFART, P. **Ingeniería industrial alimentaria: calentamiento por radiación**. Zaragoza: Acribia, p. 63-80, 1994.
- MOLIN, U.; TEDER, A. Importance of cellulose/hemicellulose-ratio for pulp strength. **Nordic pulp and paper research journal**, v. 17, n. 1, p. 14-19, 2002.
- MUDGETT, R. E. Microwave properties and heating characteristics of foods. **Food Technology**, v. 40, n. 6, p. 84-93, 1986.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying: Microwave and dielectric drying**. New York : Marcel Dekker, v. 1, 2^o ed. p. 345-372, 1995.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying: Drying of pulp and paper**. New York : Marcel Dekker, v. 2, 2^o ed. p. 861-898, 1995.
- NAZHAD, M. M.; PASZNER, L. Fundamentals of strength loss in recycled paper. **Tappi Journal**, v. 77, n. 9, p. 171 - 179, 1994.
- OLIVEIRA, R. C & SABIONI, L. Impacto de variáveis de refino e da adição de fibras virgens na recuperação da qualidade de papéis de eucalipto decorrentes da reciclagem. In: I CONGRESSO DE TECNOLOGIA PAPELEIRA, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1998. 75-88 p.
- PAGE, D. H.; SETH, R. S. The elastic modulus of paper. II. The importance of fiber modulus, bonding, and fiber length. **Tappi Journal**, v. 63, n. 6, p. 113-116, 1980.
- POIRIER, N. A.; PIKULIK, I. I. Novos desenvolvimentos no campo da secagem. **O Papel**, p. 71-79, Fevereiro de 2003.
- POTTER, N. N.; HOTCHKISS, J. H. **Food science: Irradiation, microwave, and ohmic processing of foods**. New York: Chapman & Hall, p. 245-263, 1995.

- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de alguns parâmetros num modelo polinomial ortogonal. **Revista Ceres**, v. 40, n. 228, p. 176-195, 1993.
- SCHIFFIMANN, R. F. Microwave foods: basic design considerations. **Tappi Journal**, v. 73, n. 3, p. 209-212, 1990.
- SILVA, R. P.; OLIVEIRA, R. C. Efeitos da ação do refino e da reciclagem nas propriedades de papéis de pinus e eucalipto. Viçosa - MG: **Revista Árvore**, v. 24, n. 3, p. 349-360, 2000.
- SILVA, R. P.; OLIVEIRA, R. C. **Utilização de vibrações ultra-sônicas para o refino de celulose Kraft de Eucalipto**. 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Curso de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- SMIT, J. **Microondas: Aplicações**. São Paulo: Érica, p. 84-110, 1988.
- SOININEN, M. Possibilities of high-frequency techniques in paper industry. **Drying Technology**, v. 6, n. 1, p. 139-156, 1988.
- SPANGENBERG, R. J. **Secondary fiber recycling: The impact of secondary fiber on the paper machine**. Atlanta: Tappi Press, p. 29-36, 1993.
- TAPPI TEST METHODS - T200 a T1219, 1998-1999.
- TORGOVNIKOV, G. I. **Dielectric properties of wood and wood-based materials**. Berlin: Springer - Verlag, 196 p, 1993.
- WICKERSHEIM, K. A. On-line measurements in microwave ovens. **Tappi Journal**, v. 73, n. 3, p. 223-229, 1990.
- ZHANG, M. et al. Can recycled kraft fibres benefit from chemical addition before they are first dried? **Appita Journal**, v. 55, n. 2, p. 135-144, 2002.

APÊNDICE

Quadro 1a - Características do procedimento de ultra-sonificação na polpa de fibras primárias, para um tempo de sonificação de 30 minutos e consumo de energia de 95 Wh, e os respectivos efeitos na resistência à drenabilidade (⁰SR) com o incremento do nível de reciclagem para secagem por radiações microondas e secagem por ar quente.

Nível de reciclagem	Schopper Riegler, ⁰ SR	
	Secagem por radiações microondas	Secagem por ar quente
0	21,0	21,0
1	15,5	16,0
2	13,5	15,0
3	13,0	14,0
4	13,0	14,0

Quadro 2a - Resultados médios para as propriedades ópticas e físico-mecânicas dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas.

Propriedades	Nível de reciclagem dos papéis				
	0	1	2	3	4
Gramatura, g/m ²	61,77	62,07	62,52	61,79	62,81
Espessura, µm	134,8	150,0	154,9	151,4	159,0
Peso específico aparente, Kg/m ³	458,5	413,8	403,9	408,4	395,5
Volume específico aparente, cm ³ /g	2,18	2,42	2,48	2,45	2,53
Res. à Passagem de ar, s/100cm ³	1,23	0,76	0,60	0,53	0,51
Maciez, s/100cm ³	201,22	263,19	278,69	232,12	212,36
Índice de rasgo, mN.m ² /g	3,18	2,96	2,51	2,44	1,96
Índice de tração, N.m/g	20,71	16,51	12,60	12,16	11,47
MOE, MN.m/Kg	4,00	3,60	3,01	3,13	2,91
Energia de deformação, J/m ²	7,50	4,71	3,04	2,64	2,05
Alongamento, %	0,90	0,72	0,62	0,59	0,47
Capilaridade Klemm, cm	9,23	11,83	13,10	13,20	13,40
Alvura, % ISO	85,32	85,18	86,02	86,31	86,21
Brancura, % CIE	71,57	71,27	73,16	73,33	73,24
Opacidade, %	83,08	83,70	83,28	83,22	82,58
Índice de amarelecimento, %	7,89	8,04	7,25	7,44	7,49
Coefficiente de dispersão de luz, m ² /Kg	51,25	52,91	52,53	51,90	51,10
Coordenada de cor L	96,4	96,4	96,5	96,5	96,5
Coordenada de cor a	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
Coordenada de cor b	4,3	4,4	4,1	4,1	4,1

Quadro 3a - Resultados médios para as propriedades ópticas e físico-mecânicas dos papéis submetidos à secagem através de ar quente.

Propriedades	Nível de reciclagem dos papéis				
	0	1	2	3	4
Gramatura, g/m ²	62,66	62,26	63,11	62,11	61,82
Espessura, μm	138,7	149,1	156,8	153,1	152,7
Peso específico aparente, Kg/m ³	445,5	416,4	398,9	403,8	411,5
Volume específico aparente, cm ³ /g	2,21	2,40	2,48	2,47	2,47
Res. à Passagem de ar, s/100cm ³	1,30	0,79	0,62	0,56	0,51
Maciez, s/100cm ³	184,71	240,47	227,20	196,33	182,65
Índice de rasgo, mN.m ² /g	3,63	2,39	2,37	2,26	2,10
Índice de tração, N.m/g	21,59	16,34	13,70	12,81	11,65
MOE, MN.m/Kg	4,12	3,29	3,17	3,17	3,05
Energia de deformação, J/m ²	8,67	4,69	4,28	2,72	2,24
Alongamento, %	0,95	0,76	0,75	0,58	0,50
Capilaridade Klemm, cm	9,50	11,77	13,13	13,13	13,90
Alvura, % ISO	84,53	85,81	85,78	86,33	86,30
Brancura, % CIE	72,01	72,42	72,78	73,2	73,2
Opacidade, %	83,31	83,62	83,01	83,13	82,52
Índice de amarelecimento, %	8,27	7,56	7,34	7,24	7,32
Coefficiente de dispersão de luz, m ² /Kg	52,53	53,0	51,52	51,16	50,83
Coordenada de cor L	96,5	96,5	96,5	96,6	96,5
Coordenada de cor a	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2
Coordenada de cor b	4,1	4,2	4,2	4,1	4,1

Quadro 4a - Resultados médios do teor de Glicana (%) em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Nível de reciclagem	Glicana, %	
	Secagem por microondas	Secagem por ar quente
0	83,3	83,0
1	79,9	81,2
2	79,8	83,1
3	83,2	82,9
4	84,0	83,7

Quadro 5a - Resultados médios do teor de Xilana (%) em função do nível de reciclagem dos papéis submetidos à secagem por radiações microondas e através de ar quente.

Nível de reciclagem	Xilana, %	
	Secagem por microondas	Secagem por ar quente
0	14,7	13,3
1	15,6	12,4
2	15,5	12,4
3	13,2	12,7
4	13,3	13,0

Quadro 6a - Resultados médios para as propriedades do material fibroso com relação à secagem por radiações microondas

Propriedades	Nível de reciclagem				
	0	1	2	3	4
Comprimento de fibra, mm	0,99	1,00	1,00	1,01	0,98
Largura de fibra, μm	20,37	19,44	19,00	18,71	17,87
Diâmetro de lúmen, μm	7,91	7,22	7,10	7,43	6,51
Espessura de parede de celular, μm	6,23	6,11	5,89	5,64	5,58
Número de fibras por grama, milhões	16,78	17,97	23,54	25,29	19,38
Coarseness, mg/100m	9,26	8,38	6,54	5,94	7,41
Teor de finos, %	12,73	9,33	7,31	6,07	6,32
WRV, %	109,0	98,7	96,5	88,6	88,4

Quadro 7a - Resultados médios para as propriedades do material fibroso com relação à secagem através de ar quente.

Propriedades	Nível de reciclagem				
	0	1	2	3	4
Comprimento de fibra, mm	0,96	0,89	0,88	0,86	0,88
Largura de fibra, μm	19,73	18,89	18,82	18,03	17,10
Diâmetro de lúmen, μm	7,96	7,35	7,58	7,20	6,91
Espessura de parede de celular, μm	5,88	5,77	5,82	5,53	5,26
Número de fibras por grama, milhões	20,91	20,01	20,68	20,84	19,63
Coarseness, mg/100m	7,44	7,70	7,37	7,10	7,38
Teor de finos, %	10,10	9,28	8,05	7,10	6,22
WRV, %	105,8	91,1	89,6	84,7	88,5