



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Área de Concentração

Engenharia de Processos

**ANÁLISE DA SECAGEM DE POLPA DE CELULOSE PARA A
OBTENÇÃO DE PAPEL RECICLADO TIPO CARTÃO**

Autora: Melissa Gurgel Adeodato Vieira

Orientadora: Prof^a Dr^a Sandra Cristina dos Santos Rocha

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Junho de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

| | |
|------|---|
| V71a | <p>Vieira, Melissa Gurgel Adeodato Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado tipo cartão / Melissa Gurgel Adeodato Vieira.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.</p> <p>Orientador: Sandra Cristina dos Santos Rocha Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.</p> <p>1. Papel - secagem. 2. Resíduos de papel - Reaproveitamento. 3. Celulose. 4. Cooperativas de produtores. 5. Cooperativas. I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.</p> |
|------|---|

Titulo em Inglês: Analysis of cellulose pulp drying for the production of card type recycled paper

Palavras-chave em Inglês: Paper drying, Recycling, Recycled paper, Cellulose pulp, Shrinking, Paper quality, Convective drier

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Doutora em Engenharia Química

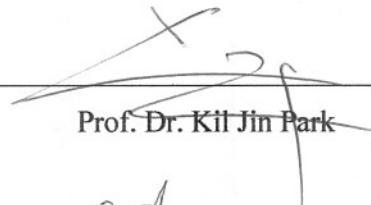
Banca examinadora: Kil Jin Park, José Teixeira Freire, Nehemias Curvelo Pereira e Virgínia Aparecida Silva Moris

Data da defesa: 06/06/2006

Tese de Doutorado defendida por Melissa Gurgel Adeodato Vieira e aprovada em 06 de Junho de 2006 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof.^a Dr.^a Sandra Cristina dos Santos Rocha


~~Prof. Dr. Kil Jin Park~~

Prof. Dr. José Teixeira Freire

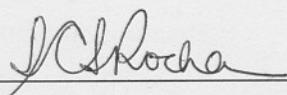

~~Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira~~
~~215Moris~~

Dr.^a Virgínia Aparecida Silva Moris

200615530

BIBLIOTECA CENTRAL
DESENVOLVIMENTO
COLEÇÃO
UNICAMP

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Melissa Gurgel Adeodato Vieira e aprovada pela Comissão Julgadora em 06 de Junho de 2006.



Prof.^a Dr.^a Sandra Cristina dos Santos Rocha

Ao meu querido esposo Fernando,
aos meus pais, Fernando e Márcia,
e aos meus tios, Meuris e Laerte

Ao meu querido esposo Fernando,
aos meus pais, Fernando e Márcia,
e aos meus tios, Meuris e Laerte.

AGRADECIMENTOS

Foram muitos os que contribuíram, de uma forma ou de outra, para que este trabalho fosse concluído. Espero me lembrar de todos. A vocês, toda a minha gratidão:

- Primeiramente a Deus, pela vida.
- À Profª Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela orientação profissional desde o Mestrado, pela paciência durante os meus momentos de ansiedade, pelo incentivo e por ter acreditado em mim.
- Aos meus queridos pais, Fernando e Márcia, por tudo. Obrigada por todo o amor que vocês me dedicaram, por todo o incentivo, pelas orações e conselhos, por todos os sonhos que vocês me ajudaram a realizar.
- Ao meu esposo Fernando, por todo o amor, carinho e compreensão nos momentos difíceis.
- Às minhas irmãs, Larissa e Vanessa, e a toda minha família.
- Aos meus tios, Meuris e Laerte, meus pais de Campinas, por todo o carinho e apoio.
- Aos meus sogros, Emília e Celso, à vó Ilda e à Tatiana, minha nova família em Campinas.
- Aos meus colegas do LFS, Roberto, Virgínia, Marta, Dener, Aline, Mário, Vicente, Michael, César, Bárbara, Leandra, Flávio e Antônio, pela amizade.
- Aos colegas dos demais laboratórios, Uiram, Ronaldo, Tashima, Marcel, Ivanildo, Igor, Érika, pela amizade e pelo café delicioso...
- Ao senhor Levi Esmael Madeira, por toda a sua ajuda na montagem do equipamento, além de seus conselhos e sugestões sempre bem vindos.
- Aos funcionários do DTF, Rogério, Rose e Celso.
- À FAPESP, pelo apoio financeiro.

A todos que sempre me incentivaram, MUITO OBRIGADA!!!

“Como é feliz o homem que acha a sabedoria,
o homem que obtém entendimento,
pois a sabedoria é mais proveitosa do que a prata
e rende mais do que o ouro.
É mais preciosa do que rubis;
nada do que você possa desejar
se compara a ela..”

Pv 3, 13-15.

RESUMO

O papel ainda desempenha um fator chave na cultura e na difusão da informação apesar dos grandes avanços tecnológicos. Embora seja produzido a partir de um recurso renovável, como é a madeira, existe tecnologia que permite a sua reutilização a partir de fibras recuperadas. A reciclagem do papel permite uma grande redução na quantidade de resíduos sólidos urbanos, evitando a utilização de recursos naturais tais como a madeira e a água, além de diminuir bastante o consumo energético na indústria papeleira. A produção da polpa de celulose é o grande consumidor de energia no processo de fabricação do papel, seguido da secagem do papel, que é o segundo processo neste tipo de indústria que mais consome energia. A secagem é um processo complexo, de grande importância tanto em termos energéticos como também na qualidade do produto final. Neste contexto, este trabalho teve como proposta analisar a secagem de polpa de celulose a partir de fibras recuperadas para a fabricação de papel cartão reciclado. Para tanto, projetou-se um secador convectivo, em escala laboratorial, para a secagem da polpa de papel. Foram determinadas as curvas de secagem em função de diferentes condições operacionais e as isotermas de dessorção do papel pelo método dinâmico. Uma análise da qualidade do produto foi realizada para as diferentes condições, além da análise energética do processo. Paralelamente, fez-se um estudo comparativo entre a secagem natural ao ar livre (utilizada em pequenas produções) e a secagem por convecção forçada no secador projetado. Complementando o estudo da secagem, analisou-se o encolhimento do papel durante a secagem, relacionando-o com as condições operacionais do processo, as características físicas e a qualidade do produto. O secador desenvolvido neste trabalho mostrou-se adequado para a secagem do papel reciclado tipo cartão, apresentando uma eficiência energética compatível com a dos secadores utilizados na indústria papeleira (24,53%). Verificou-se que o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem influencia positivamente no processo, reduzindo significativamente o tempo de secagem. No entanto, a qualidade do papel é inferior nas condições mais dráticas de secagem, obtendo-se um produto final com superfície menos uniforme e mais ressecada. No estudo de encolhimento durante a secagem, assim como na análise da qualidade da superfície (MEV), obteve-se resultados similares para os papéis secos a 70 e 80°C. Modificações significativas de propriedades estruturais e uma baixa qualidade do produto foram verificadas para o papel

seco a 90°C, indicando, assim, uma temperatura de secagem limite para a secagem convectiva do papel reciclado analisado. O papel seco a 90°C sofreu um encolhimento superficial de 15%, linear e também volumétrico de 40% durante a fase de secagem à taxa decrescente. O papel seco nas condições mais brandas (66°C; 0,22m/s) apresentou características semelhantes ao papel seco ao natural. Assim, pode-se obter um papel reciclado tipo cartão com uma qualidade adequada utilizando o secador convectivo, reduzindo-se sensivelmente o tempo necessário para a secagem da folha.

ABSTRACT

Even though the great technological advances, the paper still carries out an important role in the culture and in the diffusion of information. Although it is produced by a renewable source, as the wood, technology allowing paper reuse is available. A selective pick up is necessary for the pulp processing from recovered fibers. The paper recycling allows a great reduction of the amount of urban solid residues, avoiding the use of natural sources as wood and water, besides decreasing a lot the energy consumption in the paper industry. The production of the cellulose pulp is the first great energy consumer in the process of paper production, followed by the paper drying process. The drying is a complex process, of great importance, not only in energy terms, but for the quality of the final product. In this context, this work had the objective to analyze the drying of cellulose pulp made from recovered fibers for the production of card type recycled paper. For this, a convective dryer was projected, in laboratorial scale, for the drying of the paper pulp. The drying curves as a function of different operating conditions were analyzed and the paper desorption isotherms were determined by the dynamic method. An analysis of the product quality was accomplished for different conditions, as well as the process energy consumption evaluation. A comparative study between the natural drying (used in small productions) and the drying by forced convection was also effectuated. To complement the drying analysis, the shrinkage of the paper was evaluated during the drying and related to the operating conditions, physical characteristics and quality of the product. The dryer developed in this work showed to be appropriate for the drying of the recycled card type paper, presenting energy efficiency compatible with dryers used in paper industries (24,53%). It was verified that the increase of the temperature and velocity of the drying air influenced the process reducing the drying time. However, the quality of the paper is poor for severe operating conditions, leading to a less uniform final product, having a very dry surface. In the paper shrinkage study during drying, as well as in the analysis of the surface quality, similar results were gotten for the papers dried at 70 and 80°C. Significant modifications of structural properties and a low quality of the product were verified for the paper dried at 90°C, indicating a limit to the air temperature for the convective drying of the analyzed recycled paper. The paper dried at 90°C suffered 15% of surface shrinkage and also 40% of linear and volume reduction during the falling rate drying phase. The paper

dried under softer operating conditions (66°C ; $0,22\text{m/s}$) presented characteristics similar to the paper naturally dried. Thus, a type card recycled paper can be produced with adequate quality using the convective drier, reducing significantly the necessary time for the drying of the paper sheet.

SUMÁRIO

| | |
|---|--------------|
| RESUMO..... | vi |
| ABSTRACT..... | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | xiii |
| LISTA DE TABELAS..... | xviii |
| NOMENCLATURA..... | xx |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Motivação à pesquisa..... | 1 |
| 1.2. Metas do trabalho..... | 2 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 2.1. Origem e composição do papel..... | 5 |
| 2.2. Mercado do papel..... | 6 |
| 2.3. Papel Reciclado..... | 8 |
| 2.4. Fibras utilizadas na produção do papel..... | 10 |
| 2.5. Produção da pasta de papel..... | 11 |
| 2.6. Operações de reciclagem..... | 12 |
| 2.7. Secagem..... | 14 |
| 2.7.1. Conceito e importância..... | 14 |
| 2.7.2. Higroscopidade..... | 16 |
| 2.7.2.1. Conteúdo de umidade dos sólidos..... | 16 |
| 2.7.2.2. Isotermas de sorção..... | 17 |
| 2.7.2.3. Modelos empíricos de isotermas..... | 18 |
| 2.7.3. Cinética da secagem..... | 21 |
| 2.7.4. Modelos matemáticos de secagem..... | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7.5. Eficiência energética..... | 26 |
| 2.8. Secagem da pasta celulósica..... | 28 |
| 2.9. Encolhimento do volume durante a secagem..... | 35 |
| 2.10. Características do papel..... | 44 |
| 2.11. Impactos Ambientais associados à produção de papel..... | 45 |
| CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS..... | 47 |
| 3.1. Planejamento do trabalho..... | 47 |
| 3.2. Materiais..... | 48 |
| 3.3. Preparação da polpa..... | 48 |
| 3.4. Sistema Experimental..... | 49 |
| 3.5. Caracterização da polpa de papel..... | 54 |
| 3.5.1. Tipo de fibra..... | 54 |
| 3.5.2. Concentração de sólidos da polpa..... | 55 |
| 3.6. Caracterização física do papel..... | 55 |
| 3.6.1. Teor de umidade..... | 55 |
| 3.6.2. Gramatura..... | 55 |
| 3.6.3. Espessura..... | 56 |
| 3.6.4. Densidade aparente..... | 56 |
| 3.6.5. Densidade real..... | 56 |
| 3.6.6. Porosidade..... | 57 |
| 3.6.7. Resistência à tração e alongamento..... | 58 |
| 3.6.8. Resistência ao arrebentamento..... | 58 |
| 3.6.9. Estabilidade dimensional..... | 58 |
| 3.6.10. Absorção de água..... | 58 |
| 3.7. Métodos Experimentais..... | 59 |

| | |
|--|------------|
| 3.7.1. Planejamento experimental..... | 59 |
| 3.7.2. Cinética da secagem da polpa de celulose..... | 60 |
| 3.7.3. Isotermas de dessorção de umidade do papel..... | 61 |
| 3.7.4. Eficiência energética..... | 62 |
| 3.7.5. Secagem natural..... | 64 |
| 3.7.6. Análise do encolhimento do material..... | 66 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 69 |
| 4.1. Caracterização da polpa de papel..... | 69 |
| 4.1.1. Análise da fibra de celulose..... | 69 |
| 4.1.2. Concentração de sólidos da polpa de papel..... | 73 |
| 4.2. Cinética de secagem da polpa de papel..... | 73 |
| 4.3. Análise das isotermas de dessorção..... | 109 |
| 4.4. Análise da eficiência energética..... | 114 |
| 4.5. Cinética da secagem ao natural..... | 116 |
| 4.6. Encolhimento do papel durante a secagem..... | 121 |
| 4.7. Análise da qualidade..... | 132 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 147 |
| 5.1. Conclusões..... | 147 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros..... | 151 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 153 |
| ANEXO A..... | 163 |
| ANEXO B..... | 178 |
| ANEXO C..... | 208 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. – Distribuição da produção de papel e celulose no Brasil no ano de 2003 (INFOINVEST, 2005)..... | 7 |
| Figura 2.2. – Fórmula estrutural da celulose (CELULOSE ON LINE, 2004)..... | 10 |
| Figura 2.3. – Processo de reciclagem do papel (GROSSI e VALENTE, 2001)..... | 14 |
| Figura 2.4. - Isoterma de sorção típica (MUJUMDAR e MENON, 1995)..... | 18 |
| Figura 2.5. - Formas características das isotermas de sorção (BRUNUAER <i>et al.</i> , 1938)..... | 19 |
| Figura 2.6. - Curvas típicas de secagem convectiva (PARK <i>et al.</i> , 2001)..... | 21 |
| Figura 2.7. - Máquina de Fourdrinier para a secagem de papel (FARDIM, 1999)..... | 29 |
| Figura 2.8. - Cilindros a vapor para a secagem de papel (BRACELPA, 2003)..... | 29 |
| Figura 2.9. - Esquema experimental para obtenção dos perfis de temperatura (MOTA LIMA et al, 1996a)..... | 32 |
| Figura 2.10. - Sistema experimental (Sistema experimental (MOTA LIMA <i>et al.</i> 1997a)).. | 33 |
| Figura 2.11 - Modelo esquemático do secador (MOTA LIMA <i>et al.</i> , 1996b)..... | 35 |
| Figura 3.1. - Vistas em perspectiva do secador..... | 50 |
| Figura 3.2. - Detalhe das telas com a polpa de papel para o secador..... | 51 |
| Figura 3.3. - Esquema do sistema experimental..... | 52 |
| Figura 3.4. - Fotos das vistas transversal e lateral do secador..... | 52 |
| Figura 3.5. - Fotos da tela aberta e fechada..... | 53 |
| Figura 3.6. - Fotos da prensa de acrílico e aço inox..... | 53 |
| Figura 3.7. - Esquema do equipamento DVS (DVS user guide, 2000)..... | 62 |
| Figura 3.8. - Esquema do sistema montado para os ensaios de secagem natural..... | 65 |
| Figura 4.1. - Fotos da polpa de papel pelo microscópio óptico, com ampliação de 100x: (a) L 0,810mm, (b) L= 0,819 mm, (c) L ₁ = 0,881 mm, L ₂ = 0,771 mm, (d) L = 1,038 mm, (e) L ₁ = 0,616 mm, L ₂ = 0,767 mm, (f) L = 0,607 mm..... | 70 |
| Figura 4.2. - Fotos das fibras de celulose do papel pelo MEV, com ampliação de: (a) 50x, (b) 300x, (c) 500x, (d) 500x, (e) 500x, (f) 2000x, (g) 2000x, (h) 5000x, (i) 5000x, (j) 5000x..... | 72 |
| Figura 4.3. - Parâmetros do ar de entrada e saída para o ensaio 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7$ m/s)..... | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4. - Parâmetros do ar de entrada e saída para o ensaio 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 76 |
| Figura 4.5. - Curva de temperatura da tela em função do tempo de secagem para o ensaio 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$)..... | 77 |
| Figura 4.6. - Curva de temperatura da tela em função do tempo de secagem para o ensaio 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 77 |
| Figura 4.7. - Curva de secagem convectiva para ensaio 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$)..... | 79 |
| Figura 4.8. - Curva de secagem convectiva para ensaio 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 79 |
| Figura 4.9. - Curva de temperatura das telas 1 e 5 em função do tempo de secagem para os ensaios 5 ($T_{ar} = 66^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$), 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 80 |
| Figura 4.10. - Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 5 ($T_{ar} = 66^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$), 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 80 |
| Figura 4.11. - Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 5 ($T_{ar} = 66^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$), 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$)..... | 81 |
| Figura 4.12. - Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 1 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,3 \text{ m/s}$) e 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$).... | 81 |
| Figura 4.13. - Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 1 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,3 \text{ m/s}$) e 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$)..... | 82 |
| Figura 4.14. - Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 3 ($T_{ar} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,3 \text{ m/s}$) e 4 ($T_{ar} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$)...82 | 82 |
| Figura 4.15. - Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 3 ($T_{ar} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,3 \text{ m/s}$) e 4 ($T_{ar} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$)..... | 82 |
| Figura 4.16. - Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste do modelo de Page para a tela 1..... | 86 |
| Figura 4.17. - Diagrama de Pareto para o parâmetro n obtido pelo ajuste do modelo de Page para a tela 1..... | 87 |
| Figura 4.18. - Ajuste do modelo não linear de Page à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar}=80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar}=0,78 \text{ m/s}$) para a tela 1, $R^2=0,9986$ | 87 |
| Figura 4.19. - Ajuste do modelo não linear de Page à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar}=80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar}=0,78 \text{ m/s}$) para a tela 5, $R^2=0,9970$ | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.20. - Diagrama de Pareto para o parâmetro K obtido pelo ajuste do modelo similar à solução da equação de Fick para a tela 1..... | 90 |
| Figura 4.21. - Ajuste do modelo não linear similar à solução de Fick à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,78 \text{ m/s}$) para a tela 2, $R^2 = 0,9942$ | 91 |
| Figura 4.22. - Ajuste do modelo não linear similar à solução de Fick à curva de secagem do ensaio 12 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) para a tela 2, $R^2 = 0,9933$ | 91 |
| Figura 4.23. - Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial..... | 98 |
| Figura 4.24. - Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial..... | 100 |
| Figura 4.25. - Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial..... | 100 |
| Figura 4.26. - Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial..... | 101 |
| Figura 4.27. - Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante..... | 101 |
| Figura 4.28. - Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante..... | 103 |
| Figura 4.29. - Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante..... | 104 |
| Figura 4.30. - Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante..... | 104 |
| Figura 4.31. - Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial..... | 105 |
| Figura 4.32. - Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial..... | 107 |
| Figura 4.33. - Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial..... | 108 |
| Figura 4.34. - Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial..... | 108 |
| Figura 4.35. - Isotermas de equilíbrio na temperatura de 25°C | 109 |
| Figura 4.36. - Isotermas de equilíbrio na temperatura de 50°C | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.37. - Isotermas de equilíbrio – Efeito da temperatura na dessorção do papel seco nas condições: (a) (70°C, 0,3 m/s); (b) (80°C, 0,5 m/s) e (c) (90°C, 0,5 m/s)..... | 110 |
| Figura 4.38. - Ajuste da equação de GAB à isoterma dessorção a 25°C e 50°C para o papel seco à 80°C e 0,5 m/s, $R^2 = 0,9999$ | 113 |
| Figura 4.39. - Parâmetros do ar ambiente para os ensaios 2 (21,67°C;55,02%) e 7 (24,19°C; 88,38%)de secagem natural..... | 117 |
| Figura 4.40. - Curva de secagem convectiva natural para os ensaios 2 (21,67°C; 55,02%) e 7 (24,19°C; 88,38%)..... | 117 |
| Figura 4.41. Curva de taxa de secagem em função do teor de umidade para os ensaios 2 (21,67°C;55,02%) e 7 (24,19°C; 88,38%) de secagem natural..... | 118 |
| Figura 4.42. - Influência da umidade relativa ambiente no teor de umidade da folha de papel durante a secagem natural..... | 119 |
| Figura 4.43. - Influência da umidade relativa ambiente na taxa de secagem inicial da folha de papel durante a secagem natural..... | 119 |
| Figura 4.44. - Influência da umidade relativa ambiente na taxa de secagem constante da folha de papel durante a secagem natural..... | 120 |
| Figura 4.45. - Comparação entre a secagem de convecção natural e a forçada..... | 120 |
| Figura 4.46. - Redução da área do papel em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.16)..... | 122 |
| Figura 4.47. - Redução linear do papel (espessura) em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.17)..... | 122 |
| Figura 4.48. - Redução volumétrica do papel em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.18)..... | 123 |
| Figura 4.49. - Densidade aparente em função do teor de umidade (d.b.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento..... | 125 |
| Figura 4.50. - Evolução da porosidade da amostra de papel em função do teor de umidade (d.b.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.19)..... | 126 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.51. - Fotos de folhas de papel analisadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) secas a: (a) 70°C (50x); (b) 70°C (100x); (c) 80°C (50x); (d) 80°C (100x); (e) 90°C (50x); (f) 90°C (100x)..... | 128 |
| Figura 4.52. - Incremento de intrusão (cm^3/g) <i>versus</i> diâmetro do poro (μm) – ângulo de molhabilidade: 130°..... | 129 |
| Figura 4.53. - (a) Intrusão cumulativa (cm^3/g) <i>versus</i> pressão (MPa); (b) Intrusão e extrusão cumulativa (cm^3/g) <i>versus</i> pressão (MPa)..... | 130 |
| Figura 4.54. - Influência das condições de secagem na gramatura média das folhas de papel para a tela 1..... | 134 |
| Figura 4.55. - Influência das condições de secagem na espessura média das folhas de papel para a tela 1..... | 135 |
| Figura 4.56. - Influência das condições de secagem na densidade aparente das folhas de papel para a tela 1..... | 137 |
| Figura 4.57. - Influência das condições de secagem na porosidade das folhas de papel para a tela 1..... | 139 |
| Figura 4.58. - Influência das condições de secagem na resistência à tração das folhas de papel. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4)..... | 140 |
| Figura 4.59. - Influência das condições de secagem no alongamento das folhas de papel. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4)..... | 141 |
| Figura 4.60. - Influência das condições de secagem na resistência ao arrebentamento das folhas de papel. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).)..... | 142 |
| Figura 4.61. - Influência das condições de secagem na variação dimensional das folhas de papel após imersão em água. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4)..... | 143 |
| Figura 4.62 - Influência das condições de secagem na ascensão de água nas folhas de papel por capilaridade. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4)..... | 144 |
| Figura 4.63. - Fotos da superfície de folhas de papel analisadas pelo Microscópio Óptico secas: (a) condições naturais (50x); (b) 70°C (50x); (c) 80°C (50x); (d) 90°C (50x)..... | 145 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. - Evolução na taxa de recuperação de papéis recicláveis - 1980 a 2002 (CEMPRE, 2004)..... | 8 |
| Tabela 2.2. - Efeito da atividade da água e da temperatura na umidade de equilíbrio (MARINOS-KOURIS e MAROULIS, 1995)..... | 20 |
| Tabela 2.3. - Distribuição de secadores na indústria de papel americana..... | 28 |
| Tabela 2.4. - Modelos de Suzuki <i>et al.</i> (1976)..... | 41 |
| Tabela 3.1. - Dimensões da câmara de secagem..... | 50 |
| Tabela 3.2. - Valores codificados das variáveis independentes..... | 60 |
| Tabela 4.1. - Condições operacionais dos ensaios preliminares de secagem..... | 74 |
| Tabela 4.2. - Planejamento para o estudo da secagem de polpa de papel..... | 74 |
| Tabela 4.3. - Condições operacionais dos ensaios de secagem..... | 75 |
| Tabela 4.4. - Ajuste de X/X_0 em função do tempo, utilizando as equações da reta, para o período de secagem à taxa constante, e de Page, para os períodos de taxa constante e decrescente, respectivamente, para as cinco telas..... | 84 |
| Tabela 4.5. - Ajuste de X/X_0 em função do tempo, utilizando uma equação similar à solução do modelo de Fick quando apenas o primeiro termo da série é significativo para as cinco telas..... | 88 |
| Tabela 4.6. - Tempo fixado de secagem..... | 92 |
| Tabela 4.7. - Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 1..... | 93 |
| Tabela 4.8. - Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 2..... | 94 |
| Tabela 4.9. - Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 3..... | 95 |
| Tabela 4.10. - Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 4..... | 96 |
| Tabela 4.11. - Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 5..... | 97 |
| Tabela 4.12. - Coeficientes de regressão para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3..... | 99 |
| Tabela 4.13. - Análise de variância para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3..... | 99 |
| Tabela 4.14. - Valores para o teste F para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.15. - Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 3..... | 102 |
| Tabela 4.16. - Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 3..... | 102 |
| Tabela 4.17. - Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 3..... | 103 |
| Tabela 4.18. - Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3..... | 106 |
| Tabela 4.19. - Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3..... | 106 |
| Tabela 4.20. - Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3..... | 106 |
| Tabela 4.21. - Efeito da umidade relativa e da temperatura na umidade de equilíbrio (MOTA LIMA <i>et al.</i> , 2004)..... | 112 |
| Tabela 4.22. - Resultados estimados para a isoterma de dessorção a 25°C e amostra de papel seca na condição (80°C; 0,5m/s)..... | 113 |
| Tabela 4.23. - Resultados estimados para a isoterma de dessorção a 50°C e amostra de papel seca na condição (80°C; 0,5m/s)..... | 113 |
| Tabela 4.24. - Cálculo energético para os ensaios 1, 9 e 4 e resultados obtidos da tela 3.. | 114 |
| Tabela 4.25. - Condições dos ensaios de secagem natural..... | 116 |
| Tabela 4.26. - Parâmetros das Equações (4.16) – (4.18)..... | 121 |
| Tabela 4.27. - Parâmetros característicos para a Eq (4.19)..... | 127 |
| Tabela 4.28. - Teor de umidade final das folhas secas em diferentes condições..... | 132 |
| Tabela 4.29. - Resultados da análise da gramatura média..... | 133 |
| Tabela 4.30. - Resultados da análise da espessura média..... | 134 |
| Tabela 4.31. - Resultados da análise da densidade aparente..... | 136 |
| Tabela 4.32. - Resultados da análise da densidade real..... | 137 |
| Tabela 4.33. - Resultados da análise da porosidade..... | 138 |
| Tabela 4.34. - Resultados da análise de resistência à tração e alongamento..... | 140 |
| Tabela 4.35. - Resultados da análise de resistência ao arrebentamento..... | 141 |
| Tabela 4.36. - Resultados da análise da variação dimensional do papel após imersão em água..... | 143 |
| Tabela 4.37: Resultados da análise de ascensão de água por capilaridade..... | 144 |

NOMENCLATURA

| | |
|-----------------|---|
| A, A', A'', a | constantes nas Eqs. (4.14) – (4.16) |
| a : | parâmetro (Equação 2.16) |
| a_1 : | área do tubo (cm^2) |
| a_2 : | área do orifício da placa (cm^2) |
| a_w : | atividade de água |
| B, B', B'', b | constantes nas Eqs. (4.14) – (4.16) |
| b : | pressão barométrica local (mmHg) |
| b_i : | parâmetros (Equações 2.2 – 2.7) |
| C : | parâmetro (Equação 2.17) |
| d : | diâmetro (μm) |
| D_{ef} : | difusividade efetiva (cm^2/s) |
| F : | teste F |
| h : | coeficiente de transferência de calor ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C}$) |
| K : | coeficiente de transferência de massa ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{s}$) |
| K : | constante de secagem |
| L : | espessura da folha (mm) |
| l : | espessura da placa (cm) |
| L : | termo linear da variável independente codificada (Diagrama de Pareto) |
| m : | massa (g) |
| MQ : | média quadrática (ANOVA) |
| n : | parâmetro (Equação 2.17) |
| N_c : | taxa de secagem na fase constante ($\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{min}$) |
| n_s : | fluxo mássico de sólidos ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
| n_w : | fluxo mássico de umidade ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
| p : | probabilidade estatística |
| $P_{est,1}$: | pressão estática a montante da placa de orifício |
| $P_{sat(T)}$: | pressão parcial de vapor da água pura à mesma temperatura (Pa) |
| P_w : | pressão parcial de vapor do produto (Pa) |

| | |
|------------|---|
| Q: | termo quadrático da variável independente codificada (Diagrama de Pareto) |
| Q_{ar} : | vazão mássica do ar (kg/min) |
| R: | constante dos gases (J/mol.K) |
| r: | raio da partícula (cm) |
| R^2 : | coeficiente de correlação |
| S: | área da superfície (mm^2) |
| S_b : | razão de encolhimento volumétrico (-) |
| SQ: | soma quadrática (ANOVA) |
| T: | temperatura do ar – variável codificada |
| t: | tempo (s) |
| T_{ar} : | temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) |
| UR: | umidade relativa do ambiente (%) |
| V: | volume (m^3) |
| v: | velocidade do ar - variável codificada |
| v_{ar} : | velocidade do ar (m/s) |
| W: | taxa de secagem ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
| X(t): | teor de umidade do sólido em função do tempo (b.s.; %) |
| X: | teor de umidade (b.s.; %) |
| X' : | teor de umidade (b.u.;%) |
| Y: | umidade média na corrente gasosa ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) |
| Y_{ar} : | umidade do ar na superfície da camada líquida ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) |
| Z: | comprimento (m) |

- *Subscrito*

| | |
|-----|----------------------|
| ap: | aparente |
| ar: | ar |
| C: | constante |
| cr: | estado crítico |
| e: | estado de equilíbrio |
| h: | bulbo úmido |

| | |
|------|-------------------------|
| max: | máxima |
| 0: | condição inicial |
| f: | condição final |
| r: | real |
| s: | sólido |
| ss: | sólido seco |
| T: | tempo fixo de secagem |
| w: | umidade na fase líquida |

- *Letras gregas*

| | |
|------------------|---|
| λ : | calor latente de vaporização da água na $T_{h,ar}$ (kJ/kg) |
| σ : | fator de encolhimento local (m^3/m^3) |
| $\bar{\sigma}$: | fator de encolhimento médio (m^3/m^3) |
| $1/\rho_s$: | volume específico (m^3/kg) |
| α : | coeficiente de descarga para a placa de orifício |
| β : | coeficiente de encolhimento volumétrico (m^3/m^3) |
| ΔP_1 : | queda de pressão na placa de orifício (cm H ₂ O) |
| ε : | porosidade |
| γ : | coeficiente de encolhimento linear (m/m) |
| γ' : | fator de proporcionalidade entre as densidades inicial e de equilíbrio da camada externa da partícula (-) |
| $\rho_{s, ap}$: | densidade aparente do sólido (kg/m^3) |
| ξ : | fator de compressibilidade para a placa de orifício |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação à pesquisa

Desde o séc. XIX, as principais fontes para a produção da pasta de papel são as árvores. Hoje em dia, grande parte do papel é produzida a partir de florestas geridas no âmbito de uma política de Gestão Florestal que visa o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente (Recipac, 2000).

A fabricação do papel com utilização de fibras recuperadas é prática corrente na Indústria Papeleira européia há mais de 600 anos. Contudo, foi apenas nas últimas décadas, graças ao desenvolvimento de técnicas de reciclagem aliado aos sistemas de coleta, que o papel usado assumiu uma posição significativa como matéria-prima complementar às fibras virgens fornecidas pela madeira (Recipac, 2000).

A atividade de reciclagem no Brasil se confunde com as próprias origens da fabricação de papel no País, iniciada há mais de 100 anos. À medida que se ampliava a fabricação de papel a partir de matérias-primas virgens, estimulando um maior consumo, paralelamente se ampliava a atividade de reciclagem, consequência da maior disponibilidade de papéis recicláveis. Desta forma, a atividade de reciclagem de papel no Brasil tem fundamento em questões de natureza essencialmente econômicas (Bracelpa, 2003), visto que a produção da pasta celulósica a partir de fibras recuperadas consome menos energia do que a produzida a partir de fibras virgens.

Atualmente, a reciclagem de papel vem apresentando um destaque crescente, na medida que contribui para a preservação e conservação de recursos naturais e para a redução dos lixos urbanos.

A fabricação do papel, tanto a partir de fibras virgens quanto de fibras recuperadas, exige um grande consumo de energia. A preparação da polpa é responsável

por quase metade deste consumo. Além da preparação da polpa, outra etapa importante e complexa é a secagem do papel, pois também requer um alto consumo energético e apresenta uma influência direta na qualidade do papel produzido.

As grandes indústrias papeleiras utilizam secadores tipo cilindro, que secam por condução e convecção. No entanto, estes secadores podem ocupar um espaço equivalente a um campo de futebol, ou seja, são secadores enormes, além de apresentarem um elevado investimento inicial.

Em pequenas produções de papel reciclado, a secagem da folha de papel é realizada ao ar livre. A secagem é feita por meio de prensagem em tecidos ou coloca-se a folha em varais, presas por prendedores. A secagem natural, embora não acarrete em custo direto ao produtor, é dependente das condições ambientais. Além disso, o elevado tempo para que ocorra a secagem total da folha pode representar um custo indireto que muitas vezes não é contabilizado. Ainda, não havendo um controle da secagem poderá também ocorrer diferenças na qualidade do produto final.

O presente trabalho tem como objetivo o projeto e a construção de um secador convectivo, em escala de laboratório, para a secagem de papel reciclado. Tem-se, então, um apelo ao desenvolvimento sustentável, pois se pretende direcionar a aplicação deste tipo de secador em pequenas cooperativas de reciclagem de papel.

Analisou-se também experimentalmente o processo de secagem da polpa de celulose através da determinação de sua cinética, da eficiência energética e da análise da qualidade do papel obtido, verificando a influência das diferentes condições operacionais de secagem. O encolhimento do papel durante a secagem foi estudado a fim de relacionar as modificações sofridas pelo material com as condições operacionais e as características físicas como porosidade, densidade aparente e qualidade do produto.

1.2. Metas do trabalho

Com base no exposto, o desenvolvimento deste trabalho teve como metas específicas:

- Projeto de um secador com circulação forçada em escala de laboratório para a secagem da polpa de celulose;
- Determinação das curvas de secagem em função de diferentes condições operacionais;
- Determinação das isotermas de dessorção do papel pelo método dinâmico, utilizando o equipamento DVS (Dynamic Vapour Sorption 2);
- Análise da qualidade do produto final para diferentes condições de secagem;
- Análise da eficiência energética da secagem, avaliando-se o potencial de aplicação do secador em pequenas empresas produtoras de papel reciclado;
- Estudo comparativo entre a secagem natural ao ar livre e a secagem por convecção forçada;
- Análise do encolhimento do papel durante a secagem, relacionando-o com as condições de operação e as propriedades físicas do papel, como porosidade, massa específica aparente e também com a qualidade do produto seco obtido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Origem e composição do papel

A necessidade de arquivar e transmitir informações fez com que o Homem começasse a fazê-lo em diversos materiais, tais como o barro, papiro, etc, até chegar ao papel, que, apesar dos grandes avanços tecnológicos na área, ainda se mantém como a base fundamental da fixação do conhecimento humano (Recipac, 2000).

De acordo com a tradição, o papel foi inventado em 105 d.C. por um chinês da corte oficial chamado Ts'ai Lun, a partir de fibras de seda e também fibras de origem vegetal (Celpa, 2000).

A evolução do papel foi um processo desenvolvido ao longo dos tempos históricos, simultaneamente por diferentes povos. No final do séc. XIX foi desenvolvida uma técnica de fabricação na qual as aparas de madeira eram cozidas à alta pressão com ácido ou lixívia (Tetra Pak, 1988 apud Antunes, 2001). Chamou-se de pasta química à pasta produzida por este método e desenvolveu-se em dois sentidos: o processo ao sulfato (Kraft) e o processo ao sulfito.

A partir de 1950 e até 1980, verificou-se um grande avanço na técnica de fabricação do papel. Além do aumento na velocidade de trabalho e desenvolvimento de máquinas especiais para a produção de tipos particulares de papel e cartão, novos materiais foram introduzidos (pastas termo-mecânicas), papéis usados destinados, novos aditivos, novos produtos químicos e corantes, novas opções para a formação das folhas (formatadores de dupla teia), colagens neutras, maior ênfase na proteção do ambiente (circuitos fechados) e automatização da linha de produção (Celpa, 2000).

O papel possui uma estrutura porosa, sendo composto de dois grupos de constituintes: os constituintes fibrosos, parte majoritária da composição, e os não fibrosos.

O componente fundamental do papel e do cartão é a celulose. Em função do produto final a obter, as fibras necessárias à fabricação do papel podem provir do algodão, da madeira ou de palhas de cereais. No seu fabrico, são adicionados também outros produtos, tais como: resinas e colas (aumentam a consistência e a resistência à umidade e às tintas), sais de alumínio (fixam as resinas à celulose), cargas (inertes), como o carbonato de sódio (aumentam o peso e dão mais consistência), e corantes (Martinho e Gonçalves, 1999 apud Antunes, 2001).

2.2. Mercado do papel

No período de 1980 a 1995, houve um grande crescimento na produção de papel no Brasil, partindo para o comércio internacional, tendo em vista que o consumo nacional foi incapaz de absorver toda a produção, que se elevou de 3,36 milhões de toneladas de papel e 2,87 milhões de toneladas de celulose, em 1980, para, respectivamente, 5,85 milhões e 5,44 milhões de toneladas, em 1995 (Comitê, 1999).

O setor da indústria papeleira nacional é composto por 220 empresas e conta com 255 unidades industriais em 16 estados. A produção está concentrada em grandes grupos/empresas: Grupo Klabin, Grupo Suzano, Grupo Votorantim, Ripasa, Champion, Igaras, Rigesa, Grupo Aracruz, Cenibra, Bahia Sul, Jarí e Riocell (Comitê, 1999). Segundo a Bracelpa, os cinco maiores fabricantes de celulose no Brasil concentram, em 2003, cerca de 72% da produção de celulose. Estes são: Grupo Klabin (1,5 milhão de toneladas), Grupo Aracruz (1,3 milhão de toneladas), Grupo Suzano (1 milhão de toneladas), Cenibra (862 mil de toneladas) e Grupo Votorantim (793 mil de toneladas). A Figura 2.1 mostra a distribuição aproximada da produção de papel e celulose no Brasil no ano 2003 (Infoinvest, 2005).

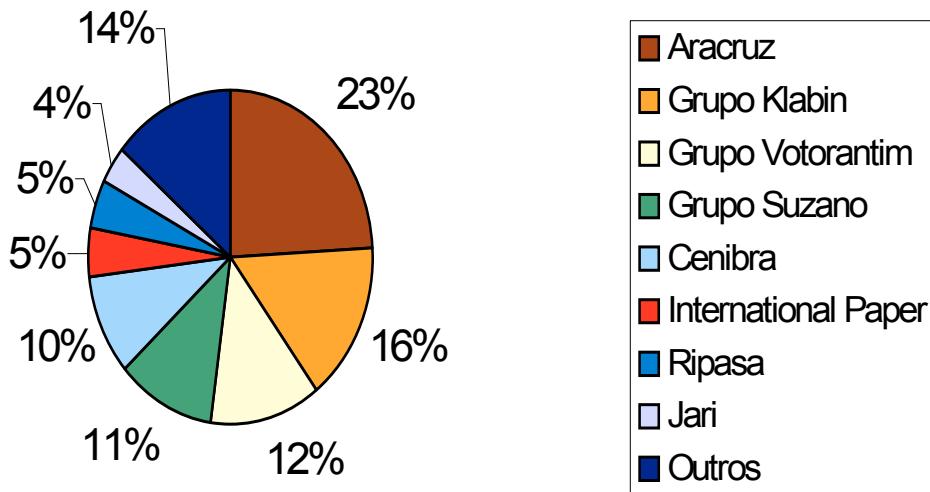


Figura 2.1: Distribuição da produção de papel e celulose no Brasil no ano de 2003
(Infoinvest, 2005).

A Aracruz possui a maior fábrica de celulose fibra curta à base de eucalipto do mundo e destina ao mercado externo 94% do que fabrica, o que lhe confere liderança indiscutível neste mercado. Como os demais fabricantes de celulose, a Aracruz é integrada em direção à atividade florestal, uma condição necessária para garantir ganhos de produtividade e de competitividade. O grupo de empresas Klabin destina cerca de um quarto de sua produção de celulose para a comercialização no mercado interno e externo, sendo o restante consumido internamente na produção de papéis. Os outros dois grandes fabricantes brasileiros, Suzano e Cenibra são responsáveis por, aproximadamente, um quarto da produção total de celulose do país (Fonseca, 2003).

O mercado interno, incluindo-se as vendas domésticas e consumo próprio das empresas, registrou do total produzido em 2002, 8,01 milhões de toneladas de pastas celulósicas e 7,66 milhões de toneladas de papel (Bracelpa, 2003).

O mercado de reciclagem de papel no Brasil possui uma estrutura bem definida e de muitos anos de atuação. O comércio de reciclagem deste resíduo já ocorre desde a formação das grandes indústrias papeleiras que aproveitam os papéis gerados nas sobras de linha de produção, incorporando-os novamente ao sistema. Os recicladores, assim como os catadores e sucateiros, estão espalhados por todo o território brasileiro.

O Brasil recicla cerca de 1,7 milhões de toneladas ao ano, representando cerca de 60% do papelão consumido no país (Guimarães, 2000). Em 2002, o Brasil ultrapassou os

Estados Unidos na recuperação das embalagens de papelão ondulado. A taxa de reciclagem de embalagens Longa Vida, em 2002, no Brasil foi de 15%, totalizando 30 mil toneladas. Cada tonelada de embalagem cartonada reciclada gera, aproximadamente, 680 quilos de papel kraft, impedindo o corte de 21 árvores cultivadas em áreas de reflorestamento comercial (Cempre, 2004).

A Tabela 2.1 indica a evolução na taxa de recuperação de papéis recicláveis no Brasil nos anos de 1980 a 2002, indicando o crescente aumento no mercado de reciclagem de papel (Cempre, 2004).

Tabela 2.1: Evolução na taxa de recuperação de papéis recicláveis - 1980 a 2002.

| Ano | Consumo aparente de papel de todos os tipos (mil t) | Recuperação de papéis (mil t) | Taxa de recuperação (%) |
|------|---|-------------------------------|-------------------------|
| 1980 | 3.428 | 1.052 | 30,7 |
| 1990 | 4.053 | 1.479 | 36,5 |
| 2000 | 6.814 | 2.612 | 38,3 |
| 2002 | 6.879 | 3.017 | 43,9 |

Fonte: Cempre (2004).

2.3. Papel Reciclado

Apesar de o papel ser produzido a partir de um recurso renovável, como é a madeira, existe tecnologia que permite a sua reutilização, partindo-se inicialmente de uma coleta seletiva, triagem, classificação do papel por tipos, Trituração, enfardamento e venda.

A reciclagem de papel e cartão permite assim uma grande redução da quantidade de resíduos sólidos urbanos, evitando uma excessiva utilização dos recursos naturais tais como a madeira e a água, além de reduzir bastante o consumo energético na indústria papeleira, pois o grande consumidor de energia no processo de fabricação do papel é a produção da pasta virgem (através dos processos mecânicos ou químicos) (Byström e Lönnstedt, 2000).

Na fabricação de uma tonelada de papel, a partir de papel usado, o consumo de água é menor e o consumo de energia é cerca da metade. Economizam-se 2,5 barris de petróleo, 98 mil litros de água e 2.500kW/h de energia elétrica com uma tonelada de papel reciclado (Cempre, 2004).

Os principais problemas referentes à coleta seletiva são a baixa qualidade da maior parte do papel e cartão recolhido no contentores, além de existirem vários papéis que não podem ser reciclados como, por exemplo, papel plastificado, betuminoso e papel com muita tinta (revistas). Além disso, a contaminação com cera, óleo, plástico e outros materiais prejudicam a sua reciclagem (Recicla, 2004).

A reciclagem do papel é conseguida através do aproveitamento das fibras de celulose existentes nos papéis usados para produzir papéis novos. As operações de desagregação e separação de fibras recuperadas de papéis usados são processos mais simples do que as utilizadas para extraír fibras virgens (Recicla, 2004).

Após a utilização, os papéis velhos são introduzidos no processo de modo a reduzir a quantidade de pasta de papel virgem necessária para a produção de papel novo. Dependendo da tecnologia aplicada, uma tonelada de papel reciclado permite poupar de 2 a 3m³ de madeira, diminuindo o impacto ambiental gerado pela produção de papel (Recicla, 2004).

As fibras celulósicas podem ser recicladas de 3 a 5 vezes. Por isso, a produção de papel reciclado implica na adição de alguma quantidade de pasta de papel virgem para substituir fibras degradadas (Celpa, 2003).

O aumento na utilização de papéis velhos na indústria papeleira é hoje possível graças ao desenvolvimento tecnológico verificado fundamentalmente na destintagem e na depuração do papel, permitindo melhorar significativamente a qualidade das fibras recicladas e as respectivas taxas de recuperação (Celpa, 2003).

2.4. Fibras utilizadas na produção do papel

As madeiras empregadas como matéria-prima fibrosa para a produção de papel são classificadas em dois grupos: o grupo das coníferas ou madeiras moles (*softwood*) e o grupo das folhosas ou madeiras duras (*hardwood*). Ambos os grupos contêm celulose, lignina, hemicelulose e extractivos em sua composição química, mas com diferenças características de cada grupo no que se refere à parte estrutural (Fardim, 1999).

A celulose, principal componente da parede celular da fibra, é um polissacarídeo de cadeia linear, com grau de polimerização em torno de 10000, constituído de β -D-anidroglucopiranose β (1-4). É insolúvel em água, solventes orgânicos neutros, ácidos e álcoois diluídos. A fórmula estrutural da celulose é apresentada na Figura 2.2.

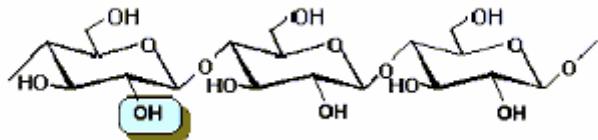


Figura 2.2: Fórmula estrutural da celulose (Celulose on line, 2004).

As hemiceluloses também são polissacarídeos, porém diferem da celulose por apresentarem cadeias ramificadas, além de serem polímeros de cadeia curta. São formadas por pentoses e hexoses, que originam as pentosanas e hexosanas (Celulose on line, 2004).

A lignina é um polímero amorfó, de composição química complexa, que confere firmeza e rigidez ao conjunto de celulose. É constituída de parede celular de natureza polimérica e tridimensional extremamente complexa, sendo o fenil-propano a sua unidade básica (Celulose on line, 2004).

Os constituintes menores incluem compostos orgânicos de diversas funções químicas e, em quantidade menor, compostos inorgânicos. Os constituintes menores solúveis em solventes orgânicos, em água, ou ainda em ambos, são denominados extractivos (Celulose on line, 2004).

As fibras vegetais de madeira podem ser classificadas em função do tamanho (Fed, 2000 apud Antunes, 2001) em:

- Fibras longas: provêm das espécies resinosas como o abeto e o pinheiro. O seu comprimento varia entre 3 e 5mm, resultando numa pasta de papel mais resistente.
- Fibras curtas: provenientes das espécies folhosas como o eucalipto, o choupo e a faia. O comprimento das fibras varia entre 0,75 e 2mm e possuem uma maior percentagem de celulose que as fibras longas.

As espécies mais utilizadas são: algodão, para a fabricação de papel de escrita; cânhamo, para a produção de papel de cigarros; linho, para a produção de papel-moeda e palha de cereais, utilizadas para produção de embalagens para ovos, medicamentos e papel cartão.

As fibras recuperadas são as provenientes da reciclagem de papel e cartão usados. Através da reciclagem de papel, pode-se recuperar a maioria das fibras de celulose que compõem o papel.

2.5. Produção da pasta de papel

Uma vez cortada a madeira, esta passa por uma série de operações para a preparação da pasta de papel, tais como: lavagem, raspagem (separação da casca do tronco da árvore) e fragmentação, de modo a se obter estilhas de madeira.

A extração da polpa de madeira pode ser realizada por meio de processos mecânicos, termomecânicos, quimiotermomecânicos e químicos. Os processos químicos, dentre eles o processo Kraft (processo ao sulfato), são os mais utilizados industrialmente em função da grande aplicabilidade para diferentes madeiras, alta resistência das polpas obtidas e possibilidade de emprego de sistemas de recuperação de compostos químicos (Fardim, 1999). No entanto, os processos químicos não aproveitam tão bem a madeira como os processos mecânicos.

Dentre as pastas consideradas de alto rendimento, citam-se (Bracelpa, 2003):

- Pasta mecânica: é a pasta de materiais ligno-celulósicos, obtida por processo puramente mecânico. Por conter fibras curtas e frágeis, além de uma quantidade elevada de lignina, é utilizada na produção de papel de jornal.

- Pasta mecanoquímica: é a pasta de materiais ligno-celulósicos, obtida por processo de desfibrilamento, sofrendo um tratamento químico posterior ao desfibrilamento.
- Pasta quimiomecânica (CMP): é a pasta de materiais ligno-celulósicos, prévia e levemente tratados com reagentes químicos, obtida por processo de desfibrilamento à pressão atmosférica.
- Pasta termomecânica (TMP): é a pasta obtida por desfibrilamento à disco, sob pressão, de materiais ligno-celulósicos previamente aquecidos com vapor saturado.
- Pasta quimiotermomecânica (CTMP): é a pasta obtida por desfibrilamento à disco, sob pressão (superior à atmosférica), de materiais ligno-celulósicos aquecidos, prévia e levemente tratados com reagentes químicos.

A pasta de papel apresenta, normalmente, a cor acinzentada ou castanha, devido à presença de lignina, podendo-se tornar mais branca através da aplicação de diferentes produtos (oxigênio, peróxido de hidrogênio, ozônio, dióxido de cloro ou ainda enzimas), a que se dá o nome de branqueamento (Bracelpa, 2003).

2.6. Operações de reciclagem

As principais operações envolvidas em um processo de reciclagem são: desintegração, depuração e lavagem, dispersão, destintagem e branqueamento (Gominho *et al.*, 1996 apud Antunes, 2001). Essas operações se baseiam em propriedades físicas e físico-químicas como: forma, tamanho, densidade e afinidade eletrostática, que distinguem os contaminantes das fibras.

O processo de reciclagem inicia-se com a introdução do papel usado, água e vapor em um tanque misturador (desintegrador), a fim de separar as fibras secundárias e de limpar os materiais não fibrosos de maiores dimensões (Gominho *et al.*, 1996 apud Antunes, 2001).

A operação de depuração tem como objetivo a eliminação de contaminantes na maior proporção possível com menor perda de fibra útil. A lavagem é normalmente

efetuada por filtração, num espessador, através de telas de plástico permeáveis a partículas de pequena dimensão.

A dispersão é um processo mecânico através do qual o papel usado é destroçado e misturado com água, a altas temperaturas que promovem uma melhor separação das fibras. A dispersão facilita a destintagem e aumenta a eficiência dos produtos de branqueamento (Meister e Souza, 1995 apud Antunes, 2001).

A destintagem consiste na remoção das partículas de tinta aderidas à superfície das fibras. Esta operação envolve a utilização de substâncias químicas para extrair as partículas de tinta do papel (Meister e Souza, 1995 apud Antunes, 2001).

O papel reciclado necessita de menos branqueamento do que a pasta de papel virgem, uma vez que já foi branqueado quando foi inicialmente produzido, evitando um segundo processo quando é reciclado. Esta operação pode ser realizada no fim do processo de reciclagem ou logo no início, no desintegrador, evitando o amarelecimento da pasta provocado pela soda cáustica, que normalmente é adicionada no desintegrador (Gominho *et al.*, 1996 apud Antunes, 2001).

Uma fibra não refinada possui uma parede primária um pouco danificada. Já uma fibra que sofreu uma refinação branda não apresenta a parede primária, enquanto que uma fibra bem refinada começa a destruir a parede secundária. Uma refinação extrema destrói a fibrilação interna. Em se tratando de fibra secundária, uma refinação mais branda é sempre necessária para que haja a reabertura da estrutura da fibra que foi fechada no processo de secagem (Zuben, 1996).

A Figura 2.3 apresenta um esquema das etapas do processo de reciclagem do papel.

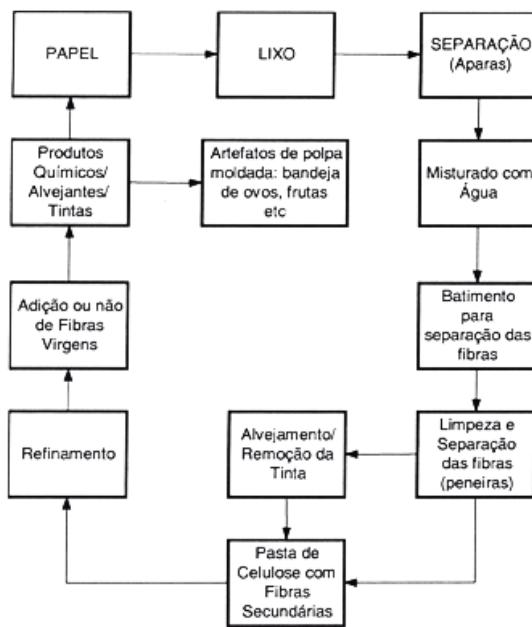


Figura 2.3: Processo de reciclagem do papel (Grossi e Valente, 2001).

2.7 Secagem

2.7.1. Conceito e importância

A secagem é uma operação unitária que tem por objetivo eliminar parcialmente ou totalmente a água presente em um corpo úmido por meio da evaporação desta. O corpo úmido pode ser sólido ou líquido, mas o produto final é sólido (com exceção de casos particulares de desidratação de um líquido não volátil, como é o caso da secagem de óleos).

A operação de secagem tem aplicação em vários segmentos industriais na preparação de pós, sólidos granulares, alimentos, produtos químicos e farmacêuticos, etc. Dentre os objetivos da secagem, pode-se ressaltar: a preservação do produto; redução de peso e volume do material, facilitando assim o seu transporte; além de permitir a armazenagem do produto em longo prazo (Cook e Dumont, 1991).

No âmbito ambiental, a secagem tem sido utilizada com grande êxito para a redução de peso e volume do material, além da redução do risco de contaminação como em estudos de secagem de lodo (Vaxelaire *et al*, 2000) e de tratamento de resíduos hospitalares (Carvalho, 2003).

Quando um sólido úmido é submetido a uma secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente (Mujumdar e Menon, 1995):

1. Transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade na superfície do corpo.
2. Transferência da umidade presente no interior para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devida ao processo 1.

A taxa de secagem é uma combinação destes dois processos. A transferência de calor do ambiente para a superfície do sólido pode ocorrer por convecção, condução ou radiação e, em alguns casos, por uma combinação destes processos (Mujumdar e Menon, 1995).

No processo 1, a remoção da água sob forma de vapor da superfície do sólido depende de condições externas, tais como: temperatura, umidade e fluxo do ar, área da superfície exposta e pressão.

No processo 2, o movimento da umidade interna é função da natureza do sólido, da temperatura e do conteúdo de umidade.

Segundo Sherwood (1929), os mecanismos gerais da secagem são três:

- Evaporação do líquido na superfície do sólido: resistência à difusão interna de líquido pequena se comparada à resistência para remover o vapor da superfície;
- Evaporação na superfície do sólido: resistência à difusão interna de líquido grande se comparada à resistência para remover o vapor da superfície;
- Evaporação no interior do sólido: resistência à difusão interna de líquido grande se comparada à resistência total para remover o vapor.

A escolha de um secador adequado a um determinado produto depende das características físico-químicas do material, da escala de produção, das limitações intrínsecas ao produto, rendimento e consumo energético. Um secador pode apresentar não só problemas durante o processo propriamente dito como também acarretar danos de deterioração ou não conformidade do produto em virtude de efeitos secundários gerados durante a operação de secagem, tais como: deterioração por perda de massa e atrito excessivo, deterioração por elevação excessiva da temperatura modificando as

características do produto, deterioração por oxidação indesejável do produto devido a um tempo de secagem muito longo etc (Ferlin, 1998).

2.7.2. Higroscopicidade

2.7.2.1. Conteúdo de umidade dos sólidos

A umidade pode se apresentar no sólido em diferentes formas. Segundo Mujumdar e Menon (1995), a umidade *superficial* é aquela na qual o líquido existe como um filme externo sobre o material devido a efeitos de tensão superficial.

A umidade *livre* é a umidade que pode ser eliminada em uma determinada condição de processo e pode conter umidade ligada e não-ligada. A umidade pode estar *ligada* no sólido pela retenção em capilares, em solução contida nas paredes celulares, adsorvida química ou fisicamente na superfície do sólido. A umidade *não-ligada* em um material higroscópico é a umidade em excesso do conteúdo de umidade de equilíbrio correspondente à umidade de saturação. Todo o conteúdo de umidade presente em um material não higroscópico está na forma não-ligada. A umidade *livre* se apresenta em estado funicular ou em estado pendular (Strumillo, 1986).

No estado funicular, um estado líquido contínuo existe dentro dos corpos porosos. O movimento do líquido para a superfície externa do sólido se dá pela ação da capilaridade. Como a umidade é removida, a continuidade da fase líquida é gradualmente rompida devido à sucção de ar dentro dos poros formando pontos isolados de umidade (estado pendular). Deste modo, o fluxo capilar é apenas possível em uma escala localizada. Quando o material está próximo de estar completamente seco, a umidade é retida como uma monocamada de moléculas sobre as paredes porosas, sendo principalmente removida por fluxo de vapor. No estado pendular, o líquido ao redor e entre as partículas discretas é descontínuo, de forma que a umidade é separada por bolhas de ar (Strumillo, 1986).

2.7.2.2. Isotermas de sorção

A atividade da água em um sólido é expressa como a razão entre a pressão parcial de vapor d'água na fase gasosa em equilíbrio com a fase sólida úmida a uma dada temperatura e pressão de vapor d'água saturada à mesma temperatura, sendo também uma função da umidade relativa do ambiente.

$$a_w = \frac{P_w}{P_{sat(T)}} = \frac{UR}{100} \quad (2.1)$$

Onde: a_w : atividade da água

UR: umidade relativa do ambiente

P_w : pressão parcial de vapor do produto

$P_{sat(T)}$: pressão parcial de vapor da água pura à mesma temperatura

- Quando a atividade de água em um sólido é alta, ou seja, próximo da unidade, a água nele contida encontra-se livre. Durante a secagem, a água se comporta como se estivesse pura. É o caso de vários produtos minerais muito úmidos e sem ligações -OH ou de produtos biológicos muito hidratados.
- Para baixos valores de atividade de água, a umidade presente no sólido encontra-se ligada, e a remoção desta água, no qual a pressão de vapor saturado é menor do que se ela estivesse pura, é mais difícil. A água ligada é fixa à matéria seca por ligações de diferentes tipos (ligações químicas, água fixa por capilaridade nos poros, etc).

As isotermas de sorção consistem na representação da umidade relativa de equilíbrio, ou da pressão parcial de vapor de um produto, em função de seu teor de umidade a uma dada temperatura.

A relação entre o conteúdo de umidade do material e a umidade do ar é determinada experimentalmente pela permanência por um tempo suficientemente longo de contato entre o material e o ar a uma determinada umidade relativa e a uma temperatura constante. Como o equilíbrio pode ser atingido por um processo de adsorção ou dessorção de umidade, a isoterma é chamada de isoterma de adsorção ou dessorção. Quando ocorre uma irreversibilidade no processo de sorção, ou seja, um posicionamento da isoterma de dessorção diferente da de adsorção, está caracterizado o fenômeno conhecido como histerese (IUPAC, 1985).

Essencialmente, a secagem do material até um conteúdo de umidade que esteja abaixo de um certo ponto A não é recomendável se o material for colocado em contato com o ar de umidade relativa igual a $U.R_A$. Se a armazenagem é necessária para um produto com um conteúdo de umidade mais baixo em tais condições, este produto deve ser colocado em um recipiente hermeticamente fechado (Strumillo e Kudra, 1986).

Uma isoterma de sorção pode ser dividida em três regiões dependendo do estado em que se encontra a água presente (Figura 2.4):

- Região A ($0 < a_w < 0,35$): a água está altamente ligada a sítios individuais e não está disponível para reações. É a região em que as camadas monomoleculares são formadas.
- Região B ($0,35 < a_w < 0,60$): a água encontra-se mais fracamente ligada. Esta região representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada.
- Região C ($a_w > 0,60$): a água está presente em grandes capilares. Representa a região de condensação capilar, onde a umidade condensa nos poros do material seguida pela dissolução de componentes solúveis presentes (Labuza, 1968).

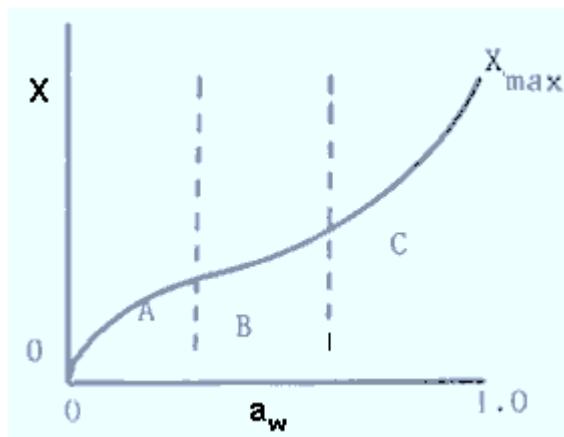


Figura 2.4: Isoterma de sorção típica (Mujumdar e Menon, 1995).

2.7.2.3. Modelos empíricos de isotermas

As curvas características das isotermas de sorção, representadas na Figura 2.5, são classificadas segundo Brunauer *et al.* (1938), nas seguintes formas principais:

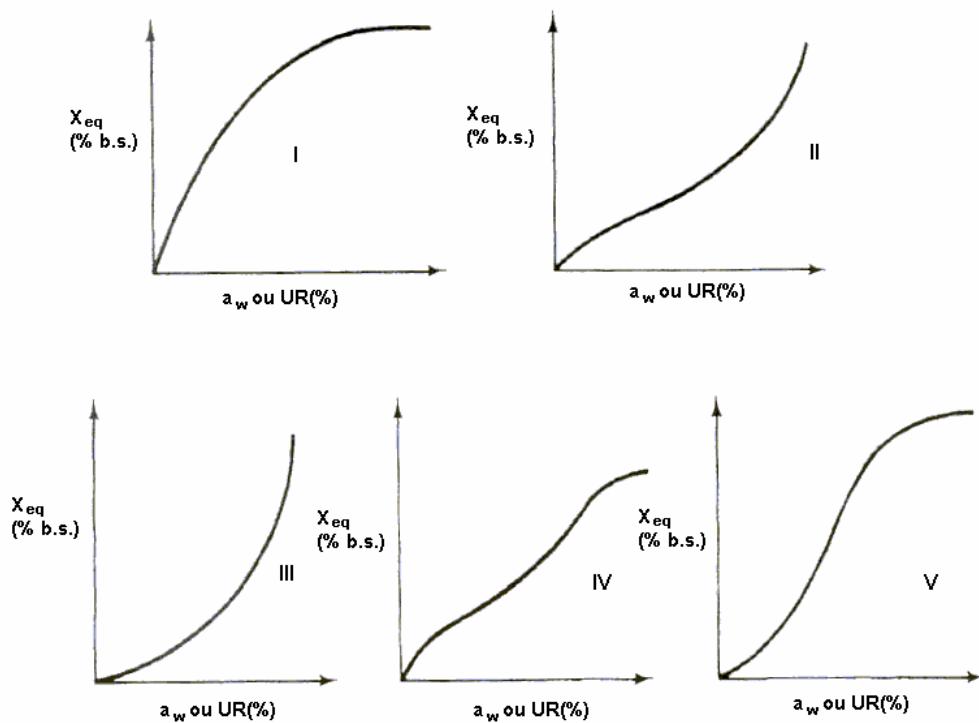


Figura 2.5: Formas características das isotermas de sorção (Brunauer *et al.*, 1938).

Tipo I: Isoterma tipo Langmuir, característica de uma adsorção pura em camada monomolecular.

Tipo II: Isoterma sigmoidal (ou forma de S), característica de formação de multicamadas de moléculas adsorvidas sobre a superfície do sólido. Freqüentemente encontrada em sólidos não porosos ou com poros maiores do que microporos.

Tipo III: Embora similar ao tipo II, são raramente observadas em sólidos não porosos. Seu formato sugere também adsorção em camadas polimoleculares.

Tipo IV e Tipo V: Caracterizam a condensação capilar, quando a pressão de saturação do vapor do adsorbato é atingida. Encontradas em materiais com meso e macroporos em determinadas faixas e com fraca interação adsorbato-adsorvente.

Muitas equações (teóricas, semi-empíricas e empíricas) têm sido propostas na literatura a fim de descrever o fenômeno de sorção. No entanto, nenhuma delas consegue descrever satisfatoriamente esse fenômeno ao longo de toda a faixa de atividade de água ($0 < a_w < 1$).

A Tabela 2.2 apresenta as equações mais utilizadas para descrever o comportamento das curvas de dessorção de umidade. A Equação de Langmuir pode se aplicada para descrever o comportamento de isoterma tipo I. A Equação de Brunauer, Emmet e Teller (BET) tem sido aplicada para quase todos os materiais, mas especialmente para polímeros hidrofílicos com $a_w < 0,5$. A Equação de Halsen é mais apropriada para materiais do tipo I, II e III. Para cereais, a Equação de Chung e Pfost é considerada mais adequada, enquanto que a Equação de Iglesias e Chirife tem sido aplicada com sucesso em isotermas do tipo III. A Equação de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) é considerada como o modelo mais versátil, pois é aplicada de maneira satisfatória em uma ampla faixa de atividade de água ($0,1 < a_w < 0,9$) (Marinos-Kouris e Maroulis, 1995).

Tabela 2.2: Efeito da atividade da água e da temperatura na umidade de equilíbrio.

| Referência | Equação |
|---|--|
| Langmuir (1918) | $a_w \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{b_0} \right) = \frac{1}{b_0 b_1} \quad (2.2)$ |
| Brunauer-Emmet-Tetter (BET) (1938) | $\frac{a_w}{(1-a_w)X} = \frac{1}{b_0 b_1} + \frac{b_1 - 1}{b_0 b_1} a_w \quad (2.3)$ |
| Halsey (1948) | $a_w = \exp \left[-\frac{b_1}{RT} \left(\frac{X}{b_2} \right)^{b_3} \right] \quad (2.4)$ |
| Chung e Pfost (1967) | $\ln a_w = -\frac{b_1}{RT} \exp(-b_2 X) \quad (2.5)$ |
| Iglesias e Chirife (1976) | $\ln a_w = -\exp[(b_1 T + b_2) X^{b_3}] \quad (2.6)$ |
| Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Bizot (1983) | $X = \frac{b_0 b_1 b_2 a_w}{(1-b_1 a_w)(1-b_1 a_w + b_1 b_2 a_w)} \\ b_1 = b_{10} \exp(b_{11}/RT) \\ b_2 = b_{20} \exp(b_{21}/RT) \quad (2.7)$ |

X, umidade de equilíbrio; aw, atividade de água; T, temperatura; bi, parâmetros da equação.

Fonte: Marinos-Kouris e Maroulis (1995).

2.7.3. Cinética da secagem

Segundo Strumillo e Kudra (1986), a cinética de secagem está associada à mudança do conteúdo médio de umidade e da temperatura média do material úmido com o tempo. A cinética de secagem permite a determinação da quantidade de água evaporada, tempo de secagem, consumo de energia, etc.

O estudo de cinética de secagem é de grande importância para o dimensionamento do secador, pois o tempo de secagem determina o tempo de residência do material no seu interior. Os principais parâmetros que influenciam a cinética de secagem de um material sólido são: a temperatura, a umidade do ar, a velocidade relativa do ar e a pressão total.

Os dados para a determinação da curva cinética são geralmente obtidos em laboratório, medindo a variação da massa e da temperatura do material com o tempo, utilizando ar aquecido como agente secante (Strumillo e Kudra, 1986).

A evolução da secagem convectiva é representada pelas curvas típicas de secagem. A Figura 2.6 apresenta a *curva de secagem*: variação do teor de umidade do sólido com o tempo, *curva de taxa de secagem*: taxa de secagem em função do teor de umidade ou do tempo de secagem e *curva de temperatura*: temperatura do produto durante a secagem. Pode-se observar três fases ou períodos de secagem distintos: período inicial de secagem, período de secagem à taxa constante e período à taxa decrescente.

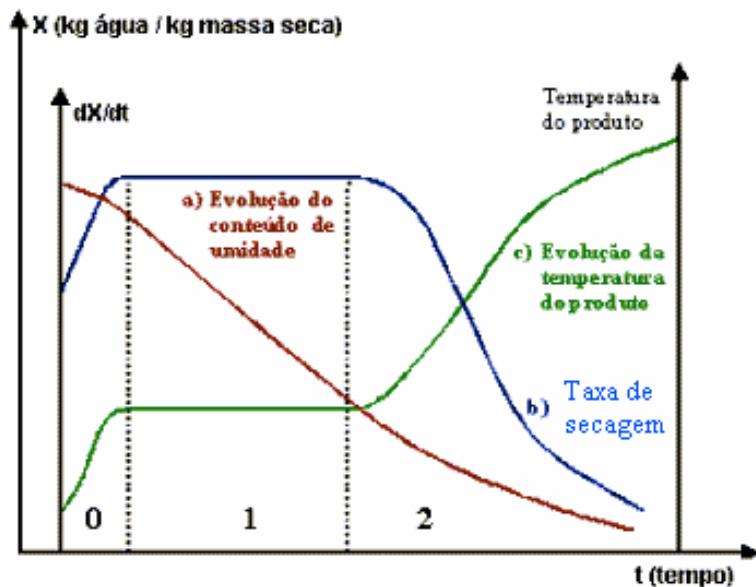


Figura 2.6: Curvas típicas de secagem convectiva (Park, et al., 2001).

- Período inicial de secagem: nesta fase, o sólido está em contato com um ar de temperatura superior ou inferior à temperatura inicial do sólido. A taxa de secagem diminui ou aumenta até a temperatura da superfície do sólido atingir o valor correspondente ao patamar do período de taxa constante.

- Período de secagem à taxa constante: nesta fase, a superfície do sólido é coberta por um filme contínuo de água livre. A taxa global da secagem é controlada pela resistência na fase gasosa. A temperatura da superfície do sólido é igual à temperatura de bulbo úmido do ar. A taxa de evaporação pode ser expressa por um coeficiente de transferência de massa e um gradiente de umidade.

$$W = K(Y_{ar} - Y) \quad (2.8)$$

Onde: W: fluxo mássico ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{s}$)

Y: umidade média do ar ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

Y_{ar} : umidade do ar na superfície da camada líquida ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

K: coeficiente de transferência de massa ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^2\text{s}$)

O fluxo de secagem pode também ser expresso por um coeficiente de transferência de calor, sendo o calor transferido utilizado na evaporação da umidade contida no material.

$$W' = \frac{h(T_{ar} - T_{h,ar})}{\lambda} \quad (2.9)$$

Onde: W' : fluxo de calor ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{s}$)

h: coeficiente de transferência de calor ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C}$)

T_{ar} : temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)

$T_{h,ar}$: temperatura do bulbo úmido do ar ($^\circ\text{C}$)

λ : calor latente de vaporização da água na $T_{h,ar}$ (kJ/kg)

- Período de secagem à taxa decrescente: nesta fase, a água na superfície do sólido não se encontra mais na forma de umidade superficial. O fluxo de calor absorvido pelo sólido é utilizado para evaporação da água na superfície e para aumentar a temperatura do sólido. A quantidade de umidade que chega à superfície decresce gradualmente. Esta fase é também conhecida como fase difusional, pois as transferências são limitadas principalmente pelos fenômenos de difusão.

Vários fenômenos explicam a redução da velocidade de secagem do produto (FERLIN, 1998):

- Migração da água líquida e a difusão do vapor d'água na camada de sólido: sob o efeito da capilaridade, a água no interior do produto tende a migrar através dos poros até a superfície do produto, formando um filme em volta do sólido. No final da fase de secagem, à taxa decrescente, este filme não existe mais. O caminho que o vapor d'água percorre para sair do sólido aumenta, criando uma limitação à transferência de massa.
- Difusão superficial de água líquida: quanto menor é o teor de umidade, menor é a difusividade, limitando o mecanismo. A água migra em gradientes decrescentes.
- Fenômeno do encolhimento: durante a secagem de alguns sólidos pode ocorrer a diminuição da forma e do tamanho dos poros, conduzindo à uma redução da velocidade de secagem.

2.7.4. Modelos matemáticos de secagem

Segundo Bruin e Luyben (1980), a migração da umidade através dos sólidos pode ser realizada por meio dos mecanismos:

1. Transporte de vapor de água
 - Difusão devido ao gradiente de concentração
 - Difusão de Knudsen
 - Difusão térmica
 - Escoamento viscoso
2. Transporte de água líquida
 - Difusão devido ao gradiente de concentração
 - Escoamento capilar
 - Difusão superficial
 - Movimento por gravidade

A difusão de Knudsen ocorre quando o diâmetro dos poros do material é comparável ao caminho livre médio percorrido pelas moléculas de vapor, sendo significativa em condições de alto vácuo, como ocorre na liofilização. A difusão térmica tem efeito desprezível para pequenos gradientes de temperatura, como acontece no período

de secagem à taxa decrescente. O escoamento viscoso ocorre devido aos gradientes de pressão total, sendo considerado apenas no início da secagem à vácuo de alimentos. A difusão superficial de água líquida só ocorre em teores de água muito baixos. O movimento por gravidade é freqüentemente desprezado devido ao pequeno tamanho dos poros (Bruin e Luyben, 1980).

O processo de secagem envolve fenômenos complexos de transferência de calor e de massa que dificultam a descrição matemática em escala microscópica. Assim, existem diversos modelos matemáticos que buscam representar a cinética de secagem quando a resistência externa à transferência de calor e massa é eliminada ou minimizada..

Dentre eles estão os modelos teóricos, baseados na teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, representada pela segunda lei de Fick, expressa na forma unidimensional como (Crank, 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{q}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2.10)$$

Onde: X: teor de umidade (b.s.)

t: tempo de secagem (s)

r: distância do centro até o ponto (cm)

D_{ef} : difusividade efetiva (cm^2/s)

$q=0$ (placa plana); $q=1$ (cilindro) e $q=2$ (esfera)

Em Crank (1975) são apresentadas soluções analíticas em forma de séries para a equação da difusão, para diversas condições inicial e de contornos, considerando a difusividade constante ou função da concentração. Essas soluções se aplicam a sólidos de geometria simples e constantes ao longo do processo. Além disso, a umidade inicial deve ser uniforme, a umidade no centro e na superfície devem ser simétricas:

Placa plana

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4l^2}\right) \quad (2.11)$$

Cilindro infinito

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(\mu_n^2 \pi^2 \frac{D_{ef}t}{R^2}\right) \quad (2.12)$$

Esfera

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ef}t}{R^2}\right) \quad (2.13)$$

C.I.: $X(r,0) = X_0$

$$\text{C.C.1: } \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

$$\text{C.C.2: } \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 = X(R,t) = X_{eq}$$

Onde: X_0 : umidade inicial (b.s.)

X : umidade média da partícula (b.s.)

X_{eq} : umidade de equilíbrio (b.s.)

D_{ef} : difusividade efetiva (cm^2/s)

t : tempo (s)

R : raio da partícula (cm)

l : espessura da placa (cm)

A migração de água em sólidos pode ser representada pela segunda lei de Fick, dentre eles a maioria dos cereais e leguminosas (arroz, feijão, soja, etc) que apresentam uma pequena redução de volume durante a secagem. Para materiais com alto teor de umidade, a variação de volume é maior e por esta razão as soluções analíticas da Equação (2.10) não podem ser aplicadas.

Alguns modelos semi-teóricos se baseiam na teoria de difusão (Parry, 1985), assumindo que a resistência ocorre numa camada fina na superfície das partículas. Este modelo estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre, sendo expresso:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_{eq}) \quad (2.14)$$

Onde: K: constante de secagem

A Equação (2.15) é a expressão da lei de resfriamento de Newton, sendo normalmente utilizada na forma integral, como:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-Kt) \quad (2.15)$$

Outras modificações do modelo de forma exponencial na forma integrada a dois e três parâmetros que apresentaram bons ajustes são:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a \cdot \exp(-Kt) \quad (2.16)$$

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = C \exp(-Kt^n) \quad (2.17)$$

A Equação (2.16) é similar à solução do modelo de Fick para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da série é significativo (Mc Cormick, 1983).

A Equação (2.17) é conhecida como modelo de Page, sendo bastante utilizado nos estudos da secagem de produtos agrícolas.

2.7.5. Eficiência energética

A secagem convectiva é considerada uma das operações unitárias mais dispendiosas em termos energéticos, visto que para a evaporação da umidade contida no produto requer-se uma elevada quantidade de energia, que muitas vezes não é recuperada. Assim, o cálculo da eficiência energética é de grande importância para a avaliação de secadores.

Segundo Strumillo e Kudra (1986), a secagem consome até 70% da energia total nas indústrias de produtos derivados de madeira, 50% do consumo energético total nas indústrias têxteis e acima de 60% do total de energia no processo de produção de milho nas fazendas. No setor de indústria papeleira, cerca de 33% de toda a energia gasta se deve à secagem.

A eficiência energética no processo de secagem consiste na energia necessária para retirar uma unidade de peso de água evaporada. Teoricamente, é a energia necessária para evaporar 1 kg de água livre a 100°C e pressão atmosférica (Sokhasanj, 1984).

Dewettinck *et al.* (1999) definiram a eficiência de evaporação de um secador convectivo como:

$$E_{ev} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{sat} - Y_1} \quad (2.18)$$

Onde: Y_1 : umidade absoluta do ar de entrada ($\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

Y_2 : umidade absoluta do ar de saída ($\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

Y_{sat} : umidade absoluta do ar saturado ($\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{ar seco}}$)

A umidade absoluta do ar saturado (Y_{sat}) é determinada através do diagrama psicrométrico, representando as condições do ar com a mesma temperatura de bulbo úmido.

A eficiência energética para secadores convectivos (E_{conv}) é usualmente calculada baseada na temperatura do ar na entrada e na saída do secador, bem como a temperatura do ar ambiente (Raghavan *et al.*, 2004):

$$E_{conv} = \frac{T_{en} - T_{sa}}{T_{en} - T_{amb}} \quad (2.19)$$

sendo que a máxima eficiência ($E_{conv, \max}$) é calculada por:

$$E_{conv, \max} = \frac{T_{en} - T_{bu}}{T_{en} - T_{amb}} \quad (2.20)$$

Onde: T_{en} : temperatura do ar de entrada ($^{\circ}\text{C}$)

T_{sa} : temperatura do ar de saída ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} : temperatura do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_{bu} : temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$)

Para avaliar a eficiência de um secador, utiliza-se, na prática, alguns fatores de desempenho (Pakowski e Mujumdar, 1995; Ferlin, 1998; Lima, 1998):

$$\text{Eficiência de secagem (ES)} = \frac{\text{energia usada para aquecimento do material e evaporação da umidade}}{\text{energia total fornecida pelo secador}} \quad (\%) \quad (2.21)$$

$$\text{Eficiência energética (EE)} = \frac{\text{energia usada para evaporação da umidade}}{\text{energia total fornecida pelo secador}} \quad (\%) \quad (2.22)$$

$$\text{Eficiência térmica (TE)} = \frac{\text{massa de água evaporada}}{\text{quantidade de calor fornecida}} \quad (\text{kg}/\text{kJ}) \quad (2.23)$$

$$\text{Consumo específico de calor (SHC)} = \frac{\text{quantidade de calor fornecida}}{\text{massa de água evaporada}} = \frac{1}{TE} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.24)$$

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{\text{quantidade de energia consumida}}{\text{quantidade de material}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.25)$$

$$\text{Volume específico do secador (SV)} = \frac{\text{volume da câmara de secagem}}{\text{quantidade de material}} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2.26)$$

$$\text{Consumo específico de gás (SGC)} = \frac{\text{fluxo de ar seco}}{\text{quantidade de material seco}} \quad (\text{kg/kg}) \quad (2.27)$$

2.8. Secagem da pasta celulósica

A secagem da polpa de celulose pode ser feita por meio da condução, convecção ou radiação, ou por uma combinação destes. A Tabela 2.3 apresenta uma estimativa da distribuição de tipos de secadores utilizados na indústria americana de papel, mostrando que os secadores convencionais de cilindros a vapor são ainda predominantes na indústria. Os outros têm aplicação para um único tipo de produto.

Tabela 2.3: Distribuição de secadores na indústria de papel americana.

| Tipo de secador | Parte na indústria (%) |
|--|------------------------|
| Secador cilindro a vapor | 85-90 |
| Secador Yankee | 4-5 |
| Secador Infravermelho (IR) | 3-4 |
| Secador convectivo (“impingement dryer”) | 2-3 |
| Secador com percolação de ar (“through dryer”) | 1-2 |

Fonte: McConnell (1980)

Uma máquina de papel típica tem 40 a mais de 100 cilindros a vapor e depende da velocidade de linha. Quanto mais rápida a velocidade de linha, mais longa é a área de secagem. Máquinas típicas de secagem de papel são do tamanho de um campo de futebol. Nestas máquinas, a secagem é feita por condução e por convecção, pois além de fluxos de

gás quente (ar ou vapor) ao longo de todo o secador, os cilindros são aquecidos a 120°C. Desta forma, eles têm a finalidade de não somente prensar a polpa, definindo a gramatura, como também auxiliar na secagem da mesma. Um secador convencional de papel requer de 2.965 a 3.663 kJ/kg de água evaporada da folha. A Figuras 2.7 e 2.8 mostram, respectivamente, o esquema da máquina de Fourdrinier para a secagem de papel e o detalhe dos cilindros a vapor.

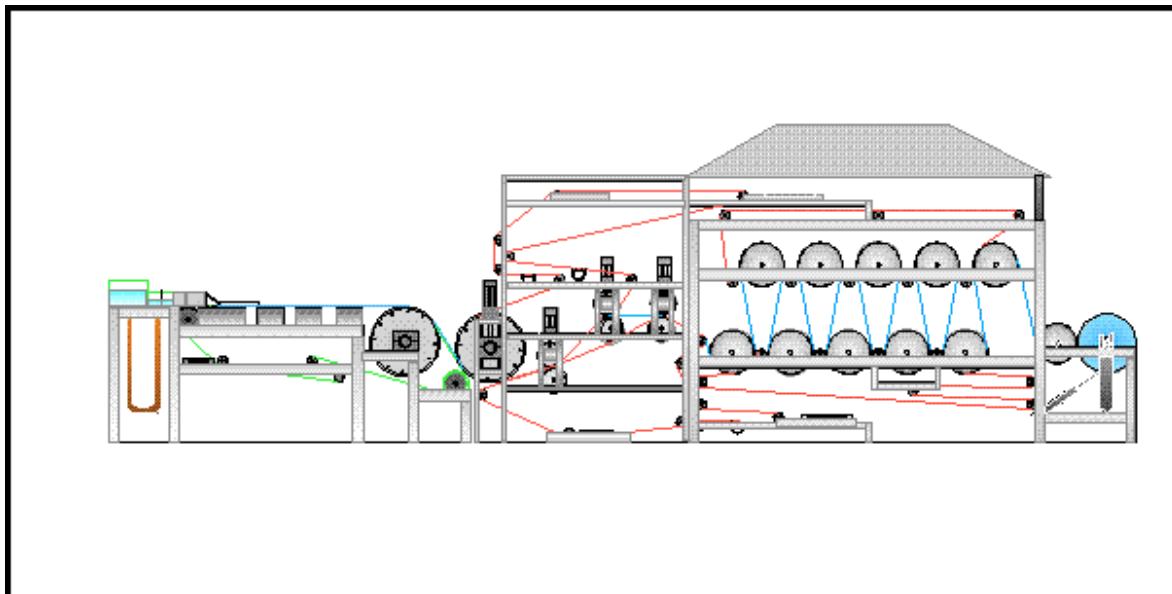


Figura 2.7: Máquina de Fourdrinier para a secagem de papel (Fardim, 1999).



Figura 2.8: Cilindros a vapor para a secagem de papel (Bracelpa, 2003).

Secadores convectivos utilizam um fluxo de ar quente sobre a superfície do papel. O secador Yankee a vapor é um tipo específico de secador usado comumente para tecido e papel toalha. Os secadores IR produzem uma radiação infravermelha a partir de uma

superfície quente. Quando o papel absorve o IR, sua temperatura também aumenta e a umidade é transferida para a superfície da folha. Os secadores IR apresentam baixo custo de implantação e são compactos. No entanto, os custos de operação e manutenção são altos.

A secagem é um processo complexo, de grande importância na fabricação em termos energéticos, como também no que se refere à qualidade do produto final. Atualmente, diversos tipos de papel, com composições variadas e condições operacionais diferentes são produzidos. Neste contexto, Rueff e Faloui (1994) investigaram o efeito da composição da folha de papel e das condições de secagem nas propriedades da folha.

Várias tecnologias de secagem, tanto convencionais quanto alternativas, foram propostas para a secagem de papel. No entanto, nenhuma delas foi capaz de substituir o secular secador de multi-cilindros. O secador “Condebelt” desenvolvido por Lehtinen (1995) para papelão parece ser o que mais se aproximou de um sucesso comercial, apresentando taxas de secagem de 5 a 15 vezes maior do que em cilindros convencionais. Além disso, o consumo energético de um secador Condebelt é inferior ao do secador de cilindros, sendo que até 85% da energia gasta no processo de secagem pode ser recuperada. O dilema na introdução de tecnologias inovadoras no que tange a secagem de papel é o elevado investimento de capital e nível de risco envolvido (Mujumdar, 1996).

Pikulik e Poirier (1994) propuseram uma nova técnica para a secagem de papel chamada de “secagem de alta intensidade” na qual a tela úmida é pressionada por cilindros aquecidos a 120°C. Estes cilindros fornecem metade do calor de secagem enquanto que a outra parte é fornecida por um gás quente que atinge a superfície da folha. Comparada ao método de secagem de cilindro convencional, esta nova técnica apresentou uma taxa de secagem mais rápida, além de se obter ao final um papel de melhor qualidade.

Outro fator que também influencia a temperatura interna e os perfis de umidade da folha de papel é a configuração do secador. Paltakari (2000) mediou o desenvolvimento da temperatura e dos perfis de umidade no papel durante a secagem. Os resultados mostraram que tanto a temperatura quanto os perfis de umidade são fortemente dependentes da configuração do secador. A duração do ciclo de secagem tem influência significativa na temperatura interna da folha, mas somente um pequeno efeito nos perfis de umidade.

Nazhad e Pazner (1994) investigaram o efeito do tratamento térmico na resistência mecânica do papel reciclado. Os autores verificaram que a secagem é a principal

responsável pela deterioração da fibra no processo de reciclagem. As propriedades ópticas do papel foram reduzidas, enquanto que a fragilidade do papel aumentou em função das condições de secagem durante a fabricação. Quanto maior o tempo do tratamento térmico após a secagem com ar, maior é a perda nas propriedades da fibra.

O efeito da temperatura de secagem nas propriedades ópticas dos papéis também foi estudado por Poirier e Pikulik (1996). Para papéis fabricados a partir da pasta mecânica, observou-se uma redução do coeficiente de dispersão da luz com o aumento da temperatura de secagem, obtendo-se uma perda do brilho. Isto deve estar relacionado à plastificação térmica de polímeros da madeira. Para papéis fabricados a partir da pasta química, não se verificou o efeito da temperatura de secagem nas propriedades ópticas, pois as pastas químicas contêm menos hemicelulose e lignina.

Um estudo do fenômeno de transferência de calor e massa dentro de uma folha de papel durante a secagem foi realizado por Coumans e Kruf (1994, 1995). Duas abordagens foram seguidas. A primeira é baseada em mecanismos microscópicos para o transporte de massa e de calor em um material poroso. Na segunda abordagem, relaciona-se os fluxos de calor e de massa aos respectivos gradientes de temperatura e umidade. Um modelo foi proposto para o comportamento da secagem da folha de papel a partir da introdução de parâmetros, tais como o conteúdo de umidade, entalpia, coordenada espacial dos sólidos, o fluxo de massa por difusão do líquido e do vapor na fase sólida, do fluxo de calor na fase sólida e do fator de encolhimento da folha durante a secagem.

Um estudo completo sobre a secagem de papel artesanal encontra-se nos trabalhos realizados por Mota Lima *et al.* (1996a, 1996b, 1997a, 1997b, 1998, 1999, 2000a, 2000b, 2005), Mota Lima e Forte Gil (1997) e STENZEL *et al.* (2000). Em Mota Lima *et al.* (1996a), os autores realizaram a secagem da folha sobre uma superfície aquecida e em regime de convecção natural. Para a obtenção dos perfis de temperatura, os autores utilizaram o sistema experimental ilustrado na Figura 2.9. Os perfis foram avaliados sob duas abordagens, a primeira, baseada na modelagem proposta por Luikov (1966) para a secagem condutiva de sólidos e, a segunda, a partir de um balanço de energia global envolvendo a transferência de calor entre a placa quente, as amostras de papel e o ar de secagem.

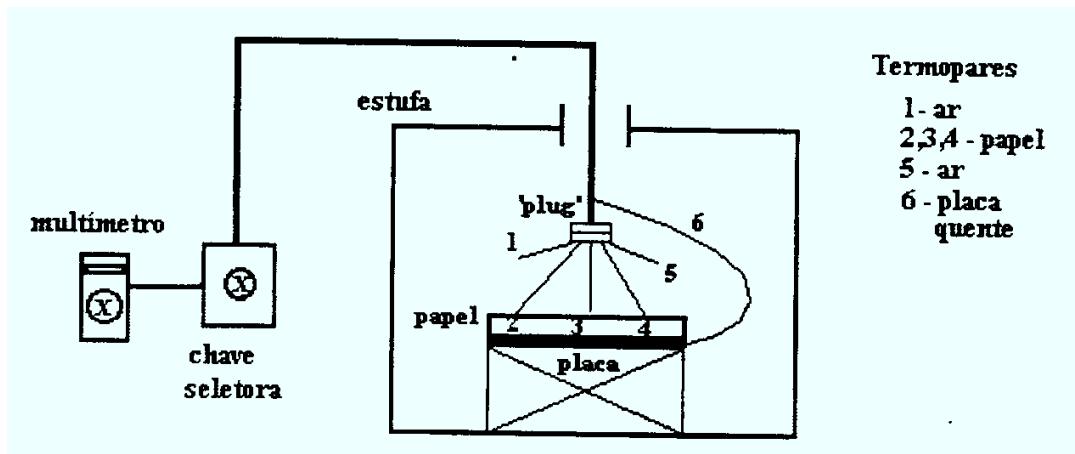


Figura 2.9: Esquema experimental para obtenção dos perfis de temperatura (Mota Lima *et al.*, 1996a).

Dando continuidade a esse estudo, utilizou-se, nos demais trabalhos citados anteriormente, um módulo experimental com ajuste da temperatura da superfície de contato com o papel para a análise da secagem condutiva/convectiva de papel com ar ambiente em convecção forçada. Foram levantadas e analisadas as curvas de secagem, de taxa de secagem e dos perfis de temperatura de folhas de papel. A superfície das amostras foi colocada em contato com uma placa aquecida e fez-se passar ar em regime de convecção forçada paralelamente à folha, a fim de simular o movimento relativo entre a folha de papel, os cilindros secadores e o ar no interior do secador. A Figura 2.10 apresenta o esquema do sistema experimental utilizado nestes trabalhos (Mota Lima *et al.*, 1997, 1998, 1999, 2000a, 2000b, 2005). As folhas de papel utilizadas eram basicamente constituídas de camadas de celulose de fibra curta (eucalipto), sem adição de cargas, com 1 mm de espessura. Em Mota Lima *et al.* (1997), variou-se a umidade inicial da polpa de papel (130 a 170% b.s.) e a temperatura da placa aquecedora de 60 a 90°C. Para a região estudada, não se verificou influência da umidade inicial da folha no comportamento dos perfis de temperatura. Nos demais trabalhos, variou-se também a velocidade do ar de secagem nos valores de 2, 4 e 6 m/s. Os autores verificaram uma redução do tempo de secagem e maiores taxas de secagem com o aumento da temperatura.

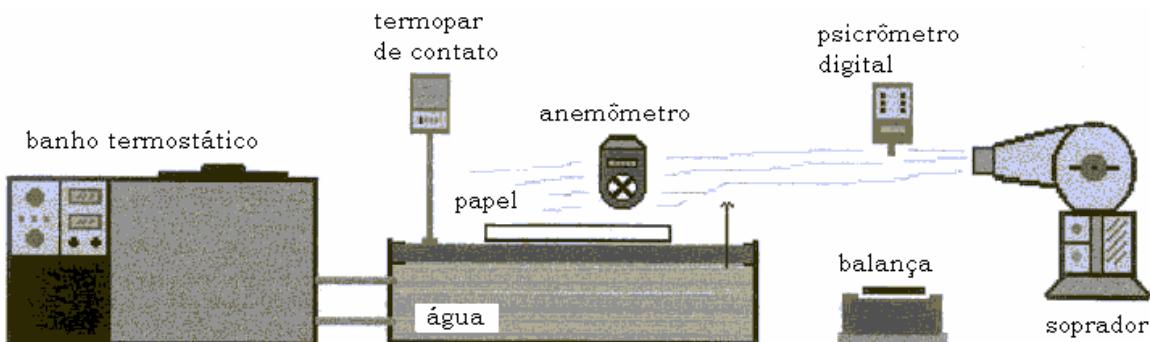


Figura 2.10: Sistema experimental (Mota Lima *et al.* 1997).

Em Mota Lima *et al.* (1999), os autores analisaram o comportamento das curvas de taxa de secagem obtidas por Mota Lima *et al.* (1998) na secagem condutiva/convectiva de papel. Fez-se uma análise comparativa do comportamento da secagem através da abordagem clássica de períodos de taxa constante e decrescente com o tempo. O período de taxa constante foi ajustado por equações do balanço de energia para o sólido. No período de taxa decrescente, utilizou-se uma abordagem baseada no escoamento capilar (redução linear da taxa de secagem em função das umidades crítica e de equilíbrio).

Stenzel *et al.* (2000) analisaram a secagem condutiva/convectiva de fibras curta e longa de celulose, na operação com ar ambiente em convecção forçada, nas mesmas condições de trabalho utilizadas em Mota Lima *et al.* (1998, 1999). Para a celulose de fibra curta, estudou-se a transferência de calor através da verificação e/ou estimativa dos coeficientes de transferência de calor entre a superfície aquecida e as folhas, e entre estas e o ar de secagem. Para a celulose de fibra longa, analisou-se o comportamento das taxas de secagem obtidas através da abordagem clássica de dois períodos de secagem. Os autores verificaram que as taxas para a fibra longa foram menores que as respectivas para a fibra curta. Dando continuidade a esse estudo, Mota Lima *et al.* (2005) estimaram os coeficientes de transferência de calor através de equações de balanço de calor, envolvendo a transferência de calor entre a superfície aquecida, as amostras e o ar ambiente de secagem.

A metodologia proposta de curvas generalizadas de taxa de secagem discutida em Hodges (1982) foi utilizada para a análise da influência do conteúdo de umidade inicial da folha de celulose, da temperatura da superfície aquecida e da velocidade do ar de secagem no comportamento das curvas de taxa de secagem, obtendo-se um bom ajuste das curvas

(Mota Lima *et al.*, (2000a)). A Equação proposta por Page (1949) foi usada em Mota Lima *et al.* (2000b) para modelar as curvas de secagem generalizadas, obtendo-se um bom ajuste das mesmas.

Uma análise comparativa entre a secagem natural e a convectiva forçada de uma folha de papel a diferentes condições de temperatura e velocidade do ar foi realizada em Mota Lima *et al.* (1996b). Verificou-se que a secagem convectiva forçada reduziu drasticamente o tempo de secagem do papel. No entanto, apenas a baixas velocidades do ar (0,6 e 1,0 m/s) não ocorreu um prejuízo na qualidade final da folha. Em Mota Lima e Forte Gil (1997), analisou-se também a influência da espessura da folha na cinética de secagem. Trabalhou-se com valores de temperatura do ar de 50 a 70°C, velocidade do ar de 0,2 a 1,0 m/s e espessura da folha de 0,18 a 0,36 mm. Pode-se constatar que, para a região estudada, a velocidade do ar não teve influência significativa no processo. A temperatura do ar e a espessura da folha tiveram efeitos de acordo com o esperado para a secagem de papel. Nestes trabalhos, a secagem da folha foi realizada em uma câmara fechada com uma abertura superior para a exaustão do ar (Figura 2.11).

Mota Lima *et al.* (2002) analisaram o comportamento das curvas de secagem e de taxa de secagem da folha de papel artesanal obtida para diferentes espessuras do material, temperaturas e velocidades do ar de secagem. O sistema experimental foi o mesmo utilizado em Mota Lima *et al.* (1996b) e em Mota Lima e Forte Gil (1997) (Figura 2.11). Os autores verificaram que as maiores taxas de secagem eram obtidas com as maiores temperaturas e velocidades do ar de secagem, principalmente na região do período de taxa constante, e com menores espessuras do material. A influência da espessura é mais significativa quanto menor for a temperatura, em virtude de uma menor força motriz interna para superar a resistência à migração da água até a superfície do material. A abordagem das curvas generalizadas se mostrou adequada para as condições estudadas, obtendo-se uma curva única para os resultados experimentais obtidos a diferentes condições operacionais, enquanto que a abordagem a partir das curvas de taxa de secagem normalizadas levou a resultados satisfatórios, porém com ajuste inferior ao obtido para as curvas de secagem generalizadas.

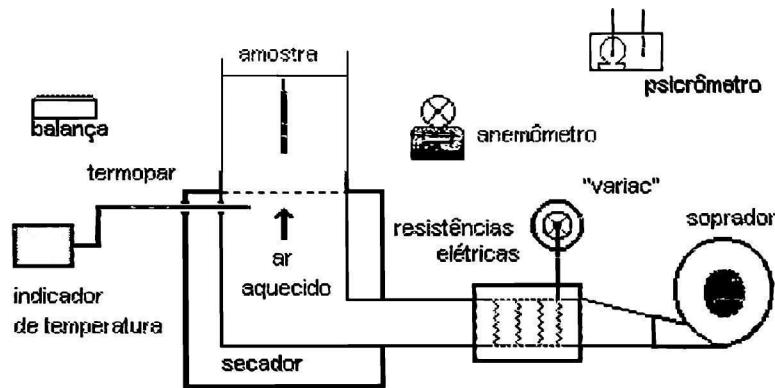


Figura 2.11: Modelo esquemático do secador (Mota Lima *et al.*, 1996b).

2.9. Encolhimento do volume durante a secagem

Diversos materiais sofrem encolhimento de suas dimensões durante a secagem. O grau de encolhimento e sua variação com as condições de secagem, assim como com o conteúdo de umidade do produto, influenciam os mecanismos de transferência de calor e de massa dentro do material (Islam e Mujumdar, 2003).

O encolhimento em gêneros alimentícios é um fenômeno físico comumente observado durante a desidratação (Peña, 1999). Estas mudanças ocasionam efeitos na qualidade do produto desidratado. O teor de umidade e o perfil de temperatura do material seco devem ser levados em consideração. Mayor e Sereno (2004) compararam modelos empíricos e fundamentais com dados experimentais de secagem de maçã (Moreira *et al.*, 2000 apud Mayor e Sereno, 2004), cenoura (Krokida e Maroulis, 1997 apud Mayor e Sereno, 2004), batata (Lozano *et al.*, 1983 apud Mayor e Sereno, 2004) e lula (Rahman *et al.*, 1996 apud Mayor e Sereno, 2004).

No caso de materiais porosos, os autores (Mayor e Sereno, 2004) aperfeiçoaram o modelo fundamental proposto por Perez e Calvelo (1984) apud Mayor e Sereno (2004), levando também em consideração a porosidade inicial do material.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1-\varepsilon)} \left[1 + \frac{\rho_0}{\rho_w} \frac{(X - X_0)}{(1 + X_0)} - \varepsilon_0 \right] \quad (2.28)$$

Onde: V_0 : volume inicial (m^3)

V : volume final da amostra seca (m^3)

ρ_0 : densidade aparente inicial (kg/m^3)

ρ_w : densidade da água (kg/m^3)

X_0 : teor de umidade da amostra úmida em base seca (kg/kg)

X : teor de umidade da amostra seca em base seca (kg/kg)

ε_0 : porosidade inicial

A modificação proposta pelos autores ao modelo de Perez e Calvelo (1984) apud Mayor e Sereno, 2004 não apenas aprimorou a representação física do fenômeno do encolhimento em alimentos como também apresentou um melhor ajuste dos dados experimentais.

Keey (1972) discutiu o comportamento de encolhimento de vários materiais. Materiais de origem biológica podem sofrer um encolhimento anisotrópico. Assim, o comportamento durante o encolhimento é expresso em termos de coeficientes de encolhimento lineares:

$$Z = Z_0(1 + \gamma \cdot X) \quad (2.29)$$

Onde: Z : comprimento final (m)

Z_0 : comprimento inicial (m)

γ : coeficiente de encolhimento linear (m/m)

X : conteúdo de umidade do material ($\text{kg água/ kg sólido}$)

Se o encolhimento é isotrópico, então o volume após o encolhimento pode ser convenientemente descrito em termos de um coeficiente de encolhimento volumétrico ou linear:

$$V = V_0(1 + \beta \cdot X) \quad (2.30)$$

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot X)^3 \quad (2.31)$$

Onde: V : volume final (m^3)

V_0 : volume inicial (m^3)

β : coeficiente de encolhimento volumétrico (m^3/m^3)

Em baixos teores de umidade, a Equação (2.31) pode ser aproximada para:

$$V = V_o(1 + 3\gamma.X) \quad (2.32)$$

O encolhimento do volume durante a secagem tem sido bastante estudado por vários pesquisadores, destacando-se os trabalhos realizados com corpos de geometria cilíndrica (Simal *et al.*, 1998), gêneros alimentícios (May e Perré, 2002; ROVEDO, *et al.*, 1995, Zogzas *et al.*, 1994), milho e ervilha (Hatamipour e Mowla, 2003), cenoura (Hatamipour e Mowla, 2002), pasta de cimento e concreto (Collins e Sanjayan, 2000), frutas e vegetais (Maroulis *et al.*, 2002), tomate (Peña, 1999), batata (Wang e Brennan, 1995; McMinn e Magee, 1997), sementes de mamão (Prado e Sartori, 2002), banana (Talla *et al.*, 2004; Katekawa e Silva, 2004), maçã (Lewicki e Jakubczyk, 2004), rosa mosqueta (Ochoa *et al.*, 2002), uva (Azzouz *et al.*, 2002), kiwi (Maskan, 2001), arroz (Ramesh, 2003; Bautista *et al.*, 2000), resíduos hospitalares (Carvalho, 2003), alga marinha (Cavalcante, 2003) e folha de papel (Coumans e Kruf, 1994; 1995; Serra-tosio *et al.*, 2005 e Stenström, 2004).

O encolhimento de alimentos durante a secagem é um processo físico que ocorre juntamente com a remoção da umidade, podendo apresentar um efeito significativo na taxa de secagem. Rovedo *et al.* (1995) desenvolveram um modelo matemático admitindo-se que a difusão é unidirecional, que o encolhimento do sólido é igual ao volume de água evaporada, que o coeficiente de difusão independe da umidade e varia apenas com a temperatura do material. O modelo apresentou um ajuste satisfatório somente em relação aos dados experimentais correspondentes ao primeiro período de taxa decrescente.

O encolhimento afeta propriedades físicas do material, tais como densidade e porosidade. Wang e Brennan (1995) estudaram as mudanças na estrutura, densidade e porosidade da batata durante a desidratação. Os autores observaram que a altas taxas de secagem, a camada externa do material torna-se rígida e o seu volume praticamente não varia deste ponto até o final da secagem. Ao longo do processo, podem ocorrer fissuras e rupturas do tecido, formando uma estrutura aberta. Em relação à densidade do material, esta aumenta com o decréscimo do teor de umidade no início da secagem até atingir um valor máximo, no qual se observa um endurecimento da superfície externa do material. A partir deste ponto, a densidade do produto decresce com a diminuição do teor de umidade. Verificou-se também que o encolhimento é maior na temperatura mais baixa. A densidade

da batata diminui com o aumento da temperatura, pois esta favorece o enrijecimento da camada externa mais rapidamente. Já a porosidade do material aumenta gradativamente com o decréscimo do teor de umidade, não sendo influenciada pela temperatura de secagem.

Em um estudo sobre o comportamento da porosidade durante a secagem convectiva de bananas, Katekawa e Silva (2004) verificaram a influência da temperatura do ar de secagem na porosidade de bananas durante a secagem com encolhimento. Maiores temperaturas de ar promoveram o aumento na porosidade da amostra, sendo explicado pelos menores teores de umidade obtidos nestas condições. Os perfis de variação do volume e da densidade *bulk* da amostra foram similares aos encontrados por Wang e Brennan (1995).

McMinn e Magee (1997) também investigaram as características físicas de batatas desidratadas: densidade aparente, porosidade interna e encolhimento. Diferentemente do resultado obtido por Wang e Brennan (1995), a porosidade do material decresce no início da secagem com a redução do teor de umidade. Isto pode ser justificado pela expulsão do ar naturalmente ocluso nas células. Entretanto, a remoção da umidade livre pode provocar a redução dos espaços intercelulares. A partir de um certo valor de teor de umidade, a porosidade cresce gradativamente com o decréscimo do teor de umidade. Os autores também verificaram a influência da temperatura do ar, aumentando a porosidade do material durante a secagem. O coeficiente de encolhimento volumétrico apresentou uma relação linear com o teor de umidade, sendo influenciado pela temperatura de secagem.

Uma partícula composta de elementos celulares ou coloidais tende a inchar com o aumento de umidade. Com a remoção desta, tem-se o encolhimento. A baixos níveis de umidade, o material é frágil, e se deforma de maneira elástica. A presença de umidade no material age como um plastificante. No entanto, acima de um certo teor de umidade este efeito plastificante será responsável pelo estiramento do material. Na secagem, o material úmido não retrai exatamente às suas dimensões originais (Keey, 1992).

A deformação de materiais durante a secagem apresenta problemas no que se refere à qualidade do produto final, desde a alteração do volume até danos mecânicos tais como fraturas e fissuras. Bautista *et al.* (2000) estudaram a formação de fissuras em grãos de arroz devido ao encolhimento durante a secagem. Os autores utilizaram um sistema de

microscopia em vídeo a fim de melhor visualizar o início da fissura. Os autores verificaram que a temperatura do ar de secagem tem influência na formação da fissura.

Ramesh (2003) também analisou a secagem de arroz cozido. Determinou o coeficiente de difusão efetiva em função do teor de umidade e da temperatura do ar durante a secagem, levando em consideração o efeito do encolhimento. O autor constatou que o encolhimento foi maior na fase inicial da secagem devido à rápida evaporação da umidade. Ao longo do processo, formou-se uma casca na superfície externa que era impermeável ao movimento da umidade. Com este fenômeno, a remoção da água é reduzida, retardando o encolhimento.

Hatamipour e Mowla (2002) estudaram o encolhimento de cenouras durante a secagem em um leito fluidizado com partículas inertes. Os efeitos de vários parâmetros, tais como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de secagem, o diâmetro da amostra e o seu teor de umidade e a presença de inertes no leito foram investigados. Os autores verificaram que o encolhimento volumétrico e o superficial podem ser correlacionados linearmente com o teor de umidade do produto, enquanto que o encolhimento linear pode ser representado como uma função logarítmica do teor de umidade. A presença de inertes no leito, o diâmetro da amostra, a velocidade e a temperatura do ar não apresentaram efeitos significativos no encolhimento. A umidade do ar, entretanto, apresentou uma grande influência na taxa de secagem, ou seja, na velocidade com que a água é removida da matriz sólida. Isto ocorre em virtude do endurecimento da superfície externa, diminuindo a taxa de secagem e, consequentemente, a redução no volume do material.

A influência das condições operacionais (temperatura, velocidade e umidade relativa do ar) durante a secagem de rosa mosqueta no encolhimento volumétrico e superficial foi estudada em Ochoa *et al.* (2002). As variáveis operacionais não apresentaram efeito relevante na variação das dimensões da fruta ao longo da secagem. Conforme observado em trabalhos anteriores da literatura com demais produtos, o coeficiente de encolhimento volumétrico é função linear do teor de umidade do material. Em alguns materiais, ocorre uma mudança do mecanismo de secagem após o teor de umidade crítico devido a modificações na superfície externa, influenciando na resistência à transferência da umidade.

May e Perré (2002) analisaram o encolhimento da batata, da cenoura, da maçã e do abacate utilizando micrômetros a laser de alta velocidade. Os autores destacaram a

importância de se considerar o fenômeno do encolhimento na modelagem da secagem de materiais deformáveis. No caso de produtos alimentícios com elevado teor de umidade inicial e grande tendência à deformação, o fator de encolhimento e a porosidade representam propriedades físicas importantes que devem ser incorporadas às equações de transferência de calor e massa. A redução de volume do material durante a secagem e, consequentemente, da área superficial, foi considerada. Assim, a razão entre a taxa de secagem e a área superficial manteve-se constante durante o primeiro período de secagem. Deste modo, o fluxo mássico da umidade é dependente apenas das condições externas.

Prado e Sartori (2002) estudaram o encolhimento de sementes de mamão com e sem mucilagem durante a secagem em leito fixo, associando-o com as variações nas propriedades físicas como densidade, tamanho e forma de partícula e porosidade do leito. Os autores verificaram que o encolhimento das partículas individuais depende linearmente do teor de umidade. O encolhimento do leito predominou no período à taxa constante, seguindo a evaporação, sendo influenciado pelo teor de umidade, estrutura da superfície da semente (com e sem mucilagem), velocidade de secagem e altura de empacotamento. Neste trabalho, os dados experimentais foram comparados com os modelos propostos por Suzuki *et al.* (1976): secagem uniforme, central e semicentral, apresentados na Tabela 2.4.

O modelo de secagem uniforme assume um encolhimento constante para o volume de água evaporada durante todos os estágios da secagem. O modelo de secagem central assume a formação de uma camada superficial seca com uma densidade igual àquela no ponto de secagem no equilíbrio. Já o modelo de secagem semi-central representa uma correlação intermediária entre os modelos de secagem uniforme e central.

Tabela 2.4: Modelos de Suzuki *et al.* (1976).

| Modelo | Equação |
|----------------------|--|
| Secagem uniforme | $S_b = \left(\frac{\rho_{r0}}{X_0 + 1} \right) \cdot X - \rho_{r0} \cdot X_0 \quad (2.33)$ |
| Secagem central | $S_b = \left[\left(\frac{1 - \xi}{X_0 - X_{eq}} \right) \cdot X \right] + \left[\frac{(\xi \cdot X_0 - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} \right] \quad (2.34)$ |
| Secagem semi-central | $S_b = \left[\left(\frac{1 - \xi}{(X_0 - X_{eq}) - \gamma(\xi \cdot X_0 - X_{eq} + \xi - 1)} \right) \cdot X \right] + \left[\frac{(\xi \cdot X_0 - X_{eq}) - \gamma(\xi \cdot X_0 - X_{eq} + \xi - 1)}{(X_0 - X_{eq}) - \gamma(\xi \cdot X_0 - X_{eq} + \xi - 1)} \right] \quad (2.35)$ onde: $S_b = \frac{V_s}{V_{s0}}$ $\quad (2.36)$ $\xi = \frac{\rho_{r,0} \cdot (1 + X_{eq})}{\rho_{r,eq} \cdot (1 + X_0)} \quad (2.37)$ |

Fonte: Prado e Sartori (2002)

Onde: S_b : razão de encolhimento volumétrico (-)

V_s : volume de sólidos (m^3)

V_{s0} : volume de sólidos inicial (m^3)

X : conteúdo de umidade do material (kg água/ kg sólido)

X_0 : conteúdo de umidade inicial do material (kg água/ kg sólido)

X_{eq} : conteúdo de umidade de equilíbrio do material (kg água/ kg sólido)

$\rho_{r,0}$: densidade real inicial da partícula (kg/m^3)

$\rho_{r,eq}$: densidade real de equilíbrio da partícula (kg/m^3)

γ' : fator de proporcionalidade entre a densidade inicial e a de equilíbrio da camada externa da partícula (-)

A evolução do encolhimento volumétrico e da densidade aparente durante a secagem de bananas foi investigada por Talla *et al.* (2004), considerando que a variação no volume do produto é igual ao volume de água evaporada ao longo da secagem. O fenômeno do encolhimento tem um grande efeito na taxa de secagem da banana, modificando significativamente seu coeficiente de difusão. Um modelo matemático foi proposto para o

encolhimento da banana, levando em consideração as mudanças na área de transferência de acordo com o teor de umidade, obtendo-se um bom ajuste dos dados experimentais.

Lewicki e Jakubczyk (2004) determinaram o efeito da temperatura e do teor de umidade nas propriedades mecânicas de maçãs secas por convecção. Durante a secagem, a força mecânica aumenta e a tensão do encolhimento provoca a formação de cavidades e vazios dentro do material. Os autores também verificaram um aumento do encolhimento com a diminuição da temperatura de secagem. Contudo, o encolhimento das maçãs secas não foi isométrico, resultante de tensões desenvolvidas no material que causaram um gradiente de umidade. Altas temperaturas de secagem afetaram substancialmente a textura do material, sobretudo na camada superficial, tornando-a porosa e com alta resistência mecânica.

Poucos trabalhos aparecem na literatura sobre o estudo de encolhimento do papel devido à secagem. Coumans e Kruf (1994, 1995) descreveram o comportamento do encolhimento do papel durante a secagem em secadores contínuos multi-cilindros aquecidos a 120°C. Os efeitos do encolhimento da folha de papel durante a secagem foram adequadamente quantificados a partir de parâmetros do sólido e do coeficiente de encolhimento. O comportamento do encolhimento em termos de parâmetros como o conteúdo de umidade (X) e o volume específico (1/ρ_s).

Em secadores multi-cilíndricos convencionais, a introdução de sólidos durante o processo de secagem é contínua e o encolhimento deve ser considerado. Através de balanços de massa do fluxo de sólidos que é introduzido no secador e do fluxo de água que é evaporada durante a secagem, pode-se relacionar os dois fluxos utilizando o parâmetro coeficiente de encolhimento, como mostra a Equação (2.38).

$$n_s = \frac{\frac{\rho_{s,ap}}{\rho_w} \sigma}{1 - \frac{\rho_{s,ap}}{\rho_w} (\sigma - \bar{\sigma}) X} n_w \quad (2.38)$$

Onde: n_s: fluxo mássico de sólidos (kg/m²s)

n_w: fluxo mássico de umidade (kg/m²s)

ρ_{s, ap}: massa específica aparente do sólido (kg/m³)

σ̄ : fator de encolhimento médio (m³/m³)

Em Serra-Tosio *et al.* (2005), um aparato conhecido por VARIDIM[®] foi utilizado para a medida do encolhimento sofrido pelo papel para diferentes tensões aplicadas em uma extremidade da amostra, sendo a temperatura e a umidade relativa ambiente mantidas constantes. As propriedades mecânicas tais como o Módulo de Young, o Índice de Ruptura (“Tear Index”) e o Índice de Arrebentamento (“Burst Index”) foram determinadas por um extensômetro. A evolução da energia específica de encolhimento do papel (Eq. 2.39) ocorrida durante a secagem foi analisada em função da tensão específica (Eq. 2.40) exercida sobre o mesmo. O ponto máximo desta curva representa um novo método de caracterização que pode ser utilizado para se comparar as propriedades físicas de papéis fabricados a partir de polpas de diferentes composições.

$$\text{Energia específica de encolhimento (J.kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Energia de encolhimento (J.m}^{-2}\text{)}}{\text{Peso por unidade de área (kg.m}^{-2}\text{)}} \quad (2.39)$$

$$\text{Tensão específica (N.m.kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Tensão (N.m}^{-1}\text{)}}{\text{Peso por unidade de área (kg.m}^{-2}\text{)}} \quad (2.40)$$

As propriedades mecânicas do papel são fortemente influenciadas pelo encolhimento, que depende do tipo do processo de secagem empregado. O encolhimento no papel pode ocorrer na direção da espessura ou da largura e do comprimento do papel, conhecidas como direções ZD e CD (Stenström, 2004). O papel úmido é um material heterogêneo constituído de um sistema de três fases: água, ar e a matriz porosa de fibras de celulose. Estudos de encolhimento de papel nas direções CD e ZD ainda são escassos na literatura.

Conforme observado no levantamento da literatura, existem ainda poucos trabalhos referentes ao estudo sobre o encolhimento da folha de papel durante a secagem. Portanto, faz-se necessário um estudo mais detalhado da influência das condições operacionais, conteúdo de umidade e características físicas do papel no encolhimento do produto.

2.10. Características do papel

Cada tipo de papel possui características próprias, decorrentes da aplicação de produtos químicos no processo de preparação da pasta ou durante a secagem da folha. Normalmente, são adicionados alguns produtos tais como: talco, caulim, óxido de titânio, sulfato de alumínio, soda cáustica, silicato de sódio e outros como corantes, anilinas e alvejantes, além de substâncias bactericidas e anti-espumantes.

A distribuição da massa (fibras de celulose) afeta a aparência e as propriedades físicas e ópticas do papel. O impacto visual e a qualidade de um impresso estão relacionados diretamente com o papel utilizado na produção.

Várias propriedades atuam de diferentes maneiras e com importância variável na qualidade final do papel. Dentre as principais características do papel que devem ser observadas para a obtenção de um produto de boa qualidade, podemos destacar (Cetea-Lec, 2003; Young, 1980):

- Gramatura: é o peso em gramas de um metro quadrado do papel (g/m^2).
- Espessura: é a distância entre as duas faces do papel.
- Densidade aparente: é o peso em gramas de um centímetro cúbico de papel. É uma medida do grau de compactação da folha. Quanto maior a densidade, mais compacto é o papel.
- Porosidade: é uma consequência do grau de refinação das fibras que compõem o papel, porém outros fatores podem ter influência como: distribuição das fibras, densidade, cargas, colagem, etc. A porosidade está relacionada com a resistência mecânica e o grau de absorção do papel.
- Resistência mecânica: é a capacidade de suportar um esforço mecânico. A resistência mecânica é dividida em três tipos:
 - Resistência à tração: é a força de tensão direta, necessária para arrebentar o papel, quando aplicada longitudinal ou transversalmente.
 - Resistência ao estouro: é a resistência que o papel apresenta ao ser submetido a uma pressão.
 - Resistência ao rasgo: é a força média em gramas para rasgar uma folha de papel após o rasgo ter sido iniciado.

- Colagem (Absorção de água): é a resistência à penetração da água. Característica importante para papéis de impressão *offset* (papel utilizado na impressão de revistas, folhetos, etc), flexografia ou outros produtos onde a água se faz presente.
- Opacidade: é a capacidade do papel de dificultar a passagem de luz através de si mesmo.
- Resistência ao arrancamento: é a capacidade do papel de se opor ao movimento e à remoção de fragmento na sua superfície, quando em contato com algum material. Característica importante no processo *offset*.
- Rugosidade: é o grau de desuniformidade da superfície do papel.
- Rigidez: é a propriedade do papel de se opor ao arqueamento ou curvatura.
- Estabilidade dimensional: é a qualidade do papel em resistir ao máximo à variação dimensional, quando sujeito a oscilações do teor de umidade. A falta de estabilidade dimensional indica uma tendência à problema de impressão.
- Brilho: é a capacidade de um papel de refletir a luz, sob determinados ângulos.
- Teor de cinza: é o resíduo final da incineração do papel. De uma maneira geral, o teor de cinza obtido representa exatamente o teor de carga do papel.
- pH: indica a acidez do papel e esta tem influência em várias características, tais como colagem, cor, alvura, tempo de vida (envelhecimento), etc.
- Umidade: é o teor percentual de água contida no papel. Esta característica afeta a gramatura, estabilidade dimensional e eletricidade estática. Baixa umidade causa excesso de eletricidade estática e umidade muito alta dificulta a secagem da tinta.
- Alvura: é a consequência da adição de alvejantes ópticos e corantes à pasta de papel.

2.11. Impactos Ambientais associados à produção de papel

A indústria de papel e celulose representa um dos mais expressivos setores industriais do mundo. A produção nacional de celulose de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) responde pela metade da produção mundial desse tipo de fibra. A indústria de papel e celulose é importante para a economia da América do Sul devido à grande disponibilidade de recursos florestais. O Brasil e o Chile são os maiores produtores de celulose da região. No Brasil, utiliza-se a madeira de *Eucalyptus grandis*, com uma produção ao redor de 6 milhões de toneladas de polpa por ano, dos quais 98% são branqueadas. E está no branqueamento o principal problema de poluição do setor, com sérios danos para a

natureza. Diversas pesquisas desenvolvidas no Instituto de Química da Unicamp, e já patenteadas, se preocupam com uma solução para o descarte dos resíduos do papel nos rios. Uma das pesquisas envolve microrganismos como produtores de enzimas utilizadas na descontaminação dos efluentes (UNICAMP, 2004).

Os impactos negativos da produção do papel dependem da matéria-prima utilizada, do tipo de processo de fabricação do papel e do produto final pretendido. Os impactos ambientais à produção de papel variam de acordo com o método empregado para a pasta de papel (mecânico, Kraft e sulfito), o processo de branqueamento (dióxido de cloro, oxigênio, ozônio, soda cáustica, peróxido de hidrogênio e tratamentos enzimáticos) e os sistemas de depuração instalados ou, ainda, a localização das fábricas e a sua necessidade de transporte (Fed, 2000 apud Antunes, 2001).

Dentre os impactos negativos no ambiente, pode-se destacar a eliminação de resíduos tóxicos resultantes de todo o processo a concentrações elevadas, quando não existe tratamento adequado de efluentes. Passos *et al.* (2004) apresenta um estudo fluidodinâmico da secagem do licor negro, resíduo proveniente da indústria papeleira, em leito de jorro com partículas de inertes de polipropileno. O pó obtido após a secagem possui um alto potencial calorífico, sendo utilizado como combustível em caldeiras.

A produção de papel reciclado mostra-se favorável quando comparada à produção de papel de pasta virgem, pois além de evitar a utilização da madeira e os seus aspectos ambientais associados, promove também a redução da poluição da água, solo e ar e da quantidade de resíduos a tratar ou enviar para aterro, da criação de postos de trabalhos e por compatibilidade com o desenvolvimento sustentável (Recipac, 2000).

A Revisão Bibliográfica apresentada abordou uma introdução sobre o tema de reciclagem do papel, os aspectos fundamentais da teoria de secagem, enfatizando também o fenômeno do encolhimento, propriedades do papel e impactos ambientais da indústria papeleira. Serviu, assim, como base para a análise dos resultados obtidos neste trabalho, bem como para a comparação destes com demais resultados encontrados na literatura.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Planejamento do trabalho

Planejou-se a execução deste projeto de acordo com as seguintes etapas, de forma a atingir os objetivos propostos:

1^a Etapa: Projeto e construção de um secador com circulação forçada para a secagem da polpa de celulose, em escala de laboratório, com possibilidade de trabalhar com diferentes velocidades e temperaturas do ar de secagem.

2^a Etapa: Preparação e caracterização da polpa de celulose a partir de fibras de celulose recuperadas, com formulação similar à utilizada em pequenas empresas produtoras de papel reciclado.

3^a Etapa: A partir de testes preliminares, definir um planejamento estatístico dos experimentos para a secagem, verificando a influência individual ou por interação das variáveis operacionais nos teores de umidade finais, nas taxas de secagem, assim como na qualidade do produto obtido.

4^a Etapa: Estudar a cinética de secagem da polpa de celulose, através da determinação das curvas de secagem obtidas para as diferentes condições de velocidade e temperatura do ar, baseando-se nas condições operacionais estabelecidas no planejamento experimental.

5^a Etapa: Determinação e análise das isotermas de dessorção do papel pelo método dinâmico, utilizando o equipamento DVS (Dynamic Vapour Sorption 2).

6^a Etapa: Análise da qualidade do produto obtido para as diferentes condições operacionais a partir de testes que determinem as características do papel.

7^a Etapa: Análise da eficiência energética do processo, visando avaliar, juntamente com a análise da cinética de secagem, a potencialidade da utilização do secador convectivo em pequenas produções.

8^a Etapa: Comparação entre a secagem natural ao ar livre e a secagem forçada baseada nas características do papel.

9^a Etapa: Análise do encolhimento do papel durante a secagem. Pretende-se correlacionar o encolhimento com as condições operacionais e características físicas do papel, como porosidade e densidade aparente, e com a qualidade do produto.

3.2. Materiais

Neste trabalho foi utilizada polpa de celulose feita a partir de papel sulfite extra branco usado, de gramatura 75g/m², proveniente do Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem/UNICAMP. Para a preparação da polpa, também foram acrescentados amido de mandioca, carboxi metil celulose (CMC – agente adesivo) e dióxido de titânio (pigmento branco), a fim de conferir à polpa as características necessárias para a fabricação de um papel tipo cartão. A polpa de celulose foi preparada segundo procedimento estabelecido no item 3.3.

3.3. Preparação da polpa

Para a preparação da polpa, utilizou-se o seguinte procedimento (Forte Gil *et al.*, 1996):

- Seleção do papel

O papel foi selecionado de acordo com a gramatura e o tipo especificado no item 3.2

- Corte do papel

O papel selecionado para ser reciclado foi picado no sentido vertical das fibras.

- Lavagem e amolecimento

O papel picado foi colocado em um balde com água durante o período de 24 para que amolecesse.

- *Desagregação*

Decorrido o tempo em que o papel ficava imerso em água, este foi batido, juntamente com água, em um liquidificador industrial (desagregador) (Modelo LS-04), durante 1 minuto. Para cada 120g de papel molhado, adiciona-se mais 900g de água.

- *Aditivos*

Foi realizada a adição de alguns produtos durante a preparação da polpa, tais como amido de mandioca, carboxi metil celulose (CMC – agente adesivo) e dióxido de titânio (pigmento branco) (5g de cada aditivo), a fim de conferir ao papel mais consistência e aumentar o seu peso.

- Bateu-se a polpa por mais dez segundos no liquidificador.

- *Formatação da folha*

Despejou-se a polpa na mesma tela que também foi utilizada para a secagem no secador convectivo. Uma prensa construída de acrílico foi utilizada para retirar o excesso de água.

Retirou-se cuidadosamente a tela da prensa, tirando a umidade externa da tela com uma esponja ou tecido.

3.4. Sistema Experimental

A câmara de secagem projetada foi construída de chapa de aço inoxidável, cujas dimensões estão especificadas na Tabela 3.1. O secador é dotado de 5 aberturas com portas, sob as quais são conectadas as telas que dão suporte à polpa de celulose. As telas são constituídas externamente de uma tela rígida de aço com abertura de 2 mm e internamente uma tela fina de Mesh 150 (abertura de 0,106 mm). A Figura 3.1 apresenta as vistas em perspectiva da configuração do secador. Na Figura 3.2, pode-se visualizar, em detalhe, as telas com a polpa de celulose (parte interna) a ser seca. As telas são preenchidas com a polpa e, em seguida, inseridas no secador através das aberturas localizadas na parte superior do equipamento.

Tabela 3.1: Dimensões da câmara de secagem.

| Componentes | Dimensões |
|------------------------------------|-----------|
| Câmara: | |
| <i>Parte retangular</i> | |
| Altura | 111mm |
| Largura | 126mm |
| Comprimento | 200mm |
| <i>Parte cônica</i> | |
| Aresta lateral | 150mm |
| Ângulo de inclinação | 25° |
| Telas | |
| Número | 5 |
| Altura | 100mm |
| Largura | 100mm |
| Aberturas (entrada e saída) | |
| Diâmetro interno | 43mm |

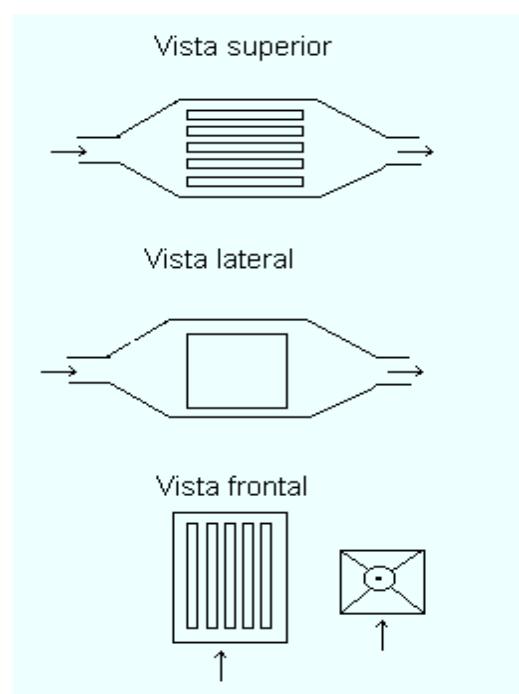


Figura 3.1: Vistas em perspectiva do secador.

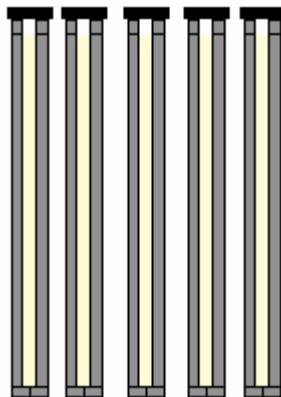


Figura 3.2: Detalhe das telas com a polpa de papel para o secador.

A Figura 3.3 ilustra o esquema do sistema experimental utilizado nos ensaios de secagem da polpa de celulose. O ar é fornecido por um compressor radial CRE03, 2cv (1), dotado de filtro de ar e atenuador de ruídos. A vazão do ar é controlada por uma válvula globo (2) e em seguida passa por um leito de sílica gel a fim de reduzir a umidade relativa do ar de entrada no secador (3). Foram acoplados dois leitos de sílica em paralelo de modo a permitir a substituição pelo outro e continuar o experimento em caso de saturação de um dos leitos durante os experimentos,. Os leitos de sílica são construídos em acrílico e acoplados à linha por uniões de PVC. A vazão de ar é medida pelo conjunto da pressão estática na linha (4) e a queda de pressão na placa de orifício (5), acoplados a dois manômetros diferenciais de água em forma de U (6). O ar passa por um aquecedor elétrico composto por um conjunto de resistências (7). O ar quente e seco passa por um distribuidor de ar e chega à câmara de secagem (8), atravessando a câmara em paralelo às telas. A temperatura da tela que suporta a polpa de papel é obtida por indicadores de temperatura conectados às telas (9). Dois termohigrômetros (10) são acoplados na entrada e na saída do secador, para a medição da temperatura e da umidade relativa do agente de secagem. Durante o estudo da cinética, a perda de massa da umidade evaporada é quantificada em uma balança analítica (11). A câmara de secagem foi isolada com amianto a fim de reduzir a perda de calor ao ambiente.

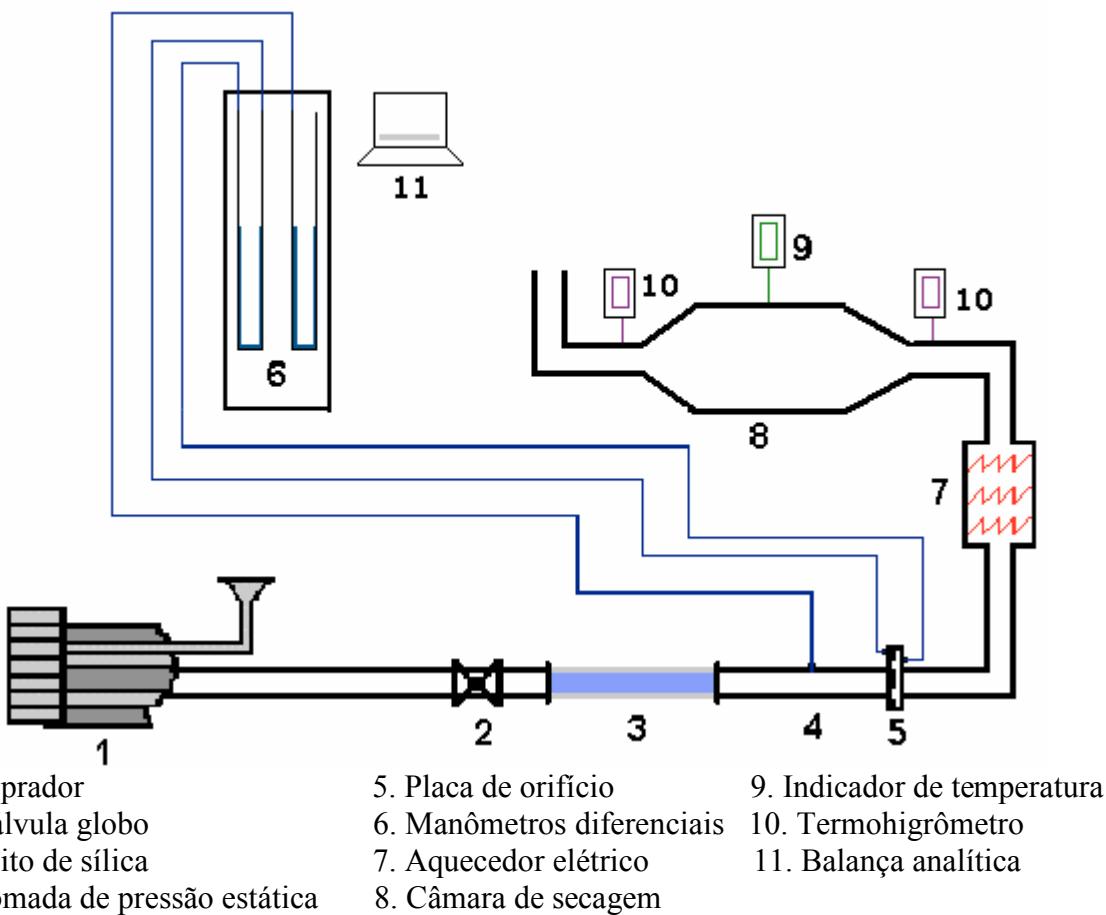


Figura 3.3: Esquema do sistema experimental.

A Figura 3.4 apresenta fotos de uma vista transversal da câmara de secagem com as telas e de uma vista lateral do secador, mostrando as duas aberturas laterais para a inserção dos termohigrômetros.

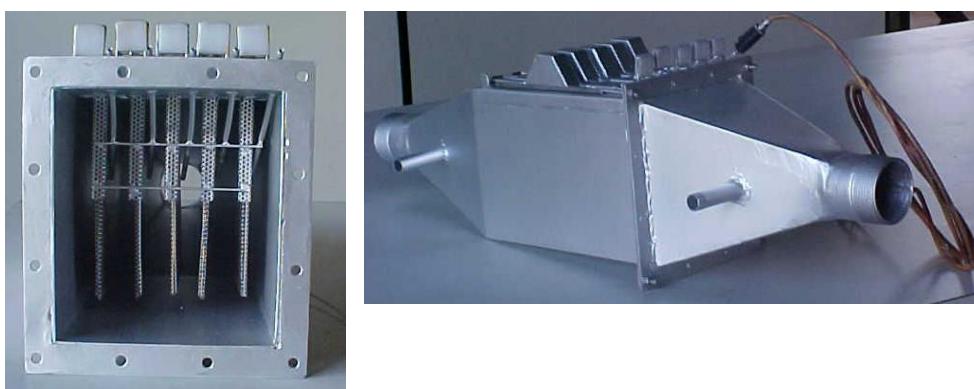


Figura 3.4: Fotos das vistas transversal e lateral do secador.

A Figura 3.5 mostra em detalhe a tela (aberta e fechada) que dá suporte à polpa de celulose.



Figura 3.5: Fotos da tela aberta e fechada.

Para a retirada da água em excesso presente na polpa, foi construída uma prensa em acrílico, com haste de aço inoxidável. A prensa possui uma placa de acrílico com aberturas para que a água escoe e fique armazenada em um coletor. A Figura 3.6 apresenta fotos da prensa, mostrando em detalhe a placa vazada, juntamente com o coletor de água.

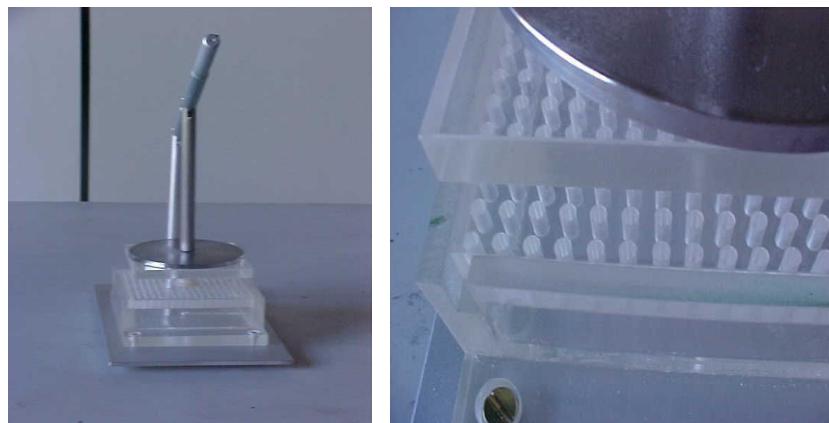


Figura 3.6: Fotos da prensa de acrílico e aço inox.

A vazão de ar foi determinada através da placa de orifício, fina placa de aço inoxidável presa entre dois flanges na tubulação de ar com um orifício, utilizando-se a Equação de aferição de Ower e Pankhurst (1977). Foram instaladas duas tomadas de pressão, uma à montante e outra à jusante da placa e a medida acompanhada pelo manômetro (queda de pressão da placa de orifício).

$$Q_{ar} = K \cdot \xi \cdot \alpha \cdot a_2 \sqrt{\frac{1}{1 - m^2} (\Delta P_1) \frac{b}{c + T}} \quad (3.1)$$

Sendo: Q_{ar} : vazão mássica do ar (kg/min)

α : coeficiente de descarga para a placa de orifício

T: temperatura do ar (°C)

ΔP_1 : queda de pressão na placa de orifício (cm H₂O)

m: a_2/a_1

a_1 : área do tubo (cm²)

a_2 : área do orifício da placa (cm²)

b: pressão barométrica local (mmHg)

ξ : fator de compressibilidade para a placa de orifício

$$\text{Onde: } \xi = 1 - \beta \frac{(\Delta P_1)}{P_{est,1}} \quad (3.2)$$

$$\beta = 0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3$$

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4$$

$P_{est,1}$: pressão estática a montante da placa de orifício (cm H₂O)

Para o sistema internacional de unidades, tem-se as seguintes constantes: K = 0,0573 e c = 273,15. Para os ensaios de secagem convectiva forçada foram utilizadas três placas de orifício com diâmetros de orifício de 11, 16 e 20 mm. O diâmetro interno da tubulação é de 43,0 mm.

3.5. Caracterização da polpa de papel

3.5.1. Tipo de fibra

A polpa utilizada nos ensaios de secagem foi analisada em um microscópio óptico (marca LEICA, modelo DMLM) com ampliação de 100x, instalado no Laboratório de Uso Comum (LUC) da Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP, para a medida do comprimento (L) da fibra presente na polpa. Desta forma, pode-se classificá-la em função

do tamanho em fibra curta ($0,75 < L < 2$ mm) ou fibra longa ($3 < L < 5$ mm) (Fed, 2000). O conhecimento do comprimento da fibra da polpa é importante para o processo de reciclagem do papel, pois a cada reciclagem a fibra se torna menos resistente, prejudicando a qualidade do papel.

As fibras da polpa também foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (marca LEICA, modelo LEO 440i) acoplado a um EDX instalado no Laboratório de Uso Comum (LUC) da Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP para o conhecimento da estrutura interna da polpa.

3.5.2. Concentração de sólidos da polpa

A determinação da concentração de sólidos da polpa foi realizada pelo método gravimétrico estático mediante a secagem da mesma em estufa à 105°C por um período de 24 horas até massa constante. Este tempo é suficiente para a secagem completa da polpa, em virtude da grande quantidade de umidade livre presente.

3.6. Caracterização física do papel

3.6.1. Teor de umidade

O teor de umidade da folha de papel foi determinado pelo método gravimétrico estático, por meio da secagem em estufa à 105°C, durante um período de 24 horas, tempo suficiente para a secagem completa da folha. Este ensaio é importante para avaliar a qualidade da polpa utilizada na fabricação do papel.

3.6.2. Gramatura

A gramatura de um papel tem grande importância sob o ponto de vista econômico, além de influenciar as demais propriedades do mesmo, tais como as propriedades ópticas e mecânicas. A determinação da gramatura do papel baseia-se na quantidade de polpa por unidade de área.

Este ensaio foi realizado da seguinte forma: corta-se uma área pequena e conhecida de papel, denominada corpo de prova, utilizando uma tesoura e um paquímetro (para medir as dimensões). Pesa-se este corpo em uma balança analítica e converte-se a massa obtida para a área de um metro quadrado. Foram realizadas sete medidas de cada folha e calculada a média aritmética e o desvio padrão para cada amostra.

3.6.3. Espessura

A espessura do papel é definida como a espessura de uma folha quando colocada entre duas superfícies planas, sujeitas à pressão constante. A espessura foi medida através de um micrômetro com precisão de medida igual a 0,01mm. Foram realizadas dez medidas de cada folha e calculada a média aritmética e o desvio padrão para cada amostra.

3.6.4. Densidade aparente

A densidade aparente da folha é definida como a razão da massa da folha e do volume total da mesma, incluindo o volume que os poros ocupam. O volume aparente de cada amostra foi determinado pesando a amostra em ar e em líquido. Para tanto, foi construído um aparato que foi acoplado à balança analítica e que se baseia no Princípio de Archimedes, o qual afirma que a força de empuxo que um líquido exerce em um objeto é igual ao peso do líquido que o objeto desloca. O etanol foi usado em vez da água porque este não reage e nem dissolve o papel. A densidade aparente é então calculada a partir da massa da amostra no ar dividida pelo seu volume aparente.

3.6.5. Densidade real

A densidade real da folha é definida como a razão entre a massa que a folha de papel ocupa e o volume que a estrutura do sólido ocupa, ou seja, excluindo os poros do sólido. A determinação da densidade real foi realizada por picnometria a Hélio, pelo picnômetro de modelo ACCUPYC 1330, da marca [®]Micromeritics.

3.6.6. Porosidade

A porosidade da folha é a razão do volume de poros da folha sobre o volume total da folha. O papel úmido é um material heterogêneo constituído de um sistema de três fases: uma líquida, uma gasosa composta de uma mistura de gases, ar e vapor de água, e uma fase sólida constituída de uma matriz porosa de fibras de celulose. A estrutura porosa sólida encolhe e muda de forma durante a secagem (Stenström, 2004). A porosidade foi calculada usando-se o modelo de três fases, desenvolvido a partir das seguintes Equações (Mayor e Sereno, 2004; Katekawa e Silva, 2004):

$$V = V_w + V_{ar} + V_s \quad (3.3)$$

Onde: V: volume total do papel

V_w : volume ocupado pela fase líquida

V_{ar} : volume ocupado pela fase gasosa

V_s : volume ocupado pela fase sólida

O ar presente na amostra apresenta uma massa desprezível, embora ele ocupe um volume considerável. Assim, obtém-se a Equação (3.4):

$$m = m_w + m_s \quad (3.4)$$

Onde: m: massa total do papel

m_w : massa de água presente no papel

m_s : massa de sólido presente no papel

Combinando as Equações (3.3) e (3.4) e usando a definição de teor de umidade em base seca e de porosidade, obtém-se uma expressão para a porosidade, correlacionando-a com a densidade aparente, a densidade real do sólido seco e o conteúdo de umidade do material.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap} \left[\frac{\rho_r}{\rho_w} \cdot X + I \right]}{\rho_r \cdot [X + I]} \quad (3.5)$$

Onde: ε : porosidade do papel (-)

ρ_{ap} : densidade aparente do papel (g/cm^3)

ρ_r : densidade real do papel (g/cm^3)

ρ_w : densidade da água líquida (g/cm^3)

X: teor de umidade do papel (kg/kg)

3.6.7. Resistência à tração e alongamento

A determinação das propriedades de tração e alongamento do papel (Método de velocidade constante de carga) foi realizada no Laboratório de Papel e Revestimento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), segundo metodologia descrita na norma NBR NM ISO 1924 -2:2001.

3.6.8. Resistência ao arrebentamento

A determinação das propriedades de arrebentamento do papel (impressão) foi realizada no Laboratório de Papel e Revestimento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), segundo metodologia descrita na norma NBR NM ISO 2758:2001.

3.6.9. Estabilidade dimensional

A determinação da variação dimensional após imersão em água foi realizada no Laboratório de Papel e Revestimento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), segundo metodologia descrita na norma ISO 5635:1978.

3.6.10. Absorção de água

O teste de absorção de água por capilaridade (longitudinal) pelo papel foi realizado no Laboratório de Papel e Revestimento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), segundo metodologia descrita na norma NBR NM ISO 8787:2001.

3.7. Métodos Experimentais

3.7.1. Planejamento experimental

Foi proposto um planejamento composto central com dois fatores para analisar a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem, no teor de umidade final, após um tempo fixo de secagem, nas taxas de secagem e na qualidade da folha de papel. O planejamento composto central para k fatores, devidamente codificados como (x_1, \dots, x_k) , é formado de três partes, sendo a primeira chamada de fatorial (ou cúbica), a segunda de axial (ou em estrela) e a terceira formada por ensaios realizados no ponto central.

As repetições no ponto central têm como finalidade fornecer uma medida do erro puro e estabilizar a variância da resposta prevista. Na prática, são recomendados de três a cinco ensaios repetidos no ponto central (Barros Neto *et al.*, 2001).

O planejamento composto central tem como vantagem o fato de ser formado de três partes distintas, podendo ser construído seqüencialmente, conforme a necessidade. Além disso, ele fornece modelos bem mais preditivos se comparados aos obtidos a partir de planejamentos fatoriais mais simples.

Neste trabalho, foram realizados seis ensaios repetidos no ponto central ($x_i = 0$), correspondendo a valores médios entre os níveis inferiores e superiores das variáveis de estudo, além de ensaios nos pontos de coordenadas $x_i = \pm 1$, para ambos os fatores (correspondendo à parte fatorial) e ensaios nos pontos de coordenadas $x_i = \pm \sqrt{2}$ (correspondendo à parte axial ou em estrela), totalizando quatorze experimentos. Os níveis de cada fator foram escolhidos em função da qualidade do papel obtido em testes preliminares.

Segundo Barros Neto *et al.* (2001), usando planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, pode-se extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um mínimo de experimentos.

O gráfico de probabilidade normal, bem como a análise da variância, foram gerados pelo programa STATISTICA®, versão 5.5, servindo como base para a interpretação dos resultados obtidos experimentalmente.

Os ensaios de secagem foram realizados de forma aleatória. A matriz experimental dos ensaios realizados está apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores codificados das variáveis independentes.

| Experimentos | T_{ar} (°C) (X ₁) | v_{ar} (m/s) (X ₂) |
|--------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 |
| 4 | +1 | +1 |
| 5 | -1,4 | 0 |
| 6 | +1,4 | 0 |
| 7 | 0 | -1,4 |
| 8 | 0 | +1,4 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 |

3.7.2. Cinética da secagem da polpa de celulose

Os experimentos de cinética de secagem da polpa de celulose foram realizados segundo a metodologia descrita a seguir:

1. Inicialmente, pesa-se cada tela separadamente. A polpa preparada é colocada nas telas onde são prensadas para a eliminação da água em excesso. Pesa-se cada tela, juntamente com a polpa prensada.
2. Liga-se o compressor e regula-se a velocidade do ar através da válvula. Em seguida, liga-se o aquecedor elétrico, fixando a temperatura do ar desejada. Espera-se que o equilíbrio térmico seja atingido (cerca de 20 minutos).

3. Estabelecido o equilíbrio térmico, inicia-se o experimento, utilizando-se um cronômetro para a medida do tempo de ensaio. A cada 5 minutos, pesa-se as telas juntamente com a polpa em uma balança analítica. A massa de sólido seco é obtida por secagem em estufa.
4. A temperatura e a umidade relativa do ar de entrada e de saída do secador são acompanhadas por termohigrômetros localizados em pontos específicos do equipamento. A temperatura das telas é acompanhada por um termopar disposto na superfície de cada tela. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente são medidas antes de cada ensaio.
5. As curvas de secagem são plotadas com os dados da razão X/X_0 em função do tempo. Para a determinação da taxa inicial de secagem, traçou-se uma reta tangente ao primeiro ponto da curva de cinética, ou seja, $X/X_0 = 1$. A taxa de secagem constante em função do tempo é obtida a partir da derivada da curva de secagem, aproximando-se para uma reta os pontos correspondentes à fase de taxa constante.

3.7.3. Isotermas de dessorção de umidade do papel

A importância das isotermas de dessorção no processo de secagem está na determinação dos teores mínimos de umidade para uma dada condição, a qual o material será submetido durante o processo de secagem.

As isotermas de dessorção de umidade do papel foram construídas pelo método dinâmico, utilizando o equipamento DVS-Dynamic Vapour Sorption 2. Foram analisadas amostras de papel obtidas em três diferentes condições operacionais do planejamento experimental: (-1,-1), (0,0) e (+1,+1). As isotermas foram realizadas para estas amostras nas temperaturas de 25°C e 50°C, por uma limitação do equipamento utilizado.

Um diagrama esquemático do equipamento DVS é apresentado na Figura 3.7. O sistema possui uma microbalança que mede a perda de umidade da amostra, a partir do arraste de um gás inerte, com umidade relativa e temperatura controladas. As umidades estabelecidas são geradas a partir de controladores de fluxo de massa, misturando-se fluxos de gás seco e vapor saturado em determinadas proporções.

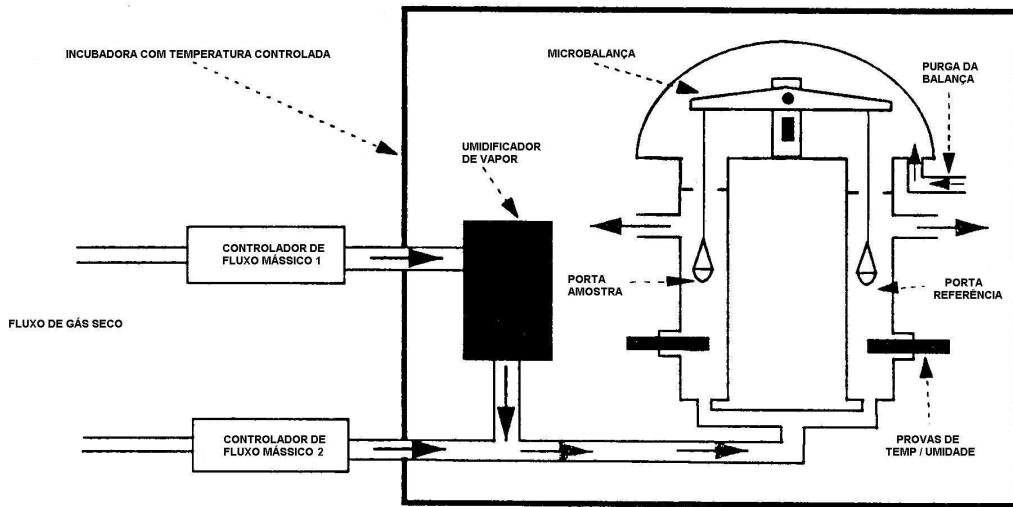


Figura 3.7: Esquema do equipamento DVS (DVS user guide, 2000).

3.7.4. Eficiência energética

O balanço energético para o secador em batelada utilizado foi efetuado para um simples ciclo de secagem. Utilizamos como base os ensaios 1, 9 e 4 realizados, respectivamente, nos pontos (-1,-1), (0,0) e (+1,+1) para as cinco telas, fixando o tempo de secagem em 51 minutos. O tempo de secagem utilizado como base para o cálculo de eficiência energética foi estabelecido em 51 minutos, pois representa o menor tempo necessário para a secagem completa da folha que se encontra no meio do secador (tela 3) dentre todas as condições analisadas (ver Tabela 4.6).

As seguintes considerações foram feitas para os cálculos energéticos:

- A energia necessária para aquecer o material de sua temperatura inicial até a temperatura final (Strumillo, 1986):

$$Q_m = M_m \cdot (c_{m2} \cdot T_{m2} - c_{m1} \cdot T_{m1}) \quad (3.6)$$

Onde: Q_m : calor necessário para aquecer o material (kJ)

M_m : massa de material ao final da secagem(kg)

c_{m1} : calor específico do material no início da secagem (kJ/kg.K)

c_{m2} : calor específico do material no final da secagem para o tempo fixado (kJ/kg.K)

T_{m1} : temperatura do material no início da secagem (K)

T_{m2} : temperatura do material no final da secagem (K)

- O calor específico do material no início da secagem (c_{m1}) foi determinado:

$$c_{m1} = \frac{c_{ps} + c_{Al} \cdot X_0}{1 + X_0} \quad (3.7)$$

Onde: c_{ps} : calor específico do papel seco (kJ/kg.K)

c_{Al} : calor específico da umidade contida no material na fase líquida (kJ/kg.K)

X_0 : teor de umidade do papel no início da secagem (kg_w/kg_{ss})

- A energia necessária para evaporação da umidade:

$$Q_w = \Delta H_{v,w} \cdot M_{w,ev} \quad (3.8)$$

Onde: Q_w : calor necessário para evaporar a umidade (kJ)

$M_{w,ev}$: massa de água evaporada (kg)

$\Delta H_{v,w}$: calor de vaporização da água na temperatura do ar (kJ/kg_w)

- O calor latente de evaporação foi considerado como aquele necessário para evaporar a água livre, o que de acordo com Muthu e Chattopadhyay (1993) apud Lima (1998) é válido para materiais com teores de umidade elevados. Os autores obtiveram as seguintes expressões para o calor de vaporização em função da temperatura:

$$\Delta H_{v,w} = 2502,535259 - 2,38576424 \cdot (T + 273) \quad \text{para } 0^{\circ}\text{C} \leq T_{ar} \leq 65,56^{\circ}\text{C} \quad (3.9a)$$

$$\Delta H_{v,w} = [7329155,98 - 15,9959641 \cdot (T + 273)^2]^{1/2} \quad \text{para } 65,56^{\circ}\text{C} \leq T_{ar} \leq 260^{\circ}\text{C} \quad (3.9b)$$

- Desprezou-se para efeito de cálculo energético as perdas de calor ao ambiente, visto que o secador foi isolado termicamente.

- O calor específico do ar foi obtido em Welty *et al.* (1984). O calor específico do material ao final da secagem foi obtido por análise no DSC-50, marca SHIMATZU.

$$c_{m2} (70^{\circ}\text{C}) = 2797,24 \text{ J/kg.K}$$

$$c_{m2} (80^{\circ}\text{C}) = 2367,13 \text{ J/kg.K}$$

$$c_{m2} (90^{\circ}\text{C}) = 2007,52 \text{ J/kg.K}$$

- A energia térmica fornecida à operação foi calculada como:

$$E_{ter} = M_{ar} \cdot (c_{ar} \cdot T_{ar} - c_0 \cdot T_0) \quad (3.10)$$

Onde: E_{ter} : energia térmica fornecida à operação (kJ)

M_{ar} : massa de secagem ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : temperatura do ar ambiente (K)

T_{ar} : temperatura do ar de secagem (K)

c_{ar} : calor específico do ar de secagem (J/kg.K)

c_0 : calor específico do ar ambiente (J/kg.K)

- A energia mecânica gasta pelo compressor para bombear o ar:

$$E_{mec} = \Delta P \cdot Q \cdot t \quad (3.11)$$

Onde: E_{mec} : energia mecânica fornecida à operação (kJ)

ΔP : queda de pressão, fornecida pelo fabricante, através da curva de teste (Pa)

Q : vazão de ar bombeada pelo compressor (m^3/s)

t : tempo de operação (s)

- A energia total fornecida à operação foi considerada como a soma da energia térmica e da energia mecânica.

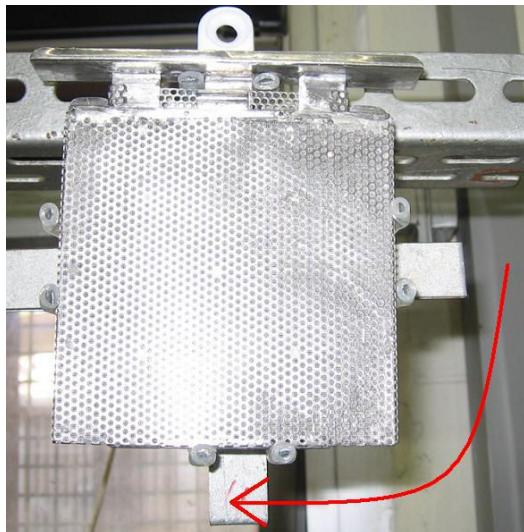
-A razão entre a energia gasta para vaporizar a água e a energia mecânica necessária para bombear o ar, denominada de coeficiente de secagem LM, foi determinada a fim de comparar as condições operacionais utilizadas durante a secagem sob o aspecto fluidodinâmico.

3.7.5. Secagem natural

Para o estudo da cinética de secagem convectiva natural do papel reciclado, adotou-se um procedimento similar ao realizado tradicionalmente em galpões de cooperativas. As polpas de papel preparadas segundo metodologia descrita no item 3.3 e prensadas foram penduradas em um “varal”, sujeitas às condições ambientais do laboratório. A Figura 3.8 apresenta fotos do sistema montado para os ensaios de secagem natural da polpa de papel.



(a)



(b)

Figura 3.8: Esquema do sistema montado para os ensaios de secagem natural.

O “varal” utilizado é constituído de uma haste horizontal com garras que sustentam as telas com a polpa. Estas garras são removíveis, permitindo que as telas possam ser giradas a 90° a cada hora durante a secagem. Este procedimento tem por finalidade evitar que a polpa escoe em um sentido, provocando uma variação de densidade do papel formado. Além disso, as telas servem para fixar a forma do papel, uma vez que

quando secadas ao natural sem as telas, as folhas encolhem e sofrem deformações, ficando onduladas. Isto ocorre em função de contrações irregulares das fibras durante a secagem, provocadas pela transferência de calor e massa por regiões preferenciais (FORTE GIL, *et al.*, 1996).

Medidas de massa das telas com a polpa foram realizadas a cada vinte minutos nas primeiras duas horas e depois a cada hora durante doze horas de secagem. Após esse intervalo de tempo fixado, foram realizadas medidas de massa para se determinar o tempo necessário para a secagem completa do papel.

A determinação da massa de sólido seco em cada tela foi feita a partir da análise gravimétrica em estufa a 105°C até peso constante.

O acompanhamento da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente foi feito juntamente com as medidas de massa, utilizando-se um termohigrômetro digital. Determinou-se também a concentração de sólidos de cada polpa utilizada.

Os ensaios foram realizados em dias com diferentes valores de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de se verificar a influência destes parâmetros no tempo de secagem, bem como na qualidade final do papel obtido.

Ao final do estudo, foram determinadas as características do papel seco, tais como espessura, gramatura e propriedades relacionadas à qualidade do papel, de modo que estas possam ser comparadas com as do papel seco por convecção forçada no secador construído no laboratório.

3.7.6. Análise do encolhimento do material

O efeito da temperatura do ar de secagem no encolhimento do papel foi analisado apenas para o período de secagem decrescente, pois antes do teor de umidade crítico a polpa de papel apresenta uma alta umidade superficial livre, tornando impossível uma medição correta de suas dimensões por um paquímetro digital. Além disso, o encolhimento foi apenas observado após a remoção da água superficial.

Folhas de papel de forma quadrangular com 10 cm de lado e 1 mm de espessura foram inicialmente secas no secador convectivo nas temperaturas de 70, 80 e 90°C e a uma

velocidade constante de 0,7 m/s, até que o teor de umidade crítico fosse atingido. O tempo crítico para cada condição operacional foi determinado a partir de curvas de cinética de secagem realizadas anteriormente. O papel nesta condição foi então removido do secador e 6 amostras uniformes foram retiradas de cada folha. As amostras foram cortadas em círculos de diâmetro igual a 20 mm usando-se um cortador cilíndrico.

As amostras foram inicialmente pesadas e seus diâmetros e espessuras foram medidos usando um paquímetro digital (precisão $\pm 0,01$ mm). Quatro medidas, em diferentes direções, foram feitas em cada disco. Estas amostras foram então colocadas em uma estufa para completar o processo de secagem nas mesmas temperaturas (70, 80 e 90°C) usadas na primeira etapa. Foram realizados experimentos em duplicata para cada condição.

As amostras foram retiradas da estufa em intervalos de tempo estabelecidos para análise de propriedades físicas: densidades real e aparente, teor de umidade e porosidade. Cada amostra representa um ponto experimental, pois uma vez imergida no álcool etílico para a realização da análise da densidade aparente, a amostra não poderia mais retornar ao ensaio.

O volume aparente de cada amostra foi determinado pesando a amostra em ar e em líquido, conforme metodologia explicitada no item 3.6.5.

O teor de umidade das amostras foi obtido pelo método de gravimétrico estático, em estufa à 105°C, durante 24 horas.

A densidade real das amostras de sólidos secos foi determinada através da análise de picnometria a Hélio.

A porosidade do papel após a secagem foi obtida a partir da Equação (3.5), utilizando os valores de densidade aparente, densidade real e teor de umidade da folha de papel.

Mudanças estruturais na superfície do papel após a secagem foram analisadas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O objetivo foi estudar a influência da temperatura de ar no encolhimento linear, superficial e volumétrico do papel reciclado, como também em suas propriedades estruturais.

A distribuição de tamanho de poros para as folhas de papel secas a 70, 80 e 90°C foi obtida a partir da análise de porosimetria de mercúrio (modelo WIN9400 Series, marca [®]Micromeritics).

CAPÍTULO 4

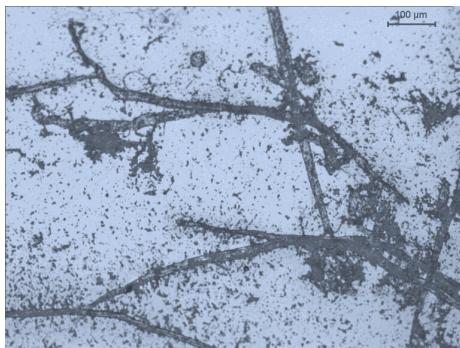
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da polpa de papel

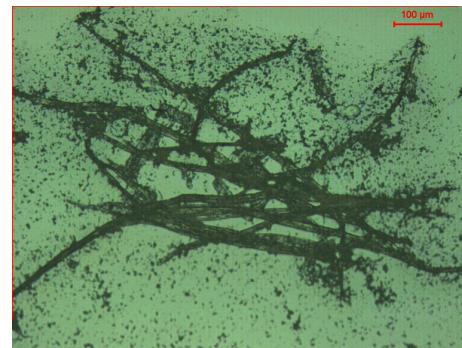
4.1.1. Análise da fibra de celulose

A fibra de celulose foi analisada através do microscópio óptico (marca LEICA, modelo DMLM) com ampliação de 100x e do microscópio eletrônico de varredura (MEV) (marca LEICA, modelo LEO 440i) acoplado a um EDX, ambos instalados no Laboratório de Uso Comum (LUC) da Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP. As análises têm o objetivo de classificar o tipo de fibra em função do tamanho (L) e de obter um melhor conhecimento da estrutura interna da polpa.

A Figura 4.1 apresenta as fotos obtidas por microscopia óptica para a polpa de papel. O comprimento da fibra foi medido utilizando-se um recurso de medição do próprio equipamento. Foram feitas vinte medições dentre todas as fotos realizadas.



(a)



(b)

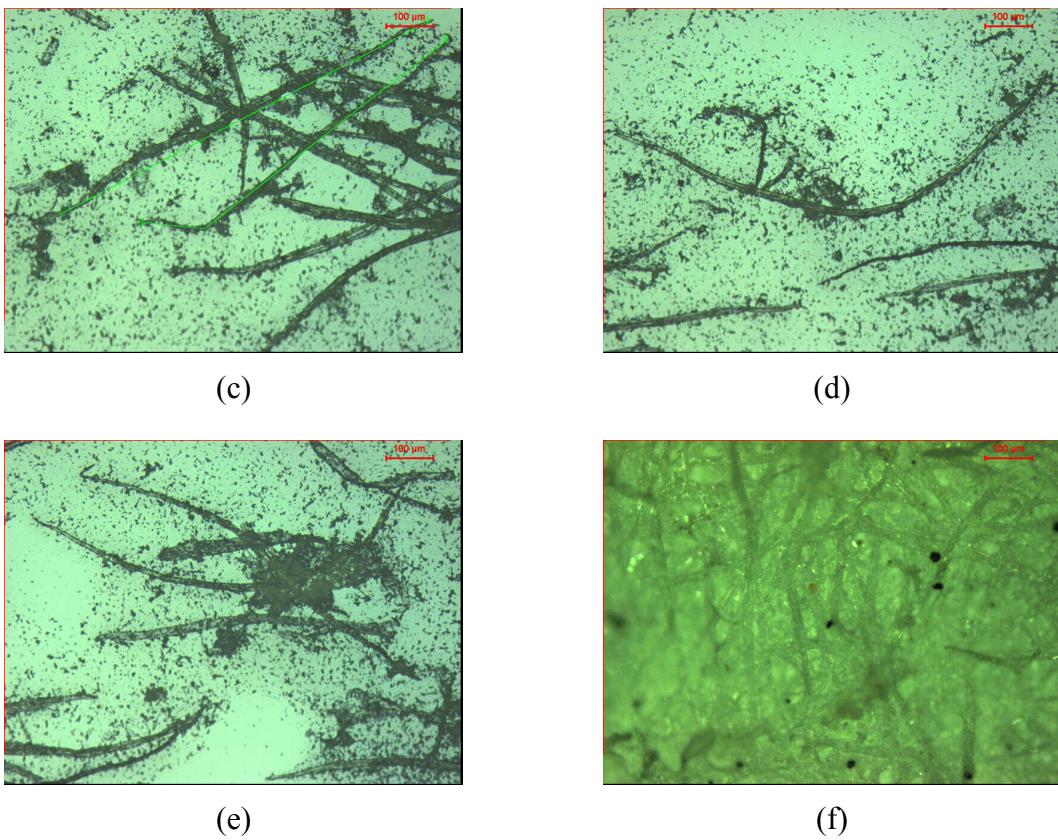
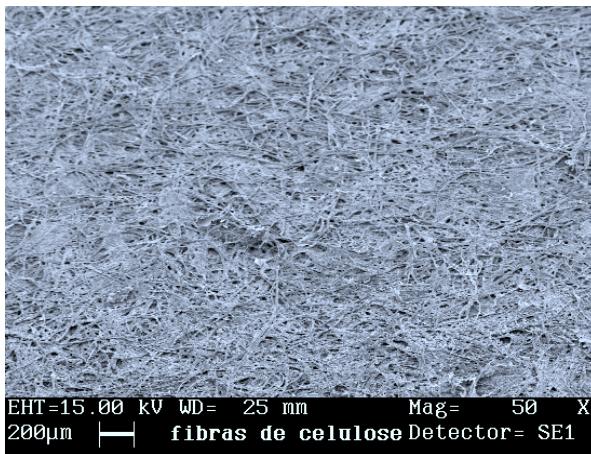


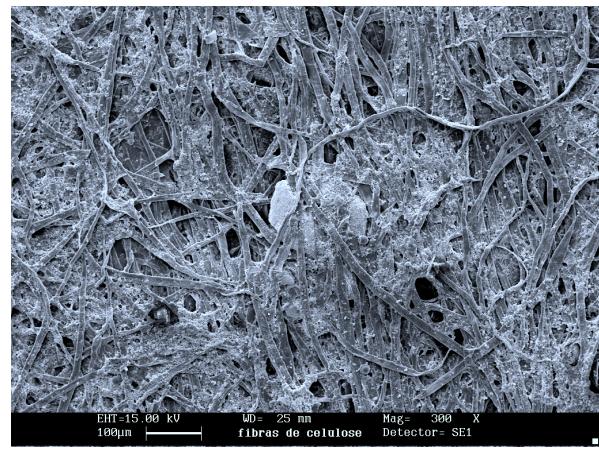
Figura 4.1: Fotos da polpa de papel pelo microscópio óptico, com ampliação de 100x: (a) $L = 0,810\text{mm}$, (b) $L = 0,819 \text{ mm}$, (c) $L_1 = 0,881 \text{ mm}$, $L_2 = 0,771 \text{ mm}$, (d) $L = 1,038 \text{ mm}$, (e) $L_1 = 0,616 \text{ mm}$, $L_2 = 0,767 \text{ mm}$, (f) $L = 0,607 \text{ mm}$.

Segundo Fed (2000) apud Antunes (2001), podemos classificar as fibras em função do tamanho em fibra curta ($0,75 < L < 2 \text{ mm}$) ou fibra longa ($3 < L < 5 \text{ mm}$). De acordo com as fotos mostradas, as fibras apresentaram comprimento que variou entre 0,607 mm a 1,038mm, sendo então classificadas como fibras curtas. Isto significa que o papel fabricado a partir destas fibras não poderá sofrer uma nova reciclagem, para a maioria das utilizações do papel, pois as fibras já se encontram bastante curtas e a cada reciclagem a fibra se torna menos resistente, prejudicando a qualidade do papel (Vieira *et al.*, 2005a).

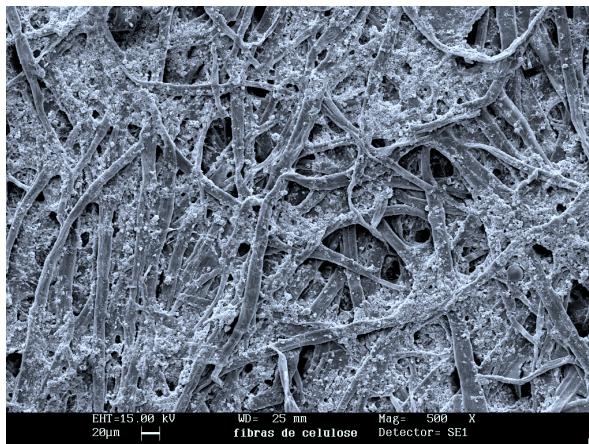
As fotos obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) encontram-se na Figura 4.2.



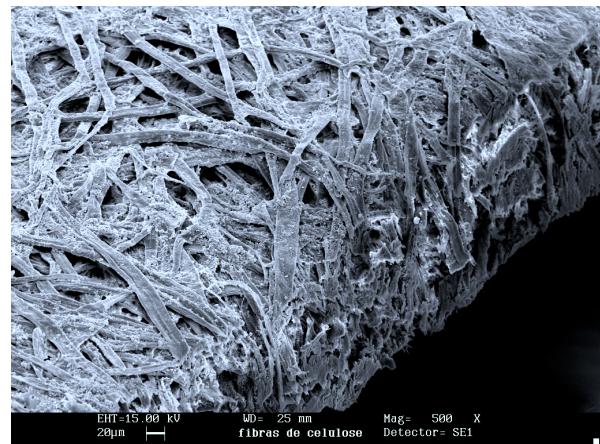
(a)



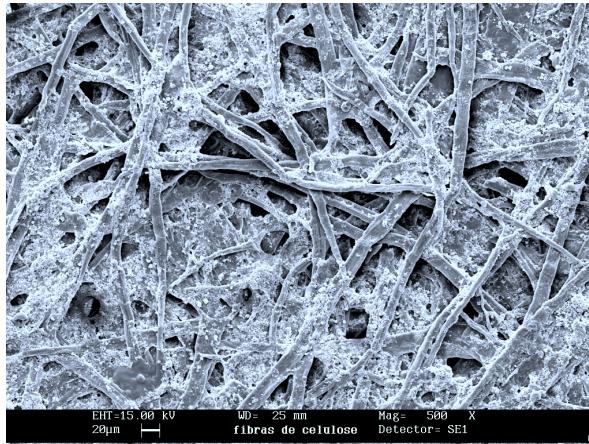
(b)



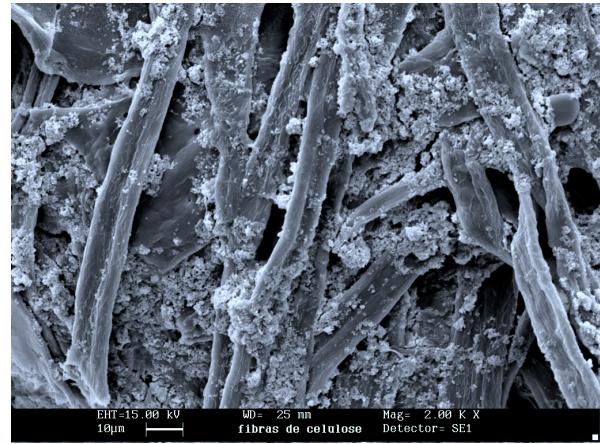
(c)



(d)



(e)



(f)

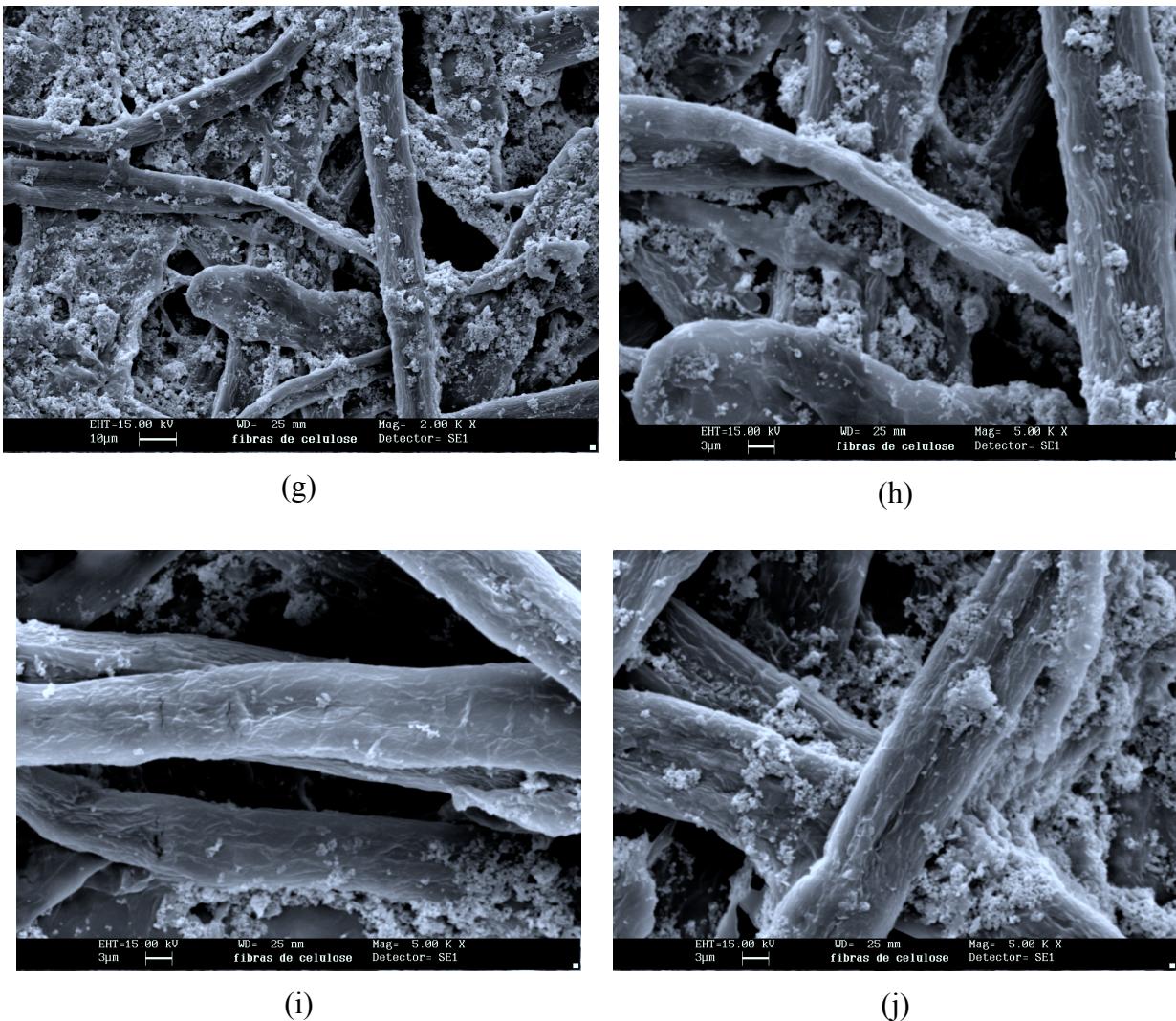


Figura 4.2: Fotos das fibras de celulose do papel pelo MEV, com ampliação de: (a) 50x, (b) 300x, (c) 500x, (d) 500x, (e) 500x, (f) 2000x, (g) 2000x, (h) 5000x, (i) 5000x, (j) 5000x.

Conforme visualizado na Figura 4.2, o papel apresenta um arranjo randômico de fibras emaranhadas. De acordo com a análise do EDX acoplado ao MEV, constatou-se que os pontos brancos visualizados nas fotos da Figura 4.2 representam o dióxido de titânio, que foi utilizado na formulação da polpa para conferir opacidade à folha de papel formada.

A natureza das forças de ligação das fibras da polpa é constituída de pontes de hidrogênio entre os grupos carboxílicos de fibras de celulose adjacentes. As pontes de hidrogênio existem apenas entre os grupos celulose-OH e água-OH. As pontes de

hidrogênio entre as fibras têm energia de ligação que varia entre 3 e 8 kcal/mol, dependendo das distâncias envolvidas (Koran, 1990).

O grau de refinamento da polpa é uma característica importante, sendo responsável pelas modificações das fibras, fortalecendo as ligações inter-fibras durante a secagem. Isto tem influência direta no encolhimento do papel durante a secagem.

Neste trabalho, estabeleceu-se uma metodologia durante a preparação das polpas de papel, batendo a polpa em liquidificador industrial com a mesma velocidade e durante um tempo fixo, a fim de que as polpas tenham sempre o mesmo grau de refinamento. Um elevado tempo de desagregação poderia danificar as fibras e prejudicar a qualidade do papel reciclado.

4.1.2. Concentração de sólidos da polpa de papel

A polpa foi preparada e analisada quanto à concentração de sólidos, segundo metodologia descrita no capítulo 3.

A concentração de sólidos de cada polpa preparada foi determinada para cada experimento, ficando todas na faixa de 5 a 6,5% (ver Tabelas 4.1 e 4.3).

4.2. Cinética da polpa de papel

De acordo com a metodologia descrita no item 3.7.2, foram realizados testes preliminares para a obtenção das curvas experimentais de secagem, variando-se a temperatura do ar (60, 70, 80, 90 e 100°C) e a velocidade do ar de secagem (0,3, 0,5 e 0,7 m/s), para se definir um planejamento estatístico dos experimentos, verificando-se a influência destas variáveis no teor de umidade e na qualidade do papel final. A faixa de estudo das variáveis foi definida em função de limitações da unidade experimental.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos ensaios realizados e suas condições experimentais, bem como a concentração de sólidos da polpa utilizada em cada experimento.

Tabela 4.1: Condições operacionais dos ensaios preliminares de secagem.

| Ensaio | T _{ar} (°C) | v _{ar} (m/s) | C _s (%) | t _{ensaio} (min) | UR _{amb} (%) | T _{amb} (°C) |
|--------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 60 | 0,299 | 5,38 | 162 | 62,35 | 24,71 |
| 2 | 70 | 0,306 | 6,00 | 132 | 65,78 | 21,37 |
| 3 | 80 | 0,309 | 5,91 | 132 | 63,88 | 23,43 |
| 4 | 90 | 0,314 | 5,72 | 100 | 72,54 | 23,48 |
| 5 | 100 | 0,314 | 6,47 | 78 | 46,00 | 28,60 |
| 6 | 60 | 0,551 | 5,19 | 130 | 67,79 | 21,92 |
| 7 | 70 | 0,547 | 5,24 | 107 | 71,98 | 19,92 |
| 8 | 80 | 0,558 | 5,24 | 87 | 66,46 | 18,84 |
| 9 | 90 | 0,578 | 5,20 | 77 | 69,01 | 22,64 |
| 10 | 100 | 0,578 | 5,23 | 67 | 69,65 | 21,70 |
| 11 | 60 | 0,785 | 5,91 | 112 | 71,21 | 21,00 |
| 12 | 70 | 0,760 | 5,11 | 82 | 56,53 | 18,89 |
| 13 | 80 | 0,775 | 5,05 | 67 | 65,04 | 16,79 |
| 14 | 90 | 0,782 | 5,11 | 62 | 60,19 | 19,95 |
| 15 | 100 | 0,786 | 5,97 | 62 | 80,53 | 23,56 |

Baseando-se nos resultados dos testes preliminares descritos, foram definidos os níveis dos dois fatores para o planejamento experimental do processo de secagem, apresentados na Tabela 4.2, tendo-se como respostas a taxa de secagem na fase inicial (N_i), a taxa de secagem na fase constante (N_C) e o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial, após fixado o tempo de secagem (X_f/X_0). O papel seco à 100°C mostrou-se bastante ressecado, enquanto que temperaturas do ar abaixo de 60°C representam uma limitação do próprio sistema experimental utilizado.

Tabela 4.2: Planejamento para o estudo da secagem de polpa de papel.

| Codificação | -1,4 | -1 | 0 | +1 | +1,4 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| T _{ar} (°C) | 66 | 70 | 80 | 90 | 94 |
| v _{ar} (m/s) | 0,22 | 0,30 | 0,50 | 0,70 | 0,78 |

Foram realizados 14 ensaios de secagem, variando as condições operacionais de acordo com o planejamento definido na Tabela 4.2. Dentre esses ensaios, seis foram realizados no ponto central a fim de se melhor estimar o erro puro e de se estabilizar a variância das respostas obtidas.

A tabela 4.3 apresenta um resumo das condições experimentais dos ensaios de cinética realizados neste trabalho.

Tabela 4.3: Condições operacionais dos ensaios de secagem.

| Ensaio | T_{ar} (°C) | v_{ar} (m/s) | C_s (%) | t_{ensaio} (min) | UR_{amb} (%) | T_{amb} (°C) |
|--------|---------------|----------------|-----------|--------------------|----------------|----------------|
| 1 | 70 | 0,299 | 5,58 | 150 | 61,64 | 17,65 |
| 2 | 70 | 0,699 | 6,19 | 97 | 67,80 | 20,01 |
| 3 | 90 | 0,303 | 6,31 | 110 | 70,00 | 25,60 |
| 4 | 90 | 0,706 | 6,16 | 80 | 69,45 | 18,15 |
| 5 | 66 | 0,496 | 5,43 | 116 | 69,70 | 22,24 |
| 6 | 94 | 0,503 | 6,57 | 82 | 64,86 | 20,87 |
| 7 | 80 | 0,224 | 5,57 | 170 | 54,11 | 18,45 |
| 8 | 80 | 0,780 | 6,35 | 82 | 71,54 | 17,69 |
| 9 | 80 | 0,496 | 5,48 | 88,5 | 69,40 | 21,40 |
| 10 | 80 | 0,506 | 5,41 | 90 | 70,23 | 23,10 |
| 11 | 80 | 0,505 | 5,42 | 90 | 67,50 | 21,67 |
| 12 | 80 | 0,506 | 5,53 | 103 | 73,46 | 19,52 |
| 13 | 80 | 0,502 | 5,46 | 87 | 75,82 | 21,00 |
| 14 | 80 | 0,502 | 5,54 | 100 | 59,83 | 17,95 |

Os parâmetros do ar de entrada e saída do secador foram medidos através de termohigrômetros digitais localizados em pontos específicos no equipamento. O acompanhamento destes parâmetros para os ensaios 2 e 6 pode ser visualizado nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Pode-se verificar que a umidade relativa do ar na saída do secador ainda se mantém baixa, mesmo em condições onde a secagem se dá mais rapidamente. Isso significa que esse ar de saída pode ainda ser aproveitado para secar outras folhas de papel ou ser parcialmente recirculado.

Nos ensaios realizados não foi necessária a utilização do leito de sílica, pois como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4, a umidade relativa do ar na entrada do secador já era baixa em função apenas do aquecimento do ar. No entanto, em dias mais úmidos e para baixos valores de temperatura de entrada do ar, recomenda-se a utilização do leito sílica.

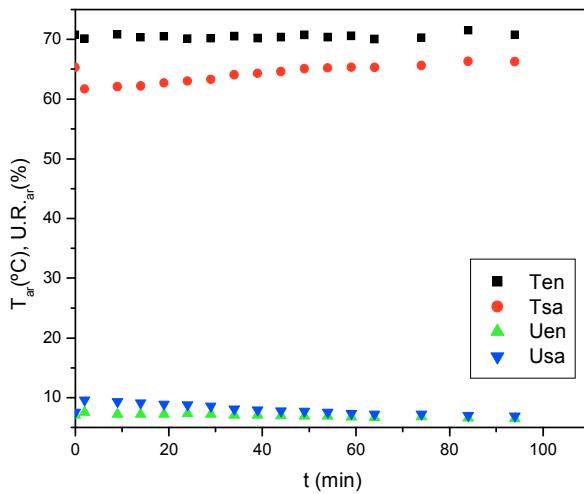


Figura 4.3: Parâmetros do ar de entrada e saída para o ensaio 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$).

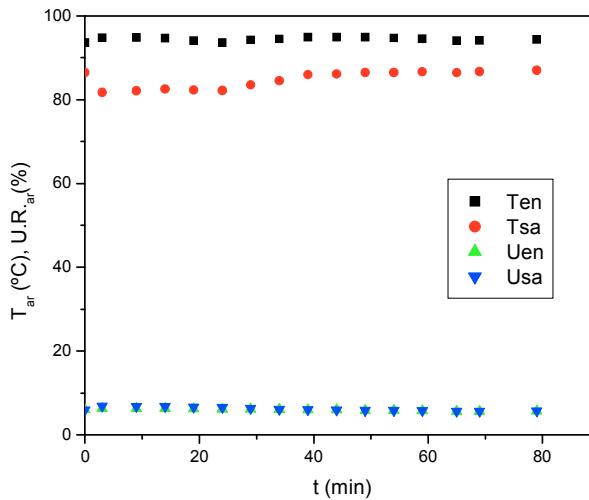


Figura 4.4: Parâmetros do ar de entrada e saída para o ensaio 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$).

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, as curvas de temperatura das telas (medidas por termopares fixos acoplados paralelamente às telas) durante a secagem da polpa para os ensaios 2 e 6. Inicialmente, os termopares indicam a temperatura do ar de entrada. Em seguida, inicia-se a secagem inserindo-se as telas com a polpa. Logo após, a temperatura da tela aumenta assintoticamente tendendo à temperatura do ar. Verifica-se a partir destas Figuras que, embora haja um retificador de fluxo com tubos paralelos de pequeno diâmetro para uma melhor distribuição de ar antes da entrada do secador e o

mesmo seja completamente simétrico, o ar de entrada não está sendo igualmente distribuído por todas as telas. Isto ocorre em virtude da falta de espaço no local de trabalho para se aumentar a tubulação do sistema, de forma que o escoamento de ar esteja plenamente desenvolvido antes de entrar no secador. De acordo com o diâmetro da tubulação utilizada, seria necessário um comprimento de 2,15m de tubulação, o que é inviável no laboratório. Além disso, o grande número de cotovelos acarreta em uma grande perda de carga no sistema. Estes problemas devem ser solucionados quando o secador for construído em escala real em um local com espaço suficiente.

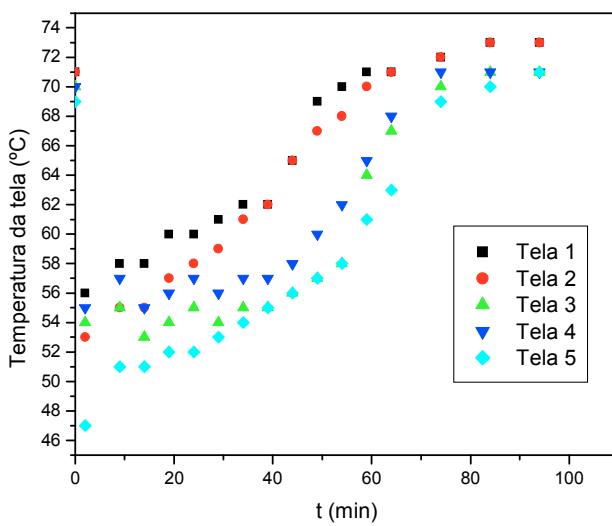


Figura 4.5: Curva de temperatura da tela em função do tempo de secagem para o ensaio 2

$$(T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}, v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}).$$

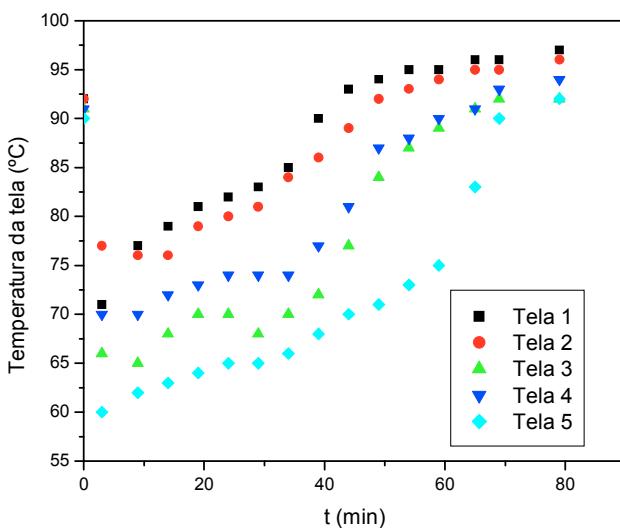


Figura 4.6: Curva de temperatura da tela em função do tempo de secagem para o ensaio 6

$$(T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}, v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}).$$

Neste trabalho, apenas a temperatura das telas foi medida durante a secagem, pois para se medir a temperatura da polpa de papel dentro das telas, os ensaios seriam destrutivos. Como a polpa estava em contato com a tela durante a secagem, infere-se que a evolução da temperatura do material durante a secagem esteja próxima (ou um pouco abaixo) da temperatura da tela ao longo do ensaio. Pelas Figuras 4.5 e 4.6, observa-se que a temperatura da tela em alguns casos ultrapassa a temperatura do ar de secagem. Entretanto, essa interpretação inadequada dos resultados está associada aos erros de medida, isto é, a um desvio inerente ao próprio equipamento utilizado para a medição deste parâmetro. Ainda, uma diferença de até $\pm 2^{\circ}\text{C}$ na calibração entre os termohigrômetros e os termopares é aceitável sob o ponto de vista experimental.

As curvas de cinética de secagem para os ensaios 2 e 6 estão apresentadas nas Figuras 4.7 e 4.8. Todos os ensaios apresentaram comportamentos semelhantes quanto à cinética. As demais curvas de temperatura da tela, evolução dos parâmetros do ar durante a secagem, bem como as curvas de secagem e taxa de secagem encontram-se no Anexo A. Observa-se nestas figuras que a influência da posição das telas é mais pronunciada no ensaio 6 que no ensaio 2, no qual a diferença de temperatura entre as telas no início de experimento é maior.

As curvas de secagem indicam uma fase inicial bastante curta. Em geral ocorre nos primeiros cinco minutos de secagem, sendo seguida de uma fase de secagem à taxa constante que é predominante no processo. Finalmente, uma pequena fase de secagem à taxa decrescente pode ser verificada nos últimos quinze minutos do processo.

No período inicial, o calor fornecido pelo ar provoca uma elevação da temperatura do material que fora introduzido a uma temperatura inferior à do ar de secagem.

No período de secagem à taxa constante, o teor de umidade do produto é bem elevado e a água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água da superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do material for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície. O papel é um material poroso e durante a secagem de sua polpa, grande parte da umidade evaporada se dá na forma de água de superfície, conforme pode ser verificado nas curvas de secagem.

No período de taxa decrescente, a troca de calor não é mais compensada. Conseqüentemente, a temperatura do material aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. O fator limitante é a migração interna da água. Neste período o processo de secagem é mais lento, pois a água encontra cada vez maior dificuldade para passar através da superfície seca.

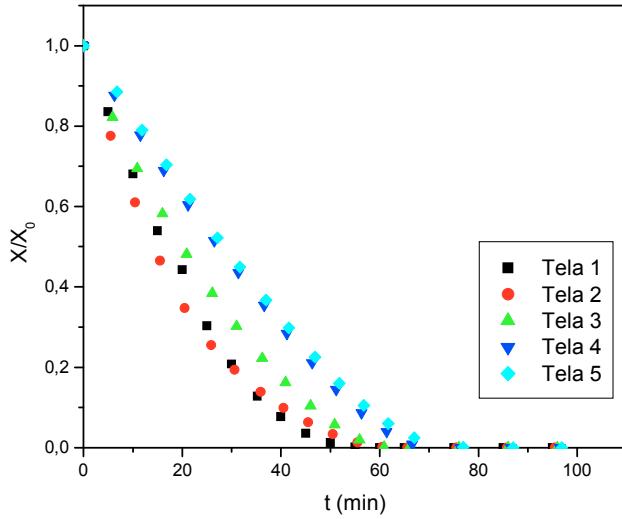


Figura 4.7: Curva de secagem convectiva para ensaio 2 ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,7 \text{ m/s}$).

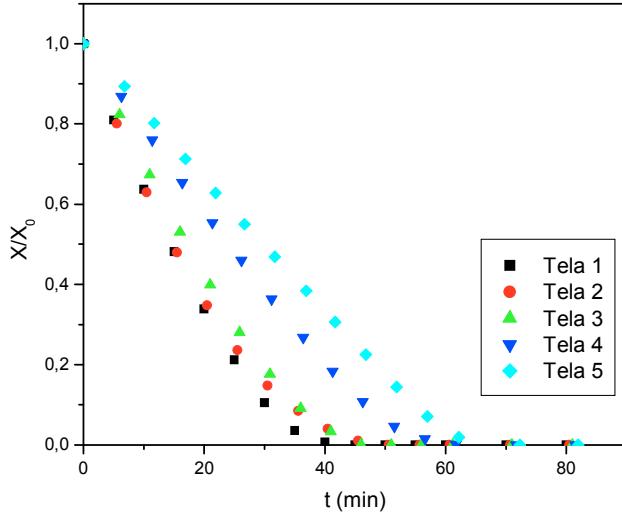


Figura 4.8: Curva de secagem convectiva para ensaio 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$).

O efeito da temperatura do ar no processo de secagem pode se visualizado nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 que apresentam, respectivamente, as curvas de temperatura, de

secagem e de taxa de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 5, 6 e 9, sendo estes ensaios realizados a uma velocidade do ar de 0,5 m/s. Este efeito está relacionado principalmente ao transporte interno de umidade no papel, através do mecanismo de difusão.

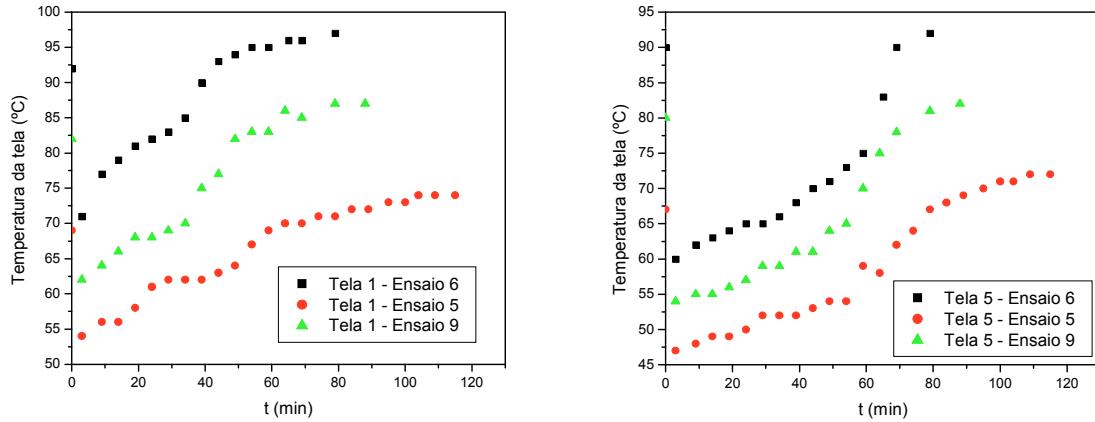


Figura 4.9: Curva de temperatura das telas 1 e 5 em função do tempo de secagem para os ensaios 5 ($T_{ar} = 66^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5\text{m/s}$), 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$).

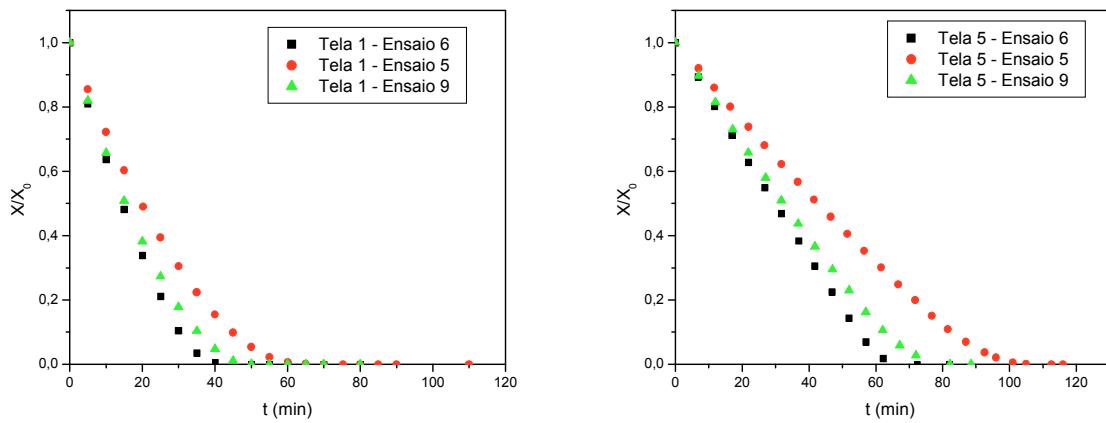


Figura 4.10: Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 5 ($T_{ar} = 66^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$), 6 ($T_{ar} = 94^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$).

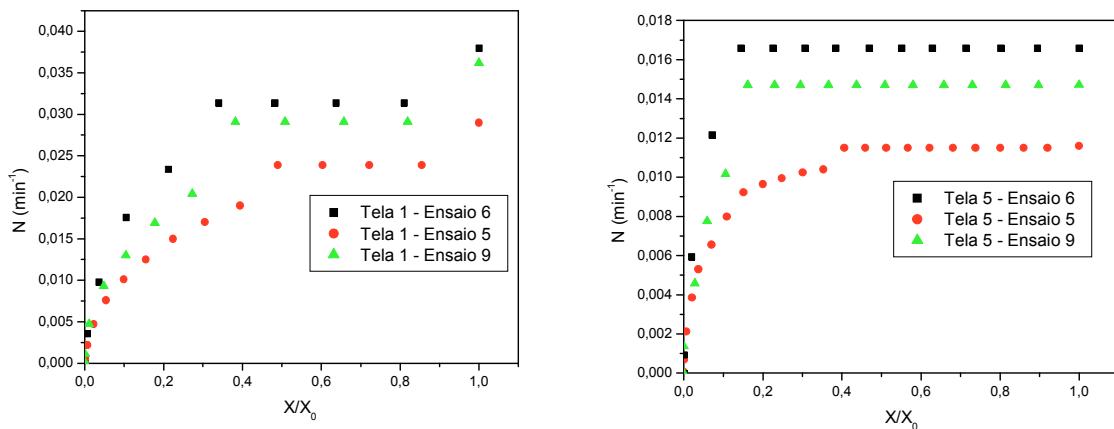


Figura 4.11: Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 5 ($T_{\text{ar}} = 66^\circ\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,5 \text{ m/s}$), 6 ($T_{\text{ar}} = 94^\circ\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,5 \text{ m/s}$) e 9 ($T_{\text{ar}} = 80^\circ\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,5 \text{ m/s}$).

Verifica-se a partir das Figuras 4.9 a 4.11 que a influência da temperatura é mais pronunciada para a tela 5. Isto se deve ao fato de a secagem ser bem mais lenta nesta posição. A temperatura apresenta influência tanto na região de secagem à taxa constante, quanto na região de secagem à taxa decrescente, na qual a umidade migra por difusão até a superfície do sólido.

O efeito da velocidade do ar no processo de secagem pode ser visualizado nas Figuras 4.12 e 4.13, para os ensaios 1 e 2 , e Figuras 4.14 a 4.15, para os ensaios 3 e 4, correspondente as telas 1 e 5.

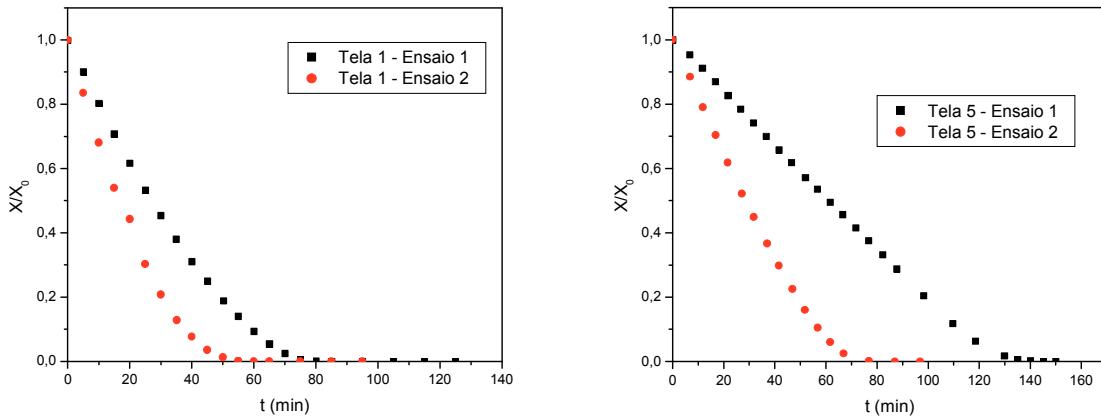


Figura 4.12: Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 1 ($T_{\text{ar}} = 70^\circ\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,3 \text{ m/s}$) e 2 ($T_{\text{ar}} = 70^\circ\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,7 \text{ m/s}$).

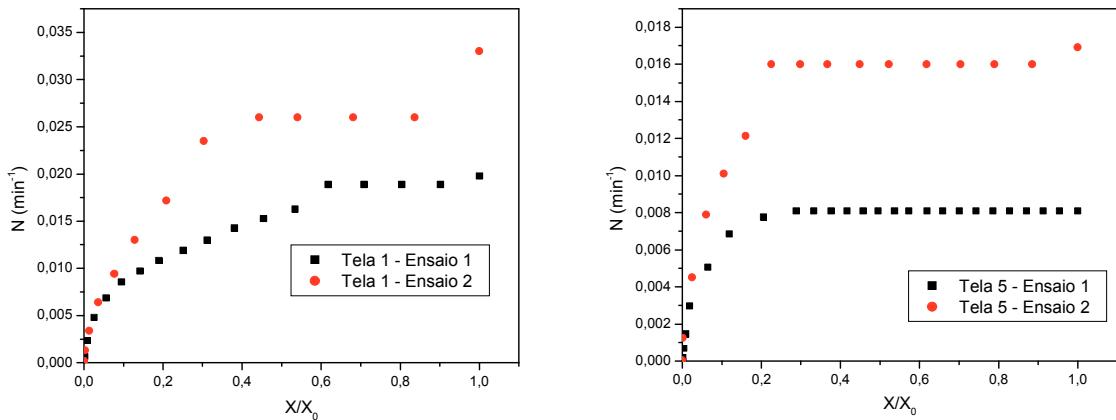


Figura 4.13: Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 1 ($T_{\text{ar}} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,3 \text{ m/s}$) e 2 ($T_{\text{ar}} = 70^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,7 \text{ m/s}$).

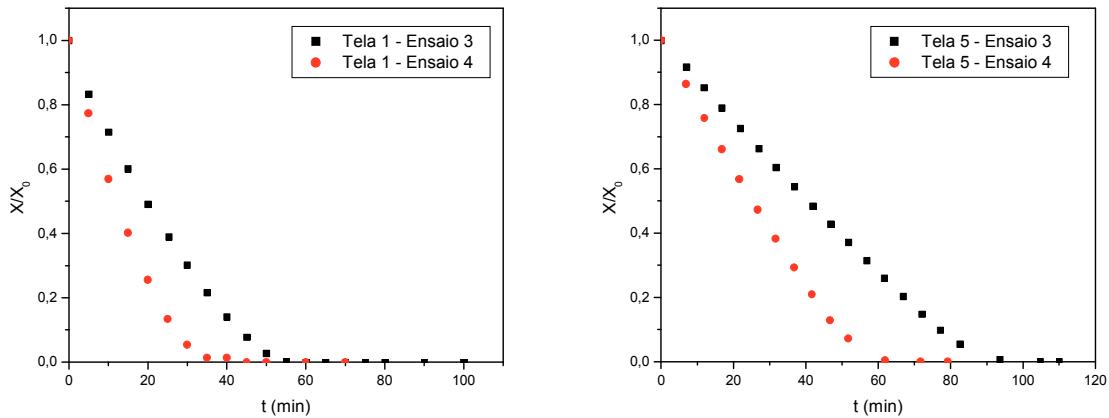


Figura 4.14: Curva de secagem convectiva em função do tempo de secagem das telas 1 e 5 para os ensaios 3 ($T_{\text{ar}} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,3 \text{ m/s}$) e 4 ($T_{\text{ar}} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,7 \text{ m/s}$).

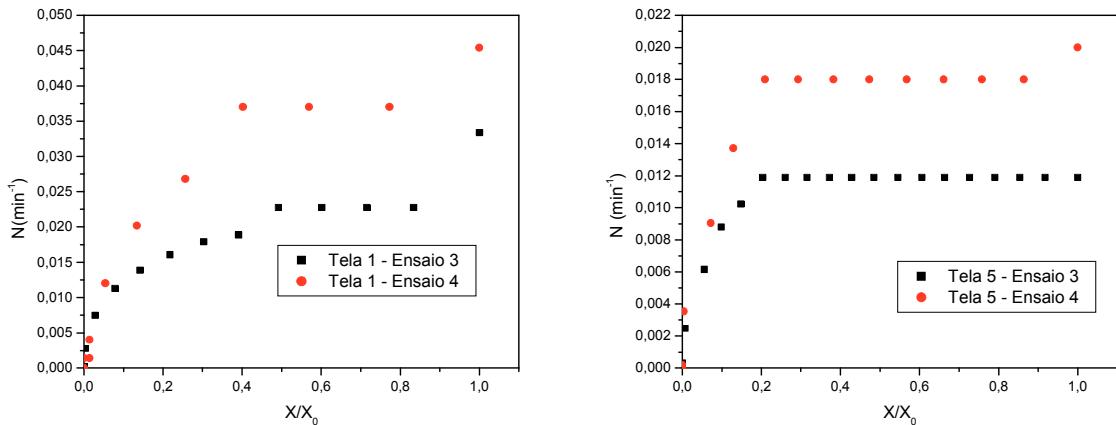


Figura 4.15: Curva de taxa de secagem das telas 1 e 5 em função do teor de umidade para os ensaios 3 ($T_{\text{ar}} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,3 \text{ m/s}$) e 4 ($T_{\text{ar}} = 90^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{ar}} = 0,7 \text{ m/s}$).

De forma similar, verifica-se a partir das Figuras 4.12 a 4.15 que o efeito da velocidade do ar na cinética de secagem é também mais pronunciado para a tela 5. Pode-se notar que a variação da velocidade do ar levou a um aumento das taxas de secagem, basicamente na região do período de taxa constante, onde a influência das condições do ar de secagem nas transferências convectivas é predominante. Já na região de taxa decrescente, no qual predominam as resistências internas à migração da umidade, esse efeito é minimizado. Sabe-se da teoria que no período de taxa decrescente, também conhecida como fase difusional, é a temperatura do ar o parâmetro principal que rege o fenômeno de transferência da umidade interna até a superfície do material. Portanto, a influência da velocidade do ar é reduzida (Strumillo e Kudra, 1986; Keey, 1992).

De acordo com Luikov (1968), os materiais úmidos podem ser classificados baseados no perfil das curvas de taxa de secagem do material, mais especificamente, no período de taxa decrescente. A partir das Figuras 4.11, 4.13 e 4.15, podemos classificá-lo como um material capilar-poroso, com uma grande área superficial de evaporação. Este tipo de material, quando submetido à secagem, torna-se quebradiço, sofre um pequeno encolhimento e pode ser facilmente moído. Além disso, ele também pode ser considerado como não higroscópico.

Para o ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem são usados o modelo empírico de Page, representado na Equação 2.17, e o modelo **similar** à solução do modelo de difusão de Fick (modificado por Henderson e Pabis, Midilli (2002)), representado pela Equação 2.16. O modelo baseado na solução analítica de Crank para a placa plana (1975) (Equação 2.11), representou adequadamente os dados experimentais, uma vez que para aplicá-lo é necessário que algumas condições sejam atendidas, tais como a uniformidade da umidade presente no produto, homogeneidade do produto e finalmente, as dimensões do material devem permanecer constantes ao longo do tempo. Isto não ocorre com o papel, pois uma vez que as folhas se encontram penduradas verticalmente durante a secagem, verifica-se uma não uniformidade da umidade presente no papel. Ainda, sendo o papel um material capilar-poroso, ele sofre encolhimento de suas dimensões durante a secagem. As telas fixaram a largura e o comprimento das folhas, mas a espessura foi drasticamente reduzida após a secagem (cerca de 40%).

No ajuste obtido utilizando uma equação **similar** à solução de Crank (1975) para a placa plana a partir da 2º Lei de Fick, obteve-se valores acima da unidade para o parâmetro a da eq.(2.16) para todas as telas e em todos os ensaios realizados. Utilizando-se apenas o primeiro termo da série para a placa plana, a eq. 2.11 iguala-se à eq. 2.16. Porém, o parâmetro a seria igual $8/\pi^2 = 0,81$. Portanto, pela falta de ajuste dos dados a partir da solução analítica de Crank (1975), que nas suas condições iniciais, assume hipóteses explicitadas acima, optou-se pela não determinação da difusividade efetiva.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores das constantes e dos coeficientes de correlação, obtidos nos ajustes linear e não linear, pelo modelo de Page, para a razão X/X_0 da folha de papel com o tempo, nos períodos de secagem à taxa constante e decrescente, para as cinco telas analisadas. Neste estudo, o termo adimensional do teor de umidade $\left[\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})}\right]$ foi reduzido ao termo $(\frac{X}{X_0})$, pois o teor de umidade de equilíbrio para o material estudado é muito próximo de zero, conforme verificado em trabalhos anteriores (MOTA LIMA *et al*, 2004), bem como nos resultados apresentados a seguir no item 4.3, onde foram determinadas isotermas de dessorção para o papel reciclado seco em diferentes condições operacionais.

Tabela 4.4: Ajuste de (X/X_0) em função do tempo, utilizando as equações da reta, para o período de secagem à taxa constante, e de Page, para os períodos de taxa constante e decrescente, respectivamente, para as cinco telas.

| Ensaio | Tela | $\frac{X}{X_0} = a + bt$ | | | $\frac{X}{X_0} = C \exp(-kt^n)$ | | | R^2 |
|--------|------|--------------------------|---------|--------|---------------------------------|--------|--------|--------|
| | | a | b | R^2 | C | k | n | |
| 1 | 1 | 0,9940 | -0,0189 | 0,9999 | 0,9610 | 0,0045 | 1,5185 | 0,9980 |
| | 2 | 0,9830 | -0,0168 | 0,9992 | 0,9685 | 0,0064 | 1,3710 | 0,9985 |
| | 3 | 0,9940 | -0,0156 | 0,9996 | 0,9610 | 0,0032 | 1,5399 | 0,9981 |
| | 4 | 0,9978 | -0,0119 | 0,9995 | 0,9576 | 0,0014 | 1,6575 | 0,9978 |
| | 5 | 1,0039 | -0,0082 | 0,9999 | 0,9687 | 0,0007 | 1,6783 | 0,9953 |
| 2 | 1 | 0,9550 | -0,0264 | 0,9950 | 0,9737 | 0,0116 | 1,4445 | 0,9938 |
| | 2 | 0,9218 | -0,0286 | 0,9972 | 0,9915 | 0,0305 | 1,1742 | 0,9993 |
| | 3 | 0,9252 | -0,0206 | 0,9974 | 0,9672 | 0,0104 | 1,3970 | 0,9974 |
| | 4 | 0,9717 | -0,0169 | 0,9993 | 0,9551 | 0,0030 | 1,6309 | 0,9968 |
| | 5 | 0,9832 | -0,0165 | 0,9989 | 0,9616 | 0,0028 | 1,6406 | 0,9977 |

| | | | | | | | | |
|----|---|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3 | 1 | 0,9450 | -0,0228 | 0,9999 | 0,9542 | 0,0079 | 1,4901 | 0,9997 |
| | 2 | 0,9812 | -0,0218 | 0,9994 | 0,9711 | 0,0083 | 1,4095 | 0,9985 |
| | 3 | 0,9785 | -0,0171 | 0,9989 | 0,9608 | 0,0039 | 1,5502 | 0,9977 |
| | 4 | 0,9885 | -0,0146 | 0,9996 | 0,9538 | 0,0019 | 1,6761 | 0,9971 |
| | 5 | 0,9888 | -0,0119 | 0,9997 | 0,9496 | 0,0012 | 1,7190 | 0,9964 |
| 4 | 1 | 0,9523 | -0,0371 | 0,9984 | 0,9844 | 0,0211 | 1,4098 | 0,9986 |
| | 2 | 0,9306 | -0,0303 | 0,9975 | 0,9841 | 0,0202 | 1,3479 | 0,9986 |
| | 3 | 0,9468 | -0,0313 | 0,9982 | 0,9824 | 0,0146 | 1,4676 | 0,9984 |
| | 4 | 0,9938 | -0,0255 | 0,9990 | 0,9732 | 0,0048 | 1,6873 | 0,9980 |
| | 5 | 0,9820 | -0,0188 | 0,9994 | 0,9640 | 0,0034 | 1,6481 | 0,9972 |
| 5 | 1 | 0,9679 | -0,0239 | 0,9989 | 0,9681 | 0,0094 | 1,4349 | 0,9983 |
| | 2 | 0,9611 | -0,0218 | 0,9989 | 0,9741 | 0,0127 | 1,2933 | 0,9984 |
| | 3 | 0,9612 | -0,0176 | 0,9988 | 0,9577 | 0,0054 | 1,4727 | 0,9974 |
| | 4 | 0,9882 | -0,0154 | 0,9994 | 0,9545 | 0,0025 | 1,6217 | 0,9971 |
| | 5 | 0,9923 | -0,0115 | 0,9997 | 0,9490 | 0,0011 | 1,7127 | 0,9962 |
| 6 | 1 | 0,9590 | -0,0314 | 0,9991 | 0,9740 | 0,0121 | 1,5187 | 0,9981 |
| | 2 | 0,9571 | -0,0302 | 0,9983 | 0,9832 | 0,0158 | 1,4034 | 0,9989 |
| | 3 | 0,9775 | -0,0273 | 0,9991 | 0,9740 | 0,0075 | 1,5906 | 0,9982 |
| | 4 | 0,9812 | -0,0196 | 0,9994 | 0,9584 | 0,0030 | 1,7054 | 0,9971 |
| | 5 | 0,9955 | -0,0165 | 0,9998 | 0,9555 | 0,0017 | 1,7695 | 0,9951 |
| 7 | 1 | 0,9896 | -0,0161 | 0,9992 | 0,9589 | 0,0031 | 1,5700 | 0,9978 |
| | 2 | 0,9810 | -0,0144 | 0,9982 | 0,9697 | 0,0047 | 1,4143 | 0,9986 |
| | 3 | 0,9835 | -0,0127 | 0,9990 | 0,9549 | 0,0020 | 1,5942 | 0,9974 |
| | 4 | 0,9876 | -0,0100 | 0,9991 | 0,9596 | 0,0012 | 1,6490 | 0,9971 |
| | 5 | 0,9988 | -0,0078 | 0,9999 | 0,9654 | 0,0007 | 1,6700 | 0,9953 |
| 8 | 1 | 0,9647 | -0,0360 | 0,9991 | 0,9814 | 0,0175 | 1,4452 | 0,9986 |
| | 2 | 0,9120 | -0,0291 | 0,9964 | 0,9855 | 0,0251 | 1,2662 | 0,9986 |
| | 3 | 0,9399 | -0,0282 | 0,9971 | 0,9801 | 0,0125 | 1,4824 | 0,9983 |
| | 4 | 0,9764 | -0,0229 | 0,9992 | 0,9679 | 0,0052 | 1,6179 | 0,9977 |
| | 5 | 0,9766 | -0,0180 | 0,9993 | 0,9582 | 0,0029 | 1,6702 | 0,9970 |
| 9 | 1 | 0,9565 | -0,0292 | 0,9985 | 0,9769 | 0,0144 | 1,4144 | 0,9984 |
| | 2 | 0,9336 | -0,0236 | 0,9970 | 0,9764 | 0,0144 | 1,3387 | 0,9982 |
| | 3 | 0,9607 | -0,0235 | 0,9947 | 0,9752 | 0,0094 | 1,4522 | 0,9976 |
| | 4 | 0,9809 | -0,0202 | 0,9990 | 0,9656 | 0,0041 | 1,6253 | 0,9978 |
| | 5 | 0,9837 | -0,0146 | 0,9993 | 0,9550 | 0,0018 | 1,7028 | 0,9966 |
| 10 | 1 | 0,9720 | -0,0289 | 0,9989 | 0,9797 | 0,0135 | 1,4148 | 0,9989 |
| | 2 | 0,9467 | -0,0243 | 0,9989 | 0,9754 | 0,0146 | 1,3191 | 0,9983 |
| | 3 | 0,9499 | -0,0233 | 0,9973 | 0,9739 | 0,0089 | 1,4842 | 0,9982 |
| | 4 | 0,9771 | -0,0198 | 0,9996 | 0,9563 | 0,0036 | 1,6458 | 0,9971 |
| | 5 | 0,9935 | -0,0154 | 0,9996 | 0,9526 | 0,0017 | 1,7198 | 0,9961 |
| 11 | 1 | 0,9790 | -0,0269 | 0,9990 | 0,9712 | 0,0090 | 1,5070 | 0,9982 |
| | 2 | 0,9132 | -0,0273 | 0,9970 | 0,9862 | 0,0170 | 1,3514 | 0,9994 |
| | 3 | 0,9541 | -0,0209 | 0,9994 | 0,9600 | 0,0068 | 1,4933 | 0,9969 |
| | 4 | 0,9836 | -0,0194 | 0,9996 | 0,9571 | 0,0034 | 1,6520 | 0,9969 |
| | 5 | 0,9973 | -0,0148 | 0,9997 | 0,9499 | 0,0013 | 1,7841 | 0,9957 |
| 12 | 1 | 0,9800 | -0,0288 | 0,9988 | 0,9802 | 0,0126 | 1,4257 | 0,9989 |

| | | | | | | | | |
|----|---|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2 | 0,9563 | -0,0241 | 0,9979 | 0,9778 | 0,0145 | 1,3078 | 0,9986 |
| | 3 | 0,9422 | -0,0198 | 0,9981 | 0,9621 | 0,0088 | 1,3965 | 0,9969 |
| | 4 | 0,9799 | -0,0177 | 0,9990 | 0,9594 | 0,0035 | 1,5997 | 0,9969 |
| | 5 | 0,9771 | -0,0131 | 0,9993 | 0,9473 | 0,0018 | 1,6551 | 0,9959 |
| 13 | 1 | 0,9837 | -0,0295 | 0,9995 | 0,9767 | 0,0124 | 1,4223 | 0,9985 |
| | 2 | 0,9468 | -0,0252 | 0,9978 | 0,9773 | 0,0129 | 1,3954 | 0,9986 |
| | 3 | 0,9638 | -0,0234 | 0,9982 | 0,9769 | 0,0084 | 1,4917 | 0,9984 |
| | 4 | 0,9876 | -0,0199 | 0,9993 | 0,9599 | 0,0031 | 1,6920 | 0,9972 |
| | 5 | 0,9847 | -0,0150 | 0,9991 | 0,9543 | 0,0019 | 1,7047 | 0,9968 |
| 14 | 1 | 0,9740 | -0,0257 | 0,9991 | 0,9638 | 0,0127 | 1,4290 | 0,9979 |
| | 2 | 0,9707 | -0,0234 | 0,9987 | 0,9684 | 0,0089 | 1,4843 | 0,9985 |
| | 3 | 0,9679 | -0,0216 | 0,9988 | 0,9741 | 0,0108 | 1,3754 | 0,9975 |
| | 4 | 0,9799 | -0,0173 | 0,9993 | 0,9650 | 0,0068 | 1,4953 | 0,9969 |
| | 5 | 0,9939 | -0,0138 | 0,9994 | 0,9555 | 0,0030 | 1,6304 | 0,9966 |

Os parâmetros n e k obtidos a partir do ajuste do modelo de Page refletem, respectivamente, os efeitos das condições externas durante a secagem e a resistência interna à secagem. Conforme verificado para o ajuste dos dados da secagem de papel ao modelo de Page nas Figuras 4.16 e 4.17, o parâmetro k é influenciado positivamente tanto pela temperatura quanto pela velocidade do ar. Para o parâmetro n, apenas o efeito da velocidade apresenta influência significativa, efeito predominante na secagem de produtos que possuem uma grande quantidade de umidade superficial, como é o caso da polpa de papel.

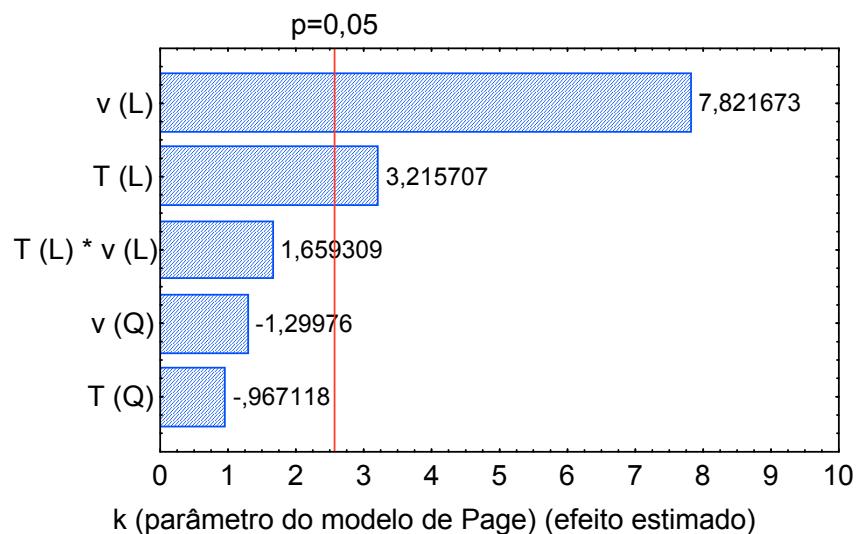


Figura 4.16: Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste do modelo de Page para a tela 1.

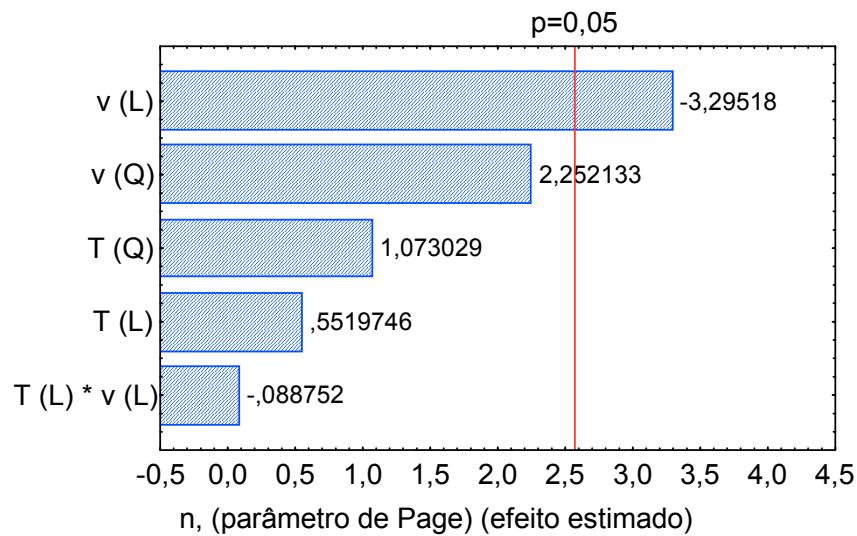


Figura 4.17: Diagrama de Pareto para o parâmetro n obtido pelo ajuste do modelo de Page para a tela 1.

Os modelos estatísticos codificados para os parâmetros n e k do modelo de Page para a tela 1 são representados, respectivamente, pelas Equações de 1^a ordem (4.1 e 4.2), considerando apenas os termos estatisticamente significativos.

$$k = 0,0115 + 0,0021 \cdot T + 0,0051 \cdot v \quad (4.1)$$

$$n = 1,4603 - 0,0414 \cdot v \quad (4.2)$$

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as curvas de cinética de secagem das telas 1 e 5 para o ensaio 8, podendo-se verificar o excelente ajuste do modelo não linear de Page aos pontos experimentais.

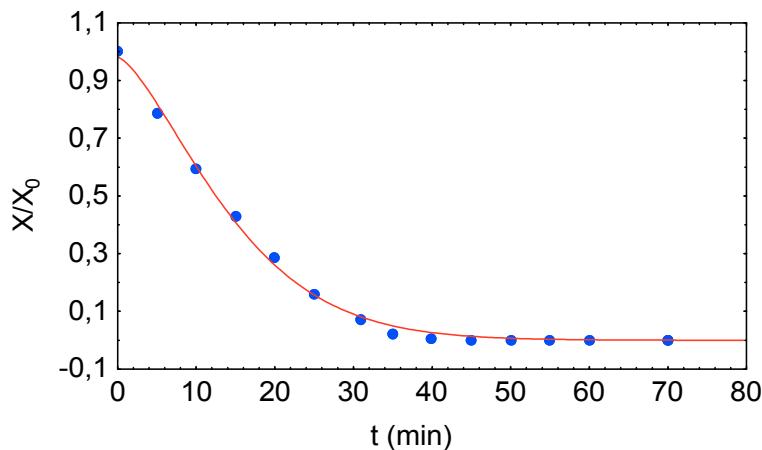


Figura 4.18: Ajuste do modelo não linear de Page à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar} = 80^\circ\text{C}$, $v_{ar} = 0,78 \text{ m/s}$) para a tela 1, $R^2 = 0,9986$.

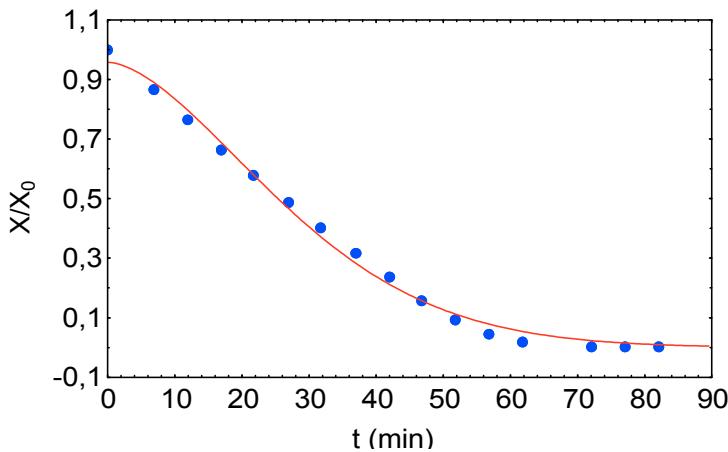


Figura 4.19: Ajuste do modelo não linear de Page à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,78 \text{ m/s}$) para a tela 5, $R^2 = 0,9970$.

Os valores das constantes a e K e dos coeficientes de correlação R^2 , obtidos no ajuste não linear pelo modelo similar à solução do modelo simplificado da difusão aplicado para a razão de X/X_0 da polpa de papel em função do tempo estão indicados na Tabela 4.5. Através dos coeficientes de correlação, verifica-se um excelente ajuste do modelo de Page e um ajuste adequado do modelo similar à solução da equação de Fick aos dados experimentais. Os desvios obtidos variaram em torno de 1,5%, sendo que o maior valor obtido foi de 2,15%.

Tabela 4.5: Ajuste de (X/X_0) em função do tempo, utilizando uma equação similar à solução do modelo de Fick (modificado por Henderson e Pabis) quando apenas o primeiro termo da série é significativo para as cinco telas.

| | | $\frac{X}{X_0} = a \cdot \exp(-K \cdot t)$ | | |
|--------|------|--|--------|--------|
| Ensaio | Tela | a | k | R^2 |
| 1 | 1 | 1,0715 | 0,0536 | 0,9907 |
| | 2 | 1,0547 | 0,0440 | 0,9933 |
| | 3 | 1,0623 | 0,0389 | 0,9890 |
| | 4 | 1,0993 | 0,0348 | 0,9827 |
| | 5 | 1,0970 | 0,0255 | 0,9785 |
| 2 | 1 | 1,0683 | 0,0530 | 0,9898 |
| | 2 | 1,0320 | 0,0549 | 0,9973 |
| | 3 | 1,0618 | 0,0436 | 0,9894 |
| | 4 | 1,0964 | 0,0340 | 0,9807 |
| | 5 | 1,1057 | 0,0327 | 0,9806 |
| 3 | 1 | 1,0657 | 0,0460 | 0,9874 |

| | | | | |
|----|---|--------|--------|--------|
| | 2 | 1,0737 | 0,0387 | 0,9905 |
| | 3 | 1,0946 | 0,0332 | 0,9842 |
| | 4 | 1,1096 | 0,0285 | 0,9787 |
| | 5 | 1,1135 | 0,0232 | 0,9757 |
| 4 | 1 | 1,0547 | 0,0732 | 0,9908 |
| | 2 | 1,0509 | 0,0620 | 0,9919 |
| | 3 | 1,0636 | 0,0644 | 0,9878 |
| | 4 | 1,0981 | 0,0501 | 0,9784 |
| | 5 | 1,0980 | 0,0368 | 0,9788 |
| 5 | 1 | 1,0706 | 0,0451 | 0,9900 |
| | 2 | 1,0535 | 0,0385 | 0,9935 |
| | 3 | 1,0789 | 0,0341 | 0,9871 |
| | 4 | 1,1048 | 0,0296 | 0,9809 |
| | 5 | 1,1235 | 0,0227 | 0,9750 |
| 6 | 1 | 1,0701 | 0,0638 | 0,9873 |
| | 2 | 1,0633 | 0,0592 | 0,9908 |
| | 3 | 1,0866 | 0,0546 | 0,9838 |
| | 4 | 1,1032 | 0,0396 | 0,9776 |
| | 5 | 1,1123 | 0,0322 | 0,9721 |
| 7 | 1 | 1,1003 | 0,0306 | 0,9848 |
| | 2 | 1,0841 | 0,0264 | 0,9900 |
| | 3 | 1,1052 | 0,0248 | 0,9827 |
| | 4 | 1,1174 | 0,0198 | 0,9786 |
| | 5 | 1,1208 | 0,0149 | 0,9725 |
| 8 | 1 | 1,0612 | 0,0696 | 0,9897 |
| | 2 | 1,0414 | 0,0601 | 0,9942 |
| | 3 | 1,0701 | 0,0601 | 0,9872 |
| | 4 | 1,0930 | 0,0459 | 0,9807 |
| | 5 | 1,1037 | 0,0364 | 0,9785 |
| 9 | 1 | 1,0638 | 0,0573 | 0,9903 |
| | 2 | 1,0565 | 0,0476 | 0,9916 |
| | 3 | 1,0789 | 0,0467 | 0,9871 |
| | 4 | 1,1016 | 0,0405 | 0,9808 |
| | 5 | 1,1113 | 0,0291 | 0,9760 |
| 10 | 1 | 1,0683 | 0,0547 | 0,9908 |
| | 2 | 1,0541 | 0,0459 | 0,9925 |
| | 3 | 1,0804 | 0,0487 | 0,9872 |
| | 4 | 1,1002 | 0,0398 | 0,9804 |
| | 5 | 1,1158 | 0,0300 | 0,9751 |
| 11 | 1 | 1,0781 | 0,0513 | 0,9872 |
| | 2 | 1,0610 | 0,0554 | 0,9927 |
| | 3 | 1,0745 | 0,0417 | 0,9854 |
| | 4 | 1,0999 | 0,0382 | 0,9793 |
| | 5 | 1,1208 | 0,0291 | 0,9722 |
| 12 | 1 | 1,0715 | 0,0536 | 0,9907 |
| | 2 | 1,0547 | 0,0440 | 0,9933 |

| | | | | |
|----|---|--------|--------|--------|
| | 3 | 1,0623 | 0,0389 | 0,9890 |
| | 4 | 1,0993 | 0,0348 | 0,9827 |
| | 5 | 1,0970 | 0,0255 | 0,9785 |
| 13 | 1 | 1,0715 | 0,0536 | 0,9907 |
| | 2 | 1,0547 | 0,0440 | 0,9933 |
| | 3 | 1,0623 | 0,0389 | 0,9890 |
| | 4 | 1,0993 | 0,0348 | 0,9827 |
| | 5 | 1,0970 | 0,0255 | 0,9785 |
| 14 | 1 | 1,0750 | 0,0487 | 0,9877 |
| | 2 | 1,0656 | 0,0425 | 0,9909 |
| | 3 | 1,0800 | 0,0419 | 0,9861 |
| | 4 | 1,0982 | 0,0341 | 0,9801 |
| | 5 | 1,1155 | 0,0268 | 0,9764 |

De acordo com a Figura 4.20, o parâmetro K obtido pelo ajuste do modelo similar à solução da equação de Fick é influenciado positivamente por ambos os fatores individualmente e por interação destes. Analogamente à solução do modelo de Fick, poderíamos admitir que o parâmetro K representaria o termo correspondente na Equação do modelo de Fick que incorpora o coeficiente de difusividade efetiva. No ajuste dos dados a partir do modelo similar ao de Fick, verificou-se que o parâmetro K é influenciado pelos efeitos combinados e individuais da temperatura e da velocidade do ar, sendo o efeito do último mais pronunciado.

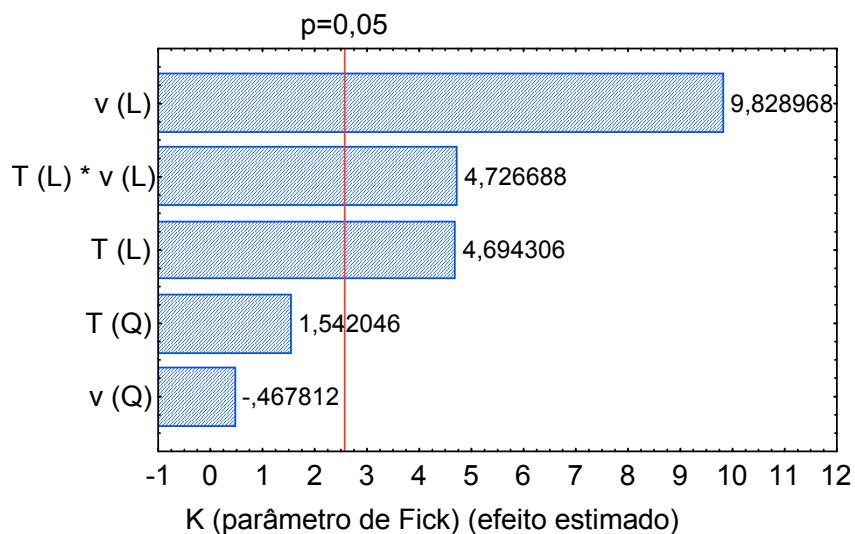


Figura 4.20: Diagrama de Pareto para o parâmetro K obtido pelo ajuste do modelo similar à solução da equação de Fick (modificado por Henderson e Pabis) para a tela 1.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam as curvas de cinética de secagem da tela 2 para os ensaios 8 e 12, podendo-se verificar o excelente ajuste do modelo não linear ao período de taxa constante e um ajuste adequado ao período de taxa decrescente. Os desvios obtidos variaram em torno de 4,3%, sendo que o maior valor obtido foi de 5,31%.

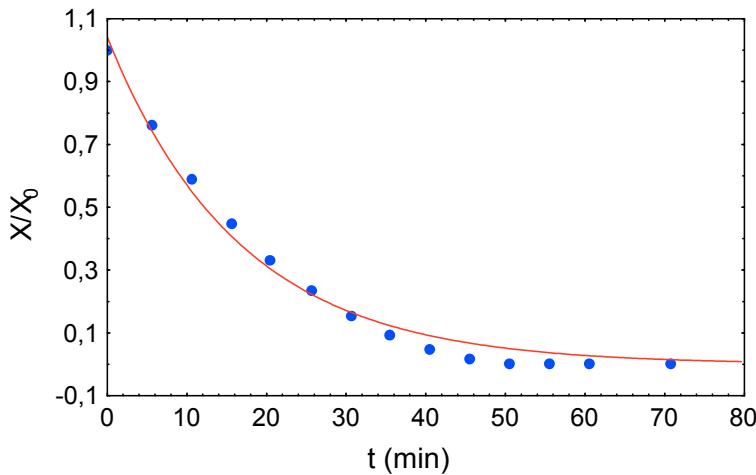


Figura 4.21: Ajuste do modelo não linear similar à solução de Fick (modificado por Henderson e Pabis) à curva de secagem do ensaio 8 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,78 \text{ m/s}$) para a tela 2, $R^2 = 0,9942$.

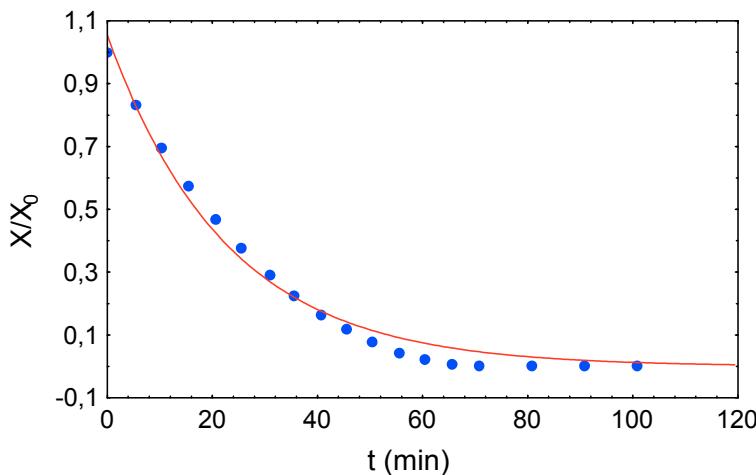


Figura 4.22: Ajuste do modelo não linear similar à solução de Fick à curva de secagem do ensaio 12 ($T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $v_{ar} = 0,5 \text{ m/s}$) para a tela 2, $R^2 = 0,9933$.

A análise dos resultados obtidos para a taxa de secagem na fase inicial (N_i), a taxa de secagem na fase constante (N_C) e o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial, após fixado o tempo de secagem ($\frac{X_f}{X_0}$), foi realizada através de métodos estatísticos, utilizando o programa STATISTICA® versão 5.5, de acordo com o planejamento composto central.

O tempo de secagem fixado foi estabelecido como o menor tempo de secagem no qual a folha fora completamente seca dentre as condições estudadas, variando também conforme a posição da tela no secador. Em função deste tempo, determinou-se o teor de umidade final. A Tabela 4.6 apresenta o tempo fixado estabelecido para cada tela.

Tabela 4.6: Tempo fixado de secagem.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|------|------|----|------|------|
| t_{fixo} (min) | 45,5 | 50,5 | 51 | 61,3 | 71,7 |

As matrizes estatísticas do planejamento central são mostradas nas Tabelas 4.7 a 4.11, com as variáveis independentes codificadas e suas respectivas respostas, para as cinco telas. Em relação à resposta R_3 , verifica-se uma falta de reproduzibilidade dos valores obtidos no ponto central. Isto se deve à influência de alguns parâmetros que não são controlados em cada experimento, tais como a umidade ambiente, concentração de sólidos da polpa e teor de umidade inicial do papel em cada tela. Entretanto, o desvio padrão encontrado não compromete a análise desta resposta, pois foi possível verificar o efeito das variáveis operacionais nas demais condições estudadas. As curvas de cinética com os ensaios de reproduzibilidade no ponto central para as cinco telas encontram-se no Anexo A.

Tabela 4.7: Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 1.

| Ensaio | T_{ar} (°C) | v_{ar} (m/s) | N_i (min ⁻¹) | N_c (min ⁻¹) | X_f/X_0 |
|--------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| | (X ₁) | (X ₂) | (R ₁) | (R ₂) | (R ₃) |
| 1 | -1 | -1 | 0,0198 | 0,0189 | 0,2500 |
| 2 | -1 | 1 | 0,0330 | 0,0260 | 0,0360 |
| 3 | 1 | -1 | 0,0334 | 0,0228 | 0,0780 |
| 4 | 1 | 1 | 0,0450 | 0,0370 | 0,0000 |
| 5 | -1,4 | 0 | 0,0290 | 0,0239 | 0,0990 |
| 6 | 1,4 | 0 | 0,0380 | 0,0314 | 0,0000 |
| 7 | 0 | -1,4 | 0,0164 | 0,0161 | 0,3060 |
| 8 | 0 | 1,4 | 0,0420 | 0,0360 | 0,0003 |
| 9 (C) | 0 | 0 | 0,0362 | 0,0291 | 0,0110 |
| 10 (C) | 0 | 0 | 0,0330 | 0,0289 | 0,0310 |
| 11 (C) | 0 | 0 | 0,0298 | 0,0269 | 0,0340 |
| 12 (C) | 0 | 0 | 0,0312 | 0,0289 | 0,0330 |
| 13 (C) | 0 | 0 | 0,0296 | 0,0257 | 0,0540 |
| 14 (C) | 0 | 0 | 0,0322 | 0,0295 | 0,0360 |

Tabela 4.8: Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 2.

| Ensaio | T_{ar} (°C) | v_{ar} (m/s) | N_i (min ⁻¹) | N_c (min ⁻¹) | X_f/X_0 |
|--------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| | (X ₁) | (X ₂) | (R ₁) | (R ₂) | (R ₃) |
| 1 | -1 | -1 | 0,0187 | 0,0168 | 0,2570 |
| 2 | -1 | 1 | 0,0410 | 0,0280 | 0,0340 |
| 3 | 1 | -1 | 0,0244 | 0,0217 | 0,1170 |
| 4 | 1 | 1 | 0,0410 | 0,0300 | 0,0002 |
| 5 | -1,4 | 0 | 0,0280 | 0,0218 | 0,1350 |
| 6 | 1,4 | 0 | 0,0360 | 0,0302 | 0,0000 |
| 7 | 0 | -1,4 | 0,0150 | 0,0144 | 0,3050 |
| 8 | 0 | 1,4 | 0,0420 | 0,0290 | 0,0030 |
| 9 (C) | 0 | 0 | 0,0323 | 0,0237 | 0,0400 |
| 10 (C) | 0 | 0 | 0,0320 | 0,0243 | 0,0600 |
| 11 (C) | 0 | 0 | 0,0346 | 0,0272 | 0,0170 |
| 12 (C) | 0 | 0 | 0,0303 | 0,0241 | 0,0750 |
| 13 (C) | 0 | 0 | 0,0276 | 0,0252 | 0,0810 |
| 14 (C) | 0 | 0 | 0,0322 | 0,0281 | 0,0200 |

Tabela 4.9: Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 3.

| Ensaio | T _{ar} (°C) | v _{ar} (m/s) | N _i (min ⁻¹) | N _c (min ⁻¹) | X _f /X ₀ |
|--------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | (X ₁) | (X ₂) | (R ₁) | (R ₂) | (R ₃) |
| 1 | -1 | -1 | 0,0159 | 0,0156 | 0,2620 |
| 2 | -1 | 1 | 0,0300 | 0,0210 | 0,0570 |
| 3 | 1 | -1 | 0,0188 | 0,0171 | 0,1830 |
| 4 | 1 | 1 | 0,0380 | 0,0310 | 0,0010 |
| 5 | -1,4 | 0 | 0,0223 | 0,0176 | 0,1760 |
| 6 | 1,4 | 0 | 0,0295 | 0,0273 | 0,0001 |
| 7 | 0 | -1,4 | 0,0133 | 0,0126 | 0,3510 |
| 8 | 0 | 1,4 | 0,0350 | 0,0280 | 0,0004 |
| 9 (C) | 0 | 0 | 0,0271 | 0,0236 | 0,0230 |
| 10 (C) | 0 | 0 | 0,0280 | 0,0233 | 0,0120 |
| 11 (C) | 0 | 0 | 0,0275 | 0,0209 | 0,0650 |
| 12 (C) | 0 | 0 | 0,0275 | 0,0198 | 0,1090 |
| 13 (C) | 0 | 0 | 0,0255 | 0,0235 | 0,0650 |
| 14 (C) | 0 | 0 | 0,0255 | 0,0216 | 0,0230 |

Tabela 4.10: Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 4.

| Ensaio | T _{ar} (°C) | v _{ar} (m/s) | N _i (min ⁻¹) | N _c (min ⁻¹) | X _f /X ₀ |
|--------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | (X ₁) | (X ₂) | (R ₁) | (R ₂) | (R ₃) |
| 1 | -1 | -1 | 0,0120 | 0,0119 | 0,2790 |
| 2 | -1 | 1 | 0,0190 | 0,0170 | 0,0400 |
| 3 | 1 | -1 | 0,0150 | 0,0145 | 0,1450 |
| 4 | 1 | 1 | 0,0249 | 0,0250 | 0,0002 |
| 5 | -1,4 | 0 | 0,0160 | 0,0154 | 0,1380 |
| 6 | 1,4 | 0 | 0,0208 | 0,0196 | 0,0020 |
| 7 | 0 | -1,4 | 0,0102 | 0,0100 | 0,3670 |
| 8 | 0 | 1,4 | 0,0250 | 0,0230 | 0,0000 |
| 9 (C) | 0 | 0 | 0,0212 | 0,0202 | 0,0050 |
| 10 (C) | 0 | 0 | 0,0220 | 0,0198 | 0,0030 |
| 11 (C) | 0 | 0 | 0,0210 | 0,0194 | 0,0050 |
| 12 (C) | 0 | 0 | 0,0187 | 0,0178 | 0,0450 |
| 13 (C) | 0 | 0 | 0,0191 | 0,0173 | 0,0510 |
| 14 (C) | 0 | 0 | 0,0202 | 0,0198 | 0,0040 |

Tabela 4.11: Matriz das variáveis independentes e das respostas para os ensaios de cinética de secagem para a tela 5.

| Ensaio | T _{ar} (°C) | v _{ar} (m/s) | N _i (min ⁻¹) | N _c (min ⁻¹) | X _f /X ₀ |
|--------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | (X ₁) | (X ₂) | (R ₁) | (R ₂) | (R ₃) |
| 1 | -1 | -1 | 0,0079 | 0,0081 | 0,4160 |
| 2 | -1 | 1 | 0,0170 | 0,0160 | 0,0130 |
| 3 | 1 | -1 | 0,0119 | 0,0119 | 0,1480 |
| 4 | 1 | 1 | 0,0200 | 0,0180 | 0,0002 |
| 5 | -1,4 | 0 | 0,0116 | 0,0115 | 0,2000 |
| 6 | 1,4 | 0 | 0,0169 | 0,0166 | 0,0020 |
| 7 | 0 | -1,4 | 0,0078 | 0,0078 | 0,4390 |
| 8 | 0 | 1,4 | 0,0200 | 0,0180 | 0,0000 |
| 9 (C) | 0 | 0 | 0,0155 | 0,0147 | 0,0280 |
| 10 (C) | 0 | 0 | 0,0158 | 0,0153 | 0,0130 |
| 11 (C) | 0 | 0 | 0,0149 | 0,0148 | 0,0100 |
| 12 (C) | 0 | 0 | 0,0148 | 0,0132 | 0,0810 |
| 13 (C) | 0 | 0 | 0,0138 | 0,0138 | 0,0570 |
| 14 (C) | 0 | 0 | 0,0160 | 0,0150 | 0,0140 |

A análise a seguir será realizada apenas para a tela 3 (central), a fim de exemplificar o comportamento verificado durante o processo de secagem. Apresenta-se no Anexo B a análise para as demais telas.

Taxa de secagem inicial (N_i)

A partir da análise estatística dos resultados obtidos, estimou-se o efeito das condições operacional na taxa de secagem inicial. A significância estatística dos efeitos individuais e interações das variáveis independentes é confirmada no diagrama de Pareto, Figura 4.23, onde os efeitos estatisticamente significativos estão à direita da reta vertical indicativa do limite de confiança de 95%.

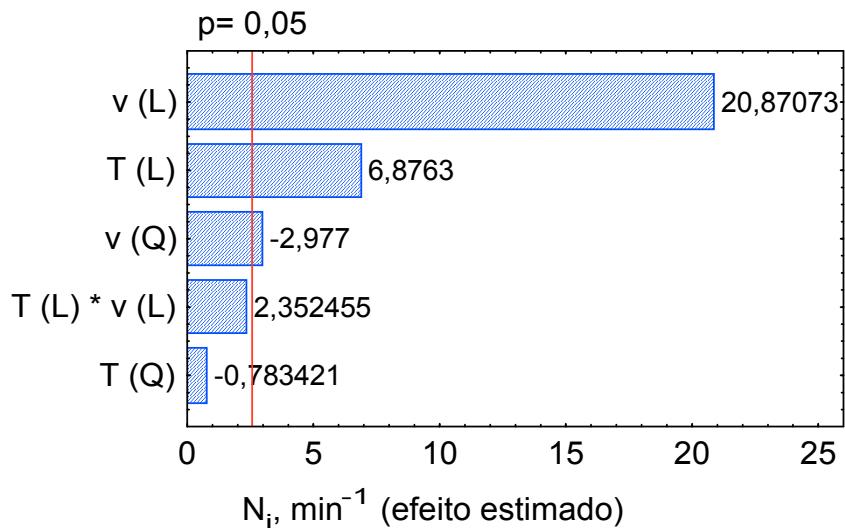


Figura 4.23: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial.

A Figura 4.23 indica a forte influência da velocidade do ar (termo linear) em relação à temperatura (termo linear), apresentando um efeito positivo, ou seja, um aumento da velocidade do ar acarreta em um aumento da taxa de secagem na fase inicial. O mesmo ocorre para a temperatura do ar, porém com menor efeito. A forte influência das condições externas na taxa de secagem inicial se deve à grande quantidade de umidade superficial presente no material no início do processo.

O modelo estatístico codificado, excluindo-se os termos estatisticamente não significativos, foi obtido para correlacionar as variáveis com a resposta (Equação 4.3).

$$N_i = 0,0266 + 0,0026 \cdot T + 0,0080 \cdot v - 0,0012 \cdot v^2 \quad (4.3)$$

Nas Tabelas 4.12 e 4.13 são apresentados os resultados obtidos da análise dos coeficientes de regressão do modelo matemático empírico codificado, com base no erro puro.

Tabela 4.12: Coeficientes de regressão para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,026658 | 0,000368 | $9,52 \cdot 10^{-9}$ | 0,025711 | 0,027604 |
| T (L) | 0,002635 | 0,000383 | 0,000995 | 0,001650 | 0,003620 |
| v (L) | 0,007999 | 0,000383 | $4,68 \cdot 10^{-6}$ | 0,007013 | 0,008984 |
| v (Q) | -0,001160 | 0,000398 | 0,032807 | -0,002190 | -0,000140 |

Tabela 4.13: Análise de variância para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $5,775 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $1,92 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $1,454 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $1,454 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $8,99 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $5,88 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,18 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000592 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9749$$

O coeficiente de correlação para a resposta foi de $R^2 = 0,9749$ em relação ao valor máximo explicável de 99,01%. Através do teste F, Tabela 4.14, observa-se que a regressão é significativa ($F_{calculado} = 35,68 \cdot F_{tabelado}$) e que o modelo não apresenta falta de ajuste ($MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$), visto que para um bom ajuste o $F_{calculado}$ deve ser no mínimo três vezes maior que o $F_{tabelado}$.

Tabela 4.14: Valores para o teste F para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3.

| | $F_{calculado}$ | $F_{tabelado}$ |
|--------------------|-----------------|----------------|
| MQ_R/MQ_r | 132,38 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,52 | 5,05 |

A Figura 4.24 representa a superfície de resposta construída a partir do modelo matemático codificado para a taxa de secagem inicial, confirmando a influência marcante da velocidade do ar na resposta analisada.

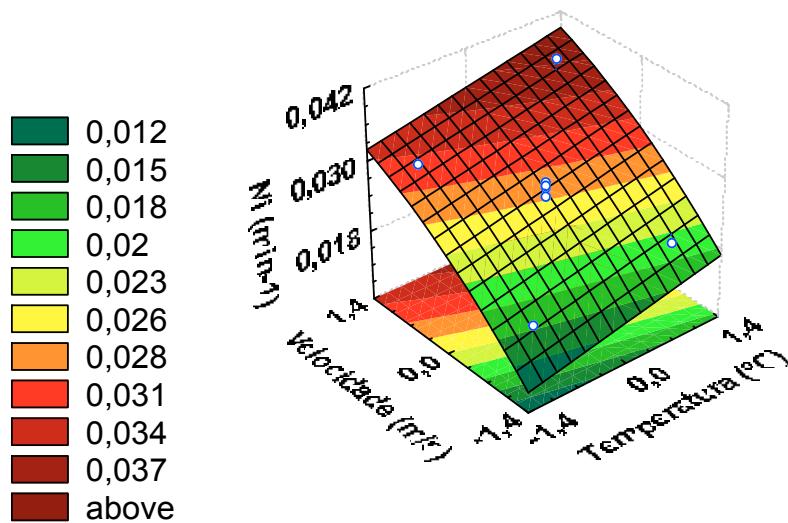


Figura 4.24: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial.

A comparação entre os valores experimentais e calculados, através do modelo de 2^a ordem para a taxa de secagem inicial, é ilustrado na Figura 4.25. Verifica-se uma excelente distribuição dos pontos em torno da reta ideal, confirmando juntamente com a análise da variância um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

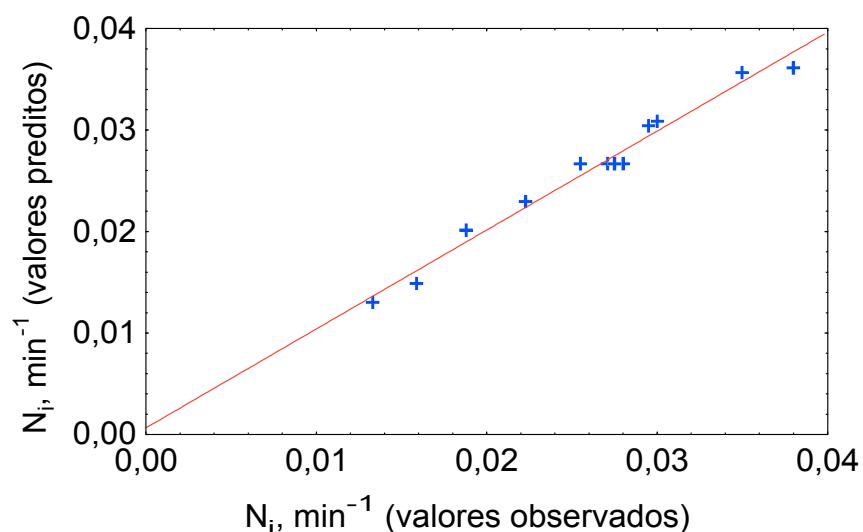


Figura 4.25: Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial.

A Figura 4.26 relaciona os valores preditos e seus respectivos resíduos em função do modelo, indicando que o modelo representa adequadamente as variações nesta faixa de valores, já que não se observa uma distribuição tendenciosa dos resíduos.

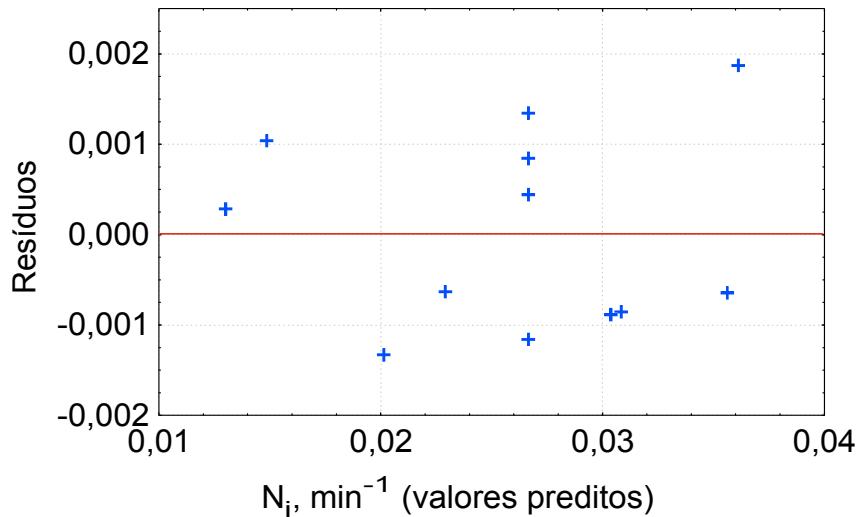


Figura 4.26: Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial.

Taxa de secagem constante (N_c)

A Figura 4.27 apresenta o diagrama de Pareto, indicando os efeitos considerados significativos estatisticamente para um limite de confiança de 95%. Ambas as variáveis independentes apresentaram um efeito positivo em relação à taxa de secagem constante. Entretanto, o efeito da velocidade do ar é menos significativo se comparado à resposta N_i . Isto ocorre porque, no início, a umidade superficial excedente é arrastada pelo fluxo de ar.

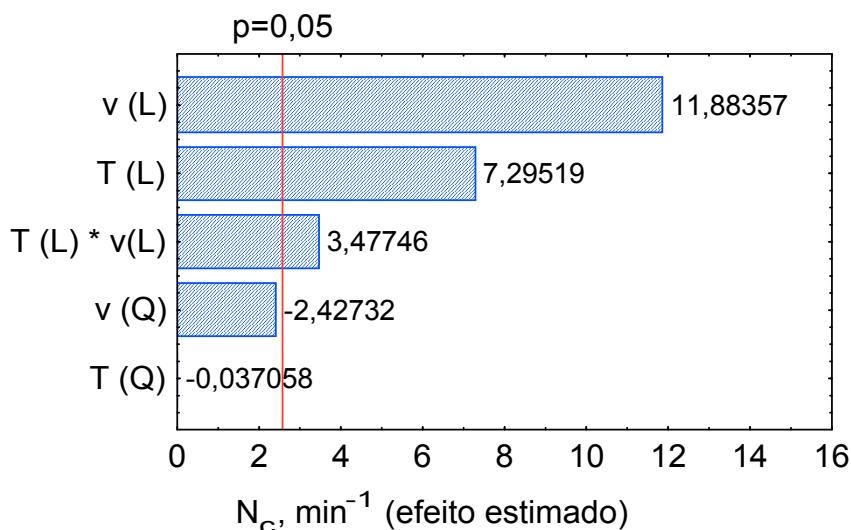


Figura 4.27: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante.

O modelo estatístico codificado para correlacionar as variáveis com a resposta (N_c) é representado pela Equação de 2^a ordem (4.4), levando em conta apenas os termos considerados significativos.

$$N_c = 0,0217 + 0,0031 \cdot T + 0,0051 \cdot v + 0,0021 \cdot T \cdot v \quad (4.4)$$

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos da análise dos coeficientes de regressão do modelo matemático empírico codificado, com base no erro puro.

Tabela 4.15: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,021750 | 0,000327 | $1,45 \cdot 10^{-8}$ | 0,020910 | 0,022590 |
| T (L) | 0,003152 | 0,000432 | 0,000758 | 0,002041 | 0,004263 |
| v (L) | 0,005135 | 0,000432 | 0,000074 | 0,004024 | 0,006246 |
| T*v | 0,002125 | 0,000611 | 0,017707 | 0,000554 | 0,003696 |

Tabela 4.16: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $3,0823 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $1,027 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $1,777 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $1,777 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $2,06 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $7,47 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,49 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000326 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9455$$

A porcentagem de variação explicada é de 94,55% em relação ao valor máximo explicável de 97,71%. Através do teste F, Tabela 4.17, observa-se que a regressão é

significativa ($F_{calculado} = 15,18 \cdot F_{tabelado}$) e que o modelo não apresenta falta de ajuste ($MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$).

Tabela 4.17: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| | $F_{calculado}$ | $F_{tabelado}$ |
|--------------------|-----------------|----------------|
| MQ_R/MQ_r | 57,82 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,38 | 5,05 |

A Figura 4.28 representa a superfície de resposta construída a partir do modelo matemático codificado para a taxa de secagem constante, confirmando a influência positiva da velocidade e da temperatura do ar na resposta analisada.

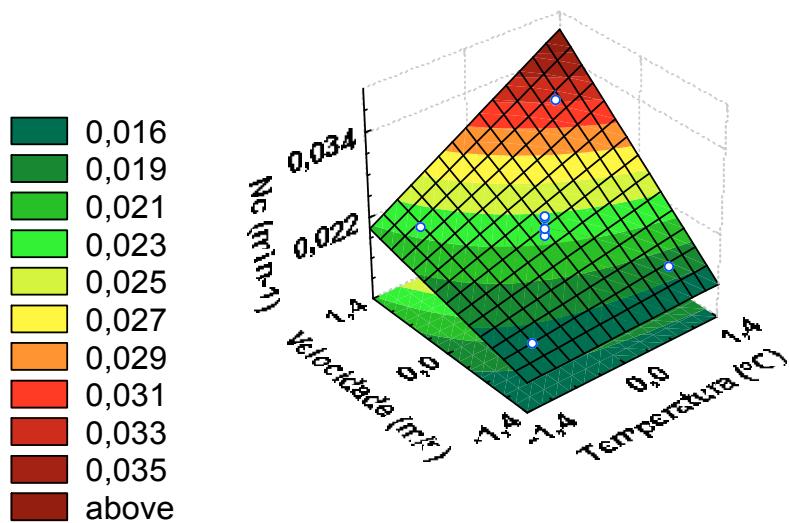


Figura 4.28: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante.

A comparação entre os valores experimentais e calculados, através do modelo de 2^a ordem para a taxa de secagem constante, é ilustrado na Figura 4.29. Verifica-se uma boa distribuição dos pontos em torno da reta ideal. A Figura 4.30 relaciona os valores preditos e seus respectivos resíduos em função do modelo, podendo-se observar a distribuição aleatória dos pontos em função do modelo preditivo.

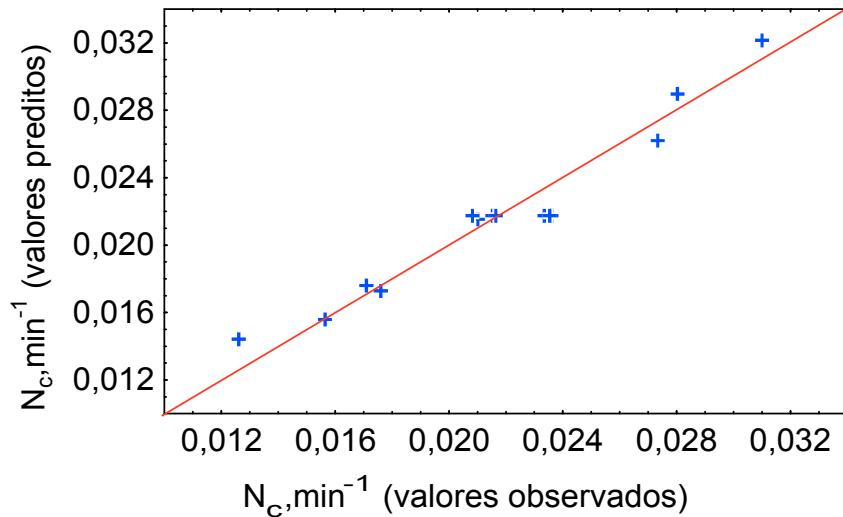


Figura 4.29: Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante.

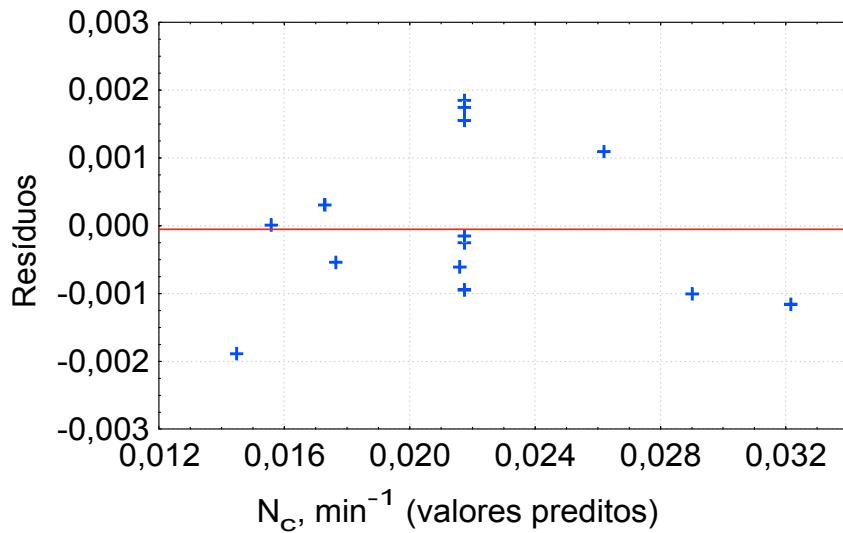


Figura 4.30: Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante.

Teor de umidade final ($\frac{X_f}{X_0}$)

A significância dos efeitos das variáveis independentes é apresentada pelo diagrama de Pareto na Figura 4.31.

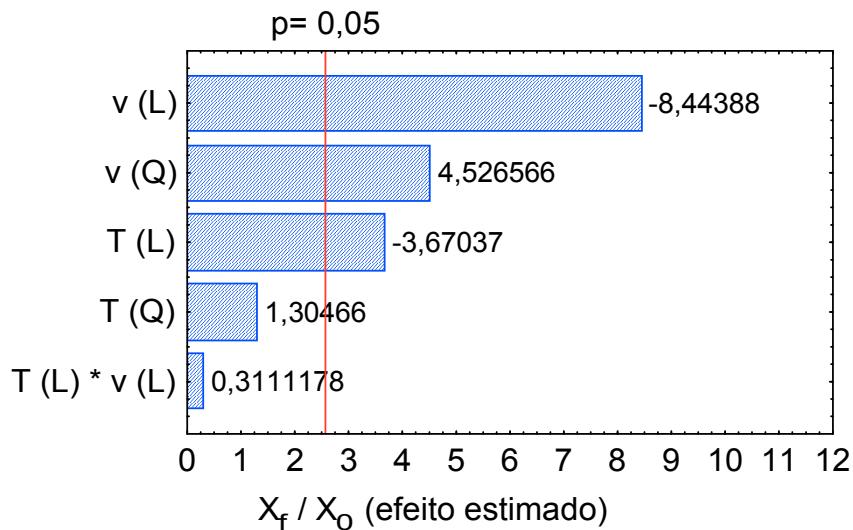


Figura 4.31: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial.

Através desse diagrama pode-se visualizar os termos que apresentam maior influência na resposta, a velocidade do ar (termo linear) provoca uma redução no teor de umidade final do papel após um tempo fixo de secagem, parametrizado em relação ao teor de umidade inicial. A temperatura do ar também influencia negativamente na resposta analisada, porém com menor efeito.

O modelo estatístico codificado para a resposta ($\frac{X_f}{X_0}$) é representado pela

Equação de 2^a ordem (4.5), levando em conta os termos linear e quadrático da velocidade do ar e o termo linear da temperatura do ar.

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0604 - 0,0480 \cdot T - 0,1103 \cdot v + 0,0602 \cdot v^2 \quad (4.5)$$

A significância estatística do modelo é determinada pela análise dos coeficientes de regressão e análise de variância, conforme indicadas nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.18: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,060421 | 0,012556 | 0,004832 | 0,028145 | 0,092697 |
| T (L) | -0,047966 | 0,013069 | 0,014438 | -0,081560 | -0,014373 |
| v (L) | -0,110349 | 0,013069 | 0,000382 | -0,143943 | -0,076756 |
| v (Q) | 0,060206 | 0,013562 | 0,006769 | 0,025344 | 0,095068 |

Tabela 4.19: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,1427491 | 3 | $4,75 \cdot 10^{-2}$ |
| Resíduos | 0,0124611 | 10 | $1,246 \cdot 10^{-3}$ |
| Falta de ajuste | 0,0056296 | 5 | 0,001126 |
| Erro puro | 0,0068315 | 5 | 0,001366 |
| Total | 0,1552102 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9112$$

A regressão explica 91,12% da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 95,59%. A qualidade do ajuste é 91,12%, o que significa que há uma boa aproximação entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo é de 10,29 vezes superior ao F tabelado e $MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5}$ ($\alpha = 95\%$), indicando que a regressão é significativa e que não há falta de ajuste do modelo, a um nível de confiança de 95%. A Tabela 4.20 apresenta os resultados para o teste F.

Tabela 4.20: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| | $F_{calculado}$ | $F_{tabelado}$ |
|--------------------|-----------------|----------------|
| MQ_R/MQ_r | 38,18 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,82 | 5,05 |

Na Figura 4.32 é apresentada a superfície de resposta para o teor de umidade final do papel parametrizado em relação ao teor de umidade inicial, comprovando que para níveis elevados de valores das variáveis independentes, obtém-se um baixo valor para a resposta analisada, ou seja, a umidade final é menor quanto maior foram os níveis de velocidade e temperatura do ar.

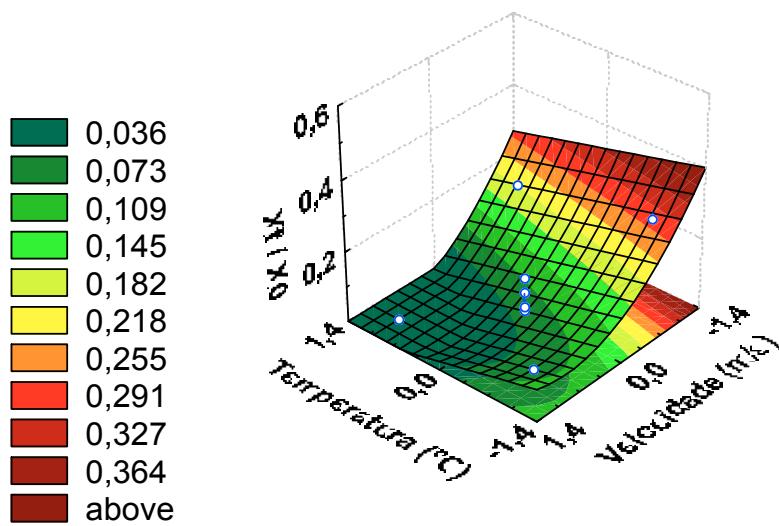


Figura 4.32: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial.

A comparação entre os valores experimentais e os valores calculados a partir do modelo expresso pela Equação 4.3 é apresentada na Figura 4.33, indicando uma boa concordância entre os valores observados e os valores preditos.

Na Figura 4.34, observa-se uma distribuição aleatória dos resíduos em função do modelo proposto para correlacionar as variáveis independentes com a resposta $\frac{X_f}{X_0}$.

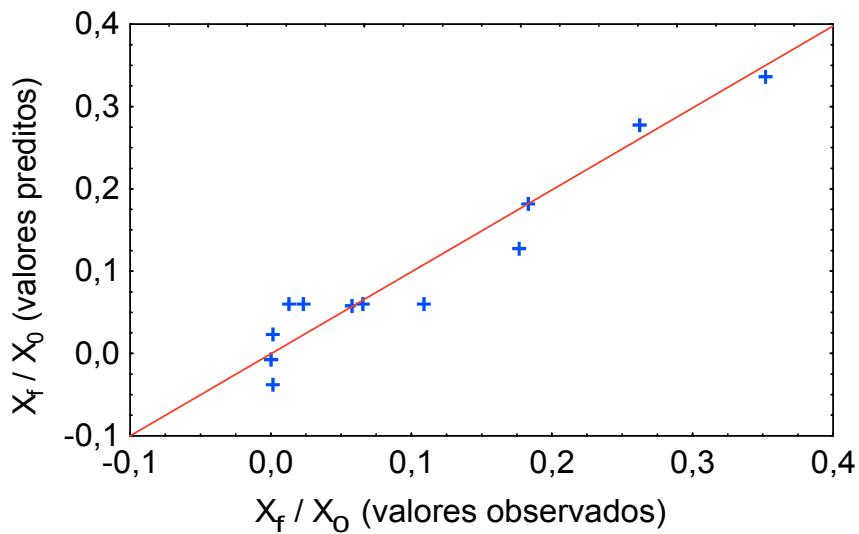


Figura 4.33: Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial.

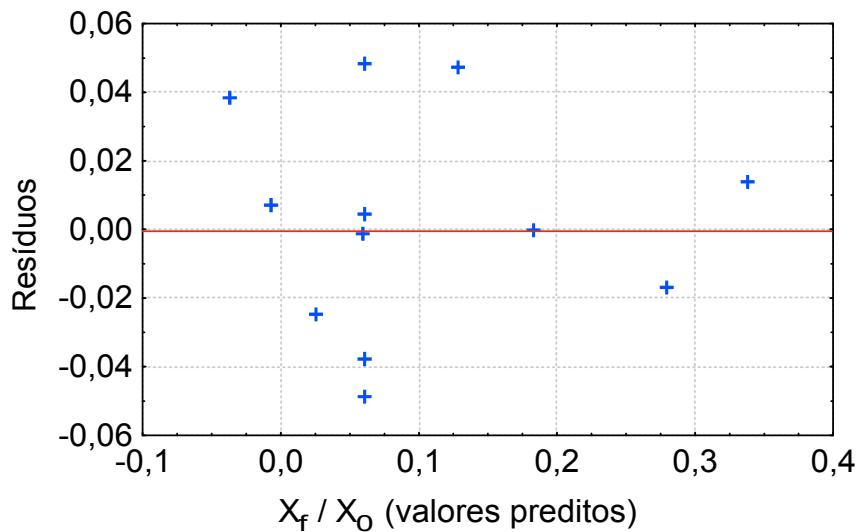


Figura 4.34: Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial.

Os modelos empíricos obtidos para as demais telas foram semelhantes aos da tela 3 (Anexo B). A influência da velocidade do ar foi mais significativa se comparada a da temperatura em todas as telas, apresentando um efeito positivo para as respostas N_i e N_C e um efeito negativo para a resposta X_f/X_0 , conforme esperado da teoria. O efeito da temperatura é praticamente o mesmo para as taxas de secagem inicial e constante. Já o

efeito da velocidade do ar é mais pronunciado para a taxa inicial do que para a taxa constante, em virtude da grande quantidade de umidade superficial que é transportada pelo ar no início da secagem.

4.3. Análise das isotermas de dessorção

O conhecimento da umidade de equilíbrio é de grande importância na análise do processo de secagem e de armazenamento do produto. Além disso, as curvas de sorção são indispensáveis para determinar o teor de água final necessário para estabilizar um produto. O papel quando submetido a uma atmosfera úmida é sujeito a variações dimensionais, além de prejudicar a qualidade de impressão.

Inicialmente, pretendia-se determinar as isotermas de dessorção nas mesmas temperaturas dos experimentos de secagem. Todavia, em virtude das limitações do equipamento utilizado (DVS), foram construídas as isotermas de dessorção nas temperaturas de 25 e 50°C para as amostras de papel secas em três diferentes condições operacionais (70°C; 0,3 m/s), (80°C; 0,5 m/s) e (90°C; 0,7 m/s). As Figuras 4.35 e 4.36 apresentam as isotermas de dessorção nas temperaturas de 25 e 50°C, respectivamente, para as três amostras de papel. O efeito da temperatura na dessorção do papel pode ser visualizado na Figura 4.37.

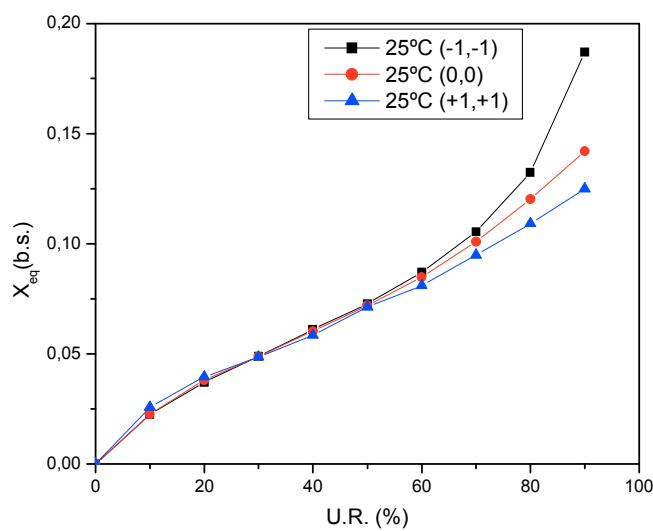


Figura 4.35: Isotermas de equilíbrio na temperatura de 25°C.

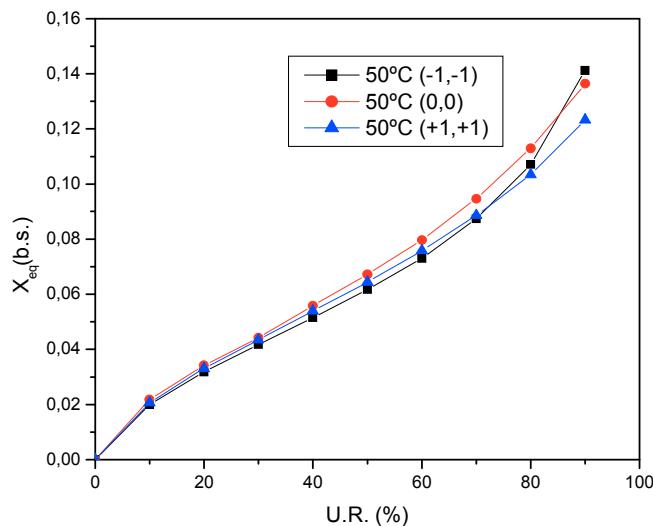


Figura 4.36: Isotermas de equilíbrio na temperatura de 50°C.

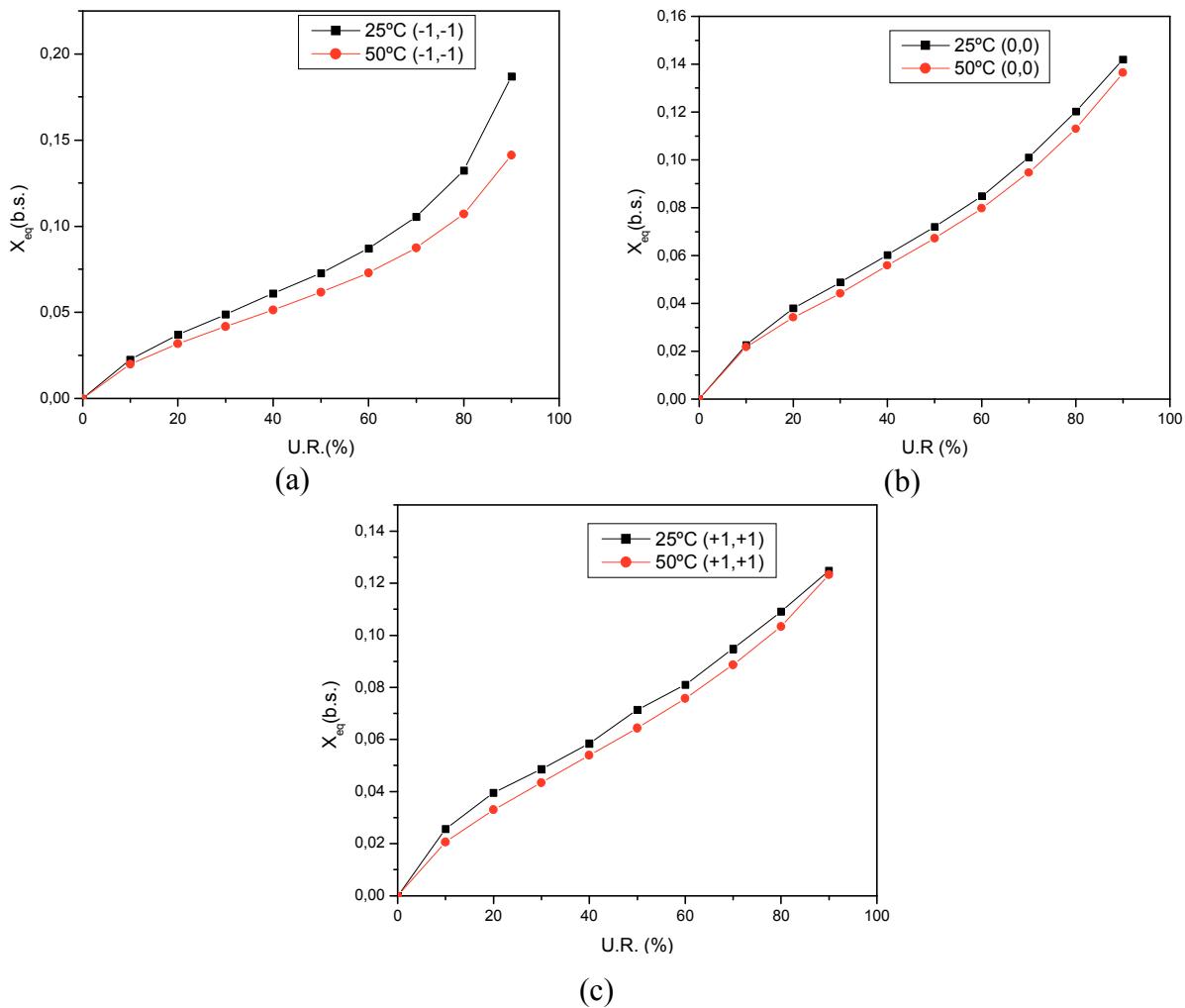


Figura 4.37: Isotermas de equilíbrio – Efeito da temperatura na dessorção do papel seco nas condições: (a) (70°C, 0,3 m/s); (b) (80°C, 0,5 m/s) e (c) (90°C, 0,5 m/s).

Analisando as Figuras 4.35 e 4.36, podemos classificar segundo Brunauer, Emmet e Teller (1938), as isotermas obtidas como tipo II (BET), caracterizada por um processo de sorção multi-camada. Observa-se uma concordância das curvas até um valor de 60% de umidade relativa referente à faixa em que a umidade encontra-se ligada, diferindo-se apenas na região em que a água encontra-se não-ligada, ou seja, com U.R.> 60% (Labuza, 1968). Verifica-se na região de condensação capilar (U.R.> 60%) um aumento significativo da umidade de equilíbrio do papel na condição de secagem mais branda (70°C; 0,3 m/s). O papel seco em condições mais severas (90°C; 0,7 m/s) apresenta poros mais fechados, resultando em um menor teor de umidade de equilíbrio quando submetido à atmosfera mais úmida.

A partir da Figura 4.37, verifica-se que a um valor de umidade relativa constante, o aumento da temperatura reduz o teor de umidade de equilíbrio do papel nas três condições analisadas. Esta é a tendência normal prevista pela teoria da adsorção física (Arévalo-Pinedo *et al.*, 2004; Faria, 1998; Dullien, 1992). O mesmo comportamento foi verificado por Mota Lima *et al.* (2004) para isotermas de papel artesanal tipo Kraft.

Em temperatura ambiente (25°C), recomenda-se um limite seguro para o armazenamento do papel reciclado a uma umidade relativa de 60%, a partir da qual observou-se um comportamento exponencial da curva. Ainda, o valor da atividade igual a 0,6 é suficiente para inibir todo crescimento biológico e ainda manter as condições de umidade desejáveis no produto (Labuza, 1968). Conforme observado na Figura 4.37, este limite também é válido para o armazenamento em temperaturas superiores a 25°C.

As isotermas obtidas foram ajustadas por sete equações da literatura, apresentadas na Tabela 4.21, obtendo-se excelentes coeficientes de correlação ($R^2 \geq 0,99$). As seis primeiras equações já foram utilizadas por demais autores para o ajuste de isotermas de papel (Mota Lima *et al.*, 2004, 2002). A Equação de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) é considerada como o modelo mais versátil, pois é aplicada de maneira satisfatória em uma ampla faixa de umidade relativa ambiente (10 < U.R. < 90%), permitindo um melhor ajuste dos dados de sorção de vários materiais (Marinos-Kouris e Maroulis, 1995).

Tabela 4.21: Efeito da umidade relativa e da temperatura na umidade de equilíbrio.

| Referência | Equação |
|---|---|
| Modificada Henderson (Neuman <i>et al.</i> , 1986) | $X_{eq} = \left(\frac{-\ln(1 - U.R)}{A \cdot T \cdot \exp(-B/T)} \right)^C$ (4.6) |
| Modificada Henderson (Mota Lima <i>et al.</i> , 2002) | $X_{eq} = \left(\frac{-\ln(1 - U.R)}{A \cdot \exp(-B/T)} \right)^C$ (4.7) |
| Smith (1947) | $X_{eq} = \left(\frac{\ln(1 - (U.R.)^B)}{A \cdot T} \right)$ (4.8) |
| Smith (1947) | $X_{eq} = \left(\frac{\ln(1 - (U.R.)^C)}{A \cdot \exp(-B/T)} \right)$ (4.9) |
| Smith (1947) | $X_{eq} = \left(\frac{\ln(1 - (U.R.)^C)}{A \cdot \ln(B \cdot T)} \right)$ (4.10) |
| Smith (1947) | $X_{eq} = \left(\frac{C \cdot \ln(1 - (U.R.)^D)}{A \cdot T + B} \right)$ (4.11) |
| GAB em Marinos-Kouris e Maroulis (1995) | $X_{eq} = \left(\frac{A \cdot B \cdot C \cdot (U.R.)}{(1 - B \cdot (U.R.))(1 - B \cdot (U.R.) + B \cdot C \cdot (U.R.))} \right)$ (4.12) |

Fonte: Mota Lima *et al.*, 2004.

Onde: T: temperatura em que foi realizada a isoterma (K)

X_{eq} : teor de umidade de equilíbrio (b.s.) ($\text{kg}_w/\text{kg}_{ss}$)

U.R: umidade relativa do ambiente (-)

A, B, C e D: parâmetros das equações.

Os parâmetros estimados e os coeficientes de correlação obtidos a partir do ajuste não linear pelas equações apresentadas para as isotermas de dessorção a 25°C e 50°C para o papel seco 80°C e 0,5 m/s encontram-se nas Tabelas 4.22 e 4.23.

Tabela 4.22: Resultados estimados para a isoterma de dessorção a 25°C e amostra de papel seca na condição (80°C; 0,5 m/s).

| Equação | Parâmetros | R^2 |
|---------|---|--------|
| 1 | A = 0,221688; B = 1,002442; C = 0,576709 | 0,9994 |
| 2 | A = 62,36756; B = -16,3099; C = 0,57671 | 0,9994 |
| 3 | A = -0,07695; B = 0,320781 | 0,9967 |
| 4 | A = -0,19224; B = -1425,78; C = 0,320783 | 0,9967 |
| 5 | A = -2,02682; B = 276,6041; C = 0,320783 | 0,9967 |
| 6 | A = 0,277909; B = 0,09758; C = -3,61559; D = 0,320783 | 0,9967 |
| 7 | A = 0,061497; B = 0,673189; C = 7,075047 | 0,9999 |

Tabela 4.23: Resultados estimados para a isoterma de dessorção a 50°C e amostra de papel seca na condição (80°C; 0,5 m/s).

| Equação | Parâmetros | R^2 |
|---------|--|--------|
| 1 | A = 0,196551; B = 0,096551; C = 0,59727 | 0,9998 |
| 2 | A = 61,2233; B = -11,7804; C = 0,59727 | 0,9998 |
| 3 | A = -0,0729; B = 0,346405 | 0,9978 |
| 4 | A = -22,0066; B = -22,0023; C = 0,346405 | 0,9978 |
| 5 | A = -8,9052; B = 10,03163; C = 0,346405 | 0,9978 |
| 6 | A = 0,072901; B = 0,099953; C = -1,00427; D = 0,346403 | 0,9978 |
| 7 | A = 0,055736; B = 0,694552; C = 6,943849 | 0,9999 |

Conforme verificado nas Tabelas 4.22 e 4.23, todas as equações apresentaram coeficientes de correlação muito próximos à unidade, sendo que o modelo de GAB foi o que melhor representou os dados experimentais. A Figura 4.38 apresenta as isotermas de dessorção a 25°C e a 50°C para o papel seco na condição (80°C; 0,5 m/s), podendo-se verificar o excelente dos pontos experimentais ajuste à equação de GAB.

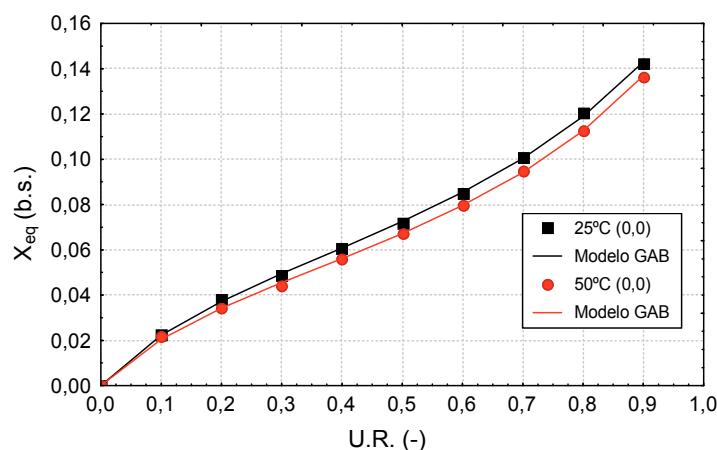


Figura 4.38: Ajuste da equação de GAB à isoterma dessorção a 25°C e a 50°C para o papel seco à 80°C e 0,5 m/s, $R^2 = 0,9999$.

4.4. Análise da eficiência energética

Neste trabalho, o cálculo da eficiência energética foi realizado baseado nas equações apresentadas no item 2.8.9 e com metodologia explicitada no item 3.7.4. Os resultados dos fatores de desempenho são apresentados na Tabela 4.24 para os ensaios 1 (70°C ; 0,30 m/s), 9 (80°C ; 0,50m/s) e 4 (90°C ; 0,70m/s).

Tabela 4.24: Cálculo energético para os ensaios 1, 9 e 4 e resultados obtidos da tela 3.

| Fatores de desempenho | Ensaio | | |
|---|-----------|---------|---------|
| | 1 (-1,-1) | 9 (0,0) | 4 (1,1) |
| Eficiência de evaporação (E_{ev}) (%) | 31,56 | 22,19 | 14,41 |
| Eficiência convectiva (E_{conv}) (%) | 24,53 | 14,59 | 13,35 |
| Eficiência convectiva máxima ($E_{conv,máx}$) (%) | 79,92 | 82,04 | 79,75 |
| Eficiência de secagem (ES) (%) | 19,45 | 15,74 | 9,09 |
| Eficiência energética (EE) (%) | 18,69 | 14,14 | 9,05 |
| Eficiência térmica (ET) (kg/MJ) | 0,1024 | 0,0768 | 0,0474 |
| Consumo específico de calor (SHC) (MJ/kg) | 9,761 | 13,087 | 21,075 |
| Consumo específico de potência (SPC) (MJ/kg) | 7,619 | 13,920 | 22,617 |
| Consumo de ar/kg de água evaporada (kg/kg) | 180,18 | 220,02 | 285,25 |
| Volume específico do secador (m^3/kg) | 0,0250 | 0,0265 | 0,0258 |
| Consumo específico de gás (kg/kg) | 281,98 | 1267,06 | 2448,9 |
| LM | 0,85 | 0,70 | 0,55 |

Pela análise da Tabela 4.24, verifica-se que a secagem realizada nas condições operacionais mais brandas, ou seja, baixos valores de temperatura e velocidade do ar de secagem, apresentou maiores eficiências, tanto em termos de evaporação (E_{ev}) e convecção (E_{conv}), quanto em termos energéticos (EE e ES), além de exigir um menor consumo de ar por cada kg de água evaporada. Isto se deve ao fato de que, conforme já verificado nas curvas de cinética apresentadas, um aumento da temperatura do ar acima de 80°C e da velocidade do ar acima de 0,5 m/s não apresenta uma variação significativa no

tempo de secagem, acarretando em um gasto adicional energético, além de uma pior qualidade do papel obtido.

Os valores obtidos de eficiência energética estão de acordo com os valores encontrados para a grande parte dos secadores convectivos contínuos, em torno de 20% (Strumillo, 1986). Isto se deve à grande quantidade de ar não saturado que é perdida, sobretudo na fase de secagem à taxa decrescente. Ainda, o pequeno tempo de residência da polpa no secador devido à alta velocidade da linha, contribui para a baixa eficiência energética do secador multicilindro utilizado em grande parte das indústrias papeleiras.

O coeficiente LM indica o ensaio mais eficiente levando em consideração apenas a razão entre a energia necessária para a evaporação da água e a energia gasta para bombear o ar de secagem. Conforme esperado, o ensaio 1 (70°C; 0,30m/s), realizado na condição branda de velocidade, se mostrou mais eficiente sob aspecto fluidodinâmico. Entretanto, estes valores estão bem abaixo dos obtidos por Lima (1998), trabalhando com secagem de grãos em leito fixo ($1,91 \leq LM \leq 4,90$), leito de jorro ($1,88 \leq LM \leq 1,66$) e jorro fluidizado ($0,83 \leq LM \leq 1,85$). Isto comprova que para a quantidade de material introduzida no secador, o ar fornecido durante a secagem é acima do necessário para a vaporização da umidade presente. Recomenda-se, portanto, a recirculação parcial do ar de saída ou até mesmo o aumento da quantidade de material a ser seco em cada batelada, através da introdução de mais um módulo com cinco telas. Ainda, o curto tempo de residência do ar dentro do secador, contribui para um excesso de ar insaturado na saída do secador.

Quanto aos valores obtidos de eficiência térmica para os três ensaios analisados, mesmo se tratando de um secador convectivo em batelada, podemos considerá-los próximos dos valores obtidos para secadores convectivos contínuos industriais, cuja performance varia de 0,1 a 0,12 kg/MJ (Raghavan *et al.*, 2004). Estes valores também estão próximos aos encontrados por Lima (1998), estudando a secagem de grãos em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado, cujos valores de eficiência térmica variam, nesta ordem, de 0,015 a 0,049 kg/MJ, de 0,025 a 0,090 kg/MJ e de 0,029 a 0,090 kg/MJ.

O consumo específico de calor (SHC) obtido nos ensaios de secagem analisados está bem abaixo dos valores normalmente encontrados para secadores convectivos que varia de 81,15 a 90,35 MJ/kg de água evaporada, situando-se próximo dos valores obtidos

para secadores convectivos que foram implementados com microondas intermitente (7,11 a 24,32 kg/MJ) (Raghavan *et al.*, 2004).

A utilização de critérios energéticos para comparação de performance de secadores é uma ferramenta útil. Neste trabalho, comparamos três ensaios sob o ponto de vista energético, tendo o ensaio 1 (70°C; 0,30m/s), realizado em condições de secagem mais brandas, se destacado como o mais eficiente. No entanto, outros critérios tais como o de qualidade do produto final devem ser também analisados e, assim, otimizarmos o processo tornando-o não só viável em termos energéticos como também em termos qualitativos quanto ao papel obtido (Vieira *et al.*, 2005b).

4.5. Cinética da secagem ao natural

Foram realizados ensaios de secagem ao natural, submetendo as folhas de papel a diferentes valores de umidade relativa e de temperatura ambientes. A cinética de secagem foi acompanhada durante as primeiras doze horas. A Tabela 4.25 apresenta um resumo das condições dos ensaios realizados, juntamente com a concentração de sólidos da polpa utilizada em cada ensaio.

Tabela 4.25: Condições dos ensaios de secagem natural.

| Ensaio | T _{amb} (°C) | U.R. _{amb} (%) | C _S (%) |
|--------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 26,87 ± 0,69 | 47,50 ± 3,04 | 7,21 |
| 2 | 21,67 ± 0,79 | 55,02 ± 4,87 | 6,73 |
| 3 | 24,97 ± 0,34 | 78,25 ± 0,30 | 6,21 |
| 4 | 23,12 ± 1,47 | 69,20 ± 1,20 | 5,36 |
| 5 | 25,83 ± 0,35 | 69,41 ± 2,66 | 5,00 |
| 6 | 23,85 ± 1,01 | 67,78 ± 1,93 | 5,02 |
| 7 | 24,19 ± 0,29 | 88,38 ± 2,23 | 5,28 |
| 8 | 24,75 ± 0,46 | 63,19 ± 1,78 | 6,26 |
| 9 | 25,28 ± 0,23 | 80,58 ± 1,07 | 5,56 |

As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 apresentam, nesta ordem, os parâmetros do ar ambiente durante a secagem, as curvas de secagem e de taxa de secagem para as cinco telas.

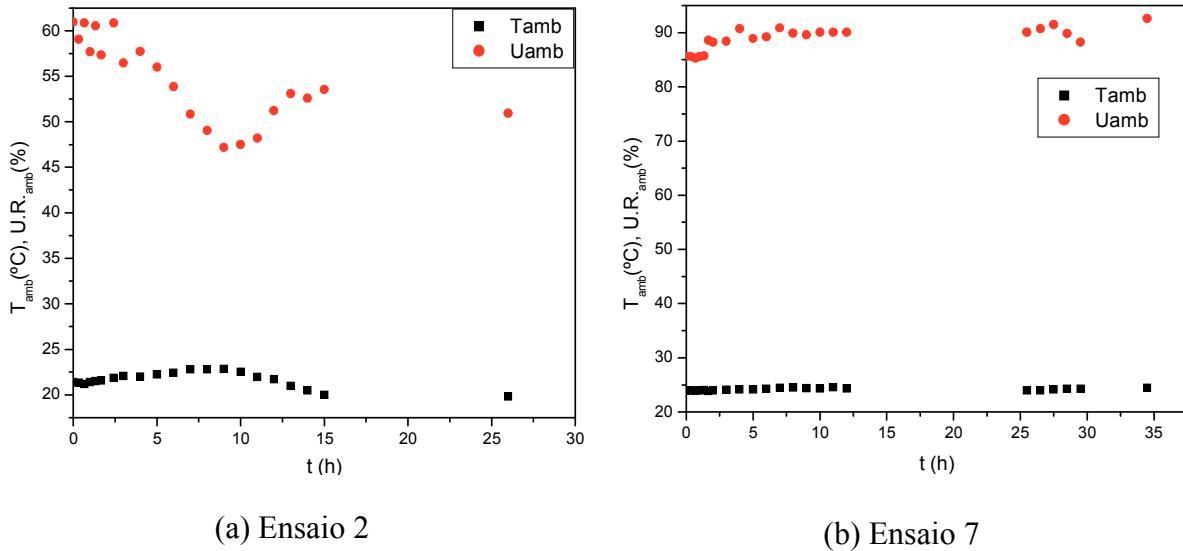


Figura 4.39: Parâmetros do ar ambiente para os ensaios 2 ($21,67^{\circ}\text{C}$; 55,02%) e 7 ($24,19^{\circ}\text{C}$; 88,38%) de secagem natural.

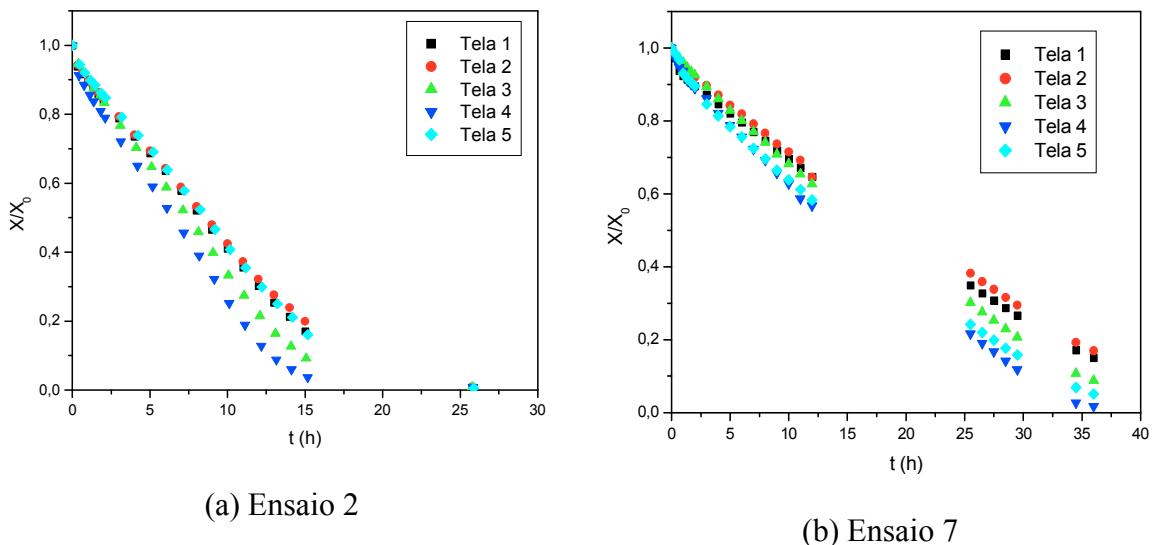


Figura 4.40: Curva de secagem convectiva natural para os ensaios 2 ($21,67^{\circ}\text{C}$; 55,02%) e 7 ($24,19^{\circ}\text{C}$; 88,38%).

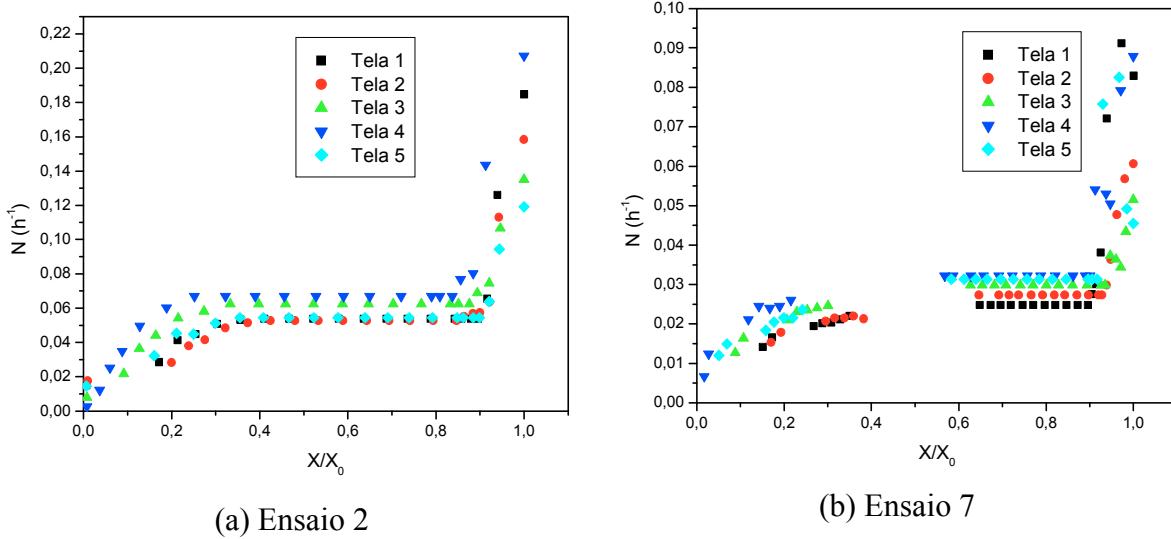


Figura 4.41: Curva de taxa de secagem em função do teor de umidade para os ensaios 2 (21,67°C; 55,02%) e 7 (24,19°C; 88,38%) de secagem natural.

Verificou-se a partir das Figuras 4.39 a 4.41 que a variação das condições ambientais influencia significativamente na cinética de secagem ao natural da folha de papel. Além disso, observou-se uma pequena variação da curva cinética em relação à posição da tela durante o ensaio, sendo que a tela de posição 4 (ver Figura 3.8) sempre apresentou um menor tempo de secagem. Isto pode ter ocorrido, pois a tela de posição 4 deve ter recebido uma maior ventilação se comparada às demais. Assim, para efeito de comparação, a posição das telas foi mantida constante em todos os ensaios realizados e os dados de cinética foram analisados separadamente, para cada tela, em suas respectivas posições.

A influência da umidade relativa ambiente no teor de umidade da folha após doze horas de secagem natural e nas taxas de secagem inicial e constante pode ser analisado a partir das Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 para a tela de posição 1. A temperatura ambiente e a concentração de sólidos não influenciaram nas respostas analisadas, uma vez que não se observou variações significativas destes parâmetros, conforme apresentado na tabela 4.25.

Foi possível ajustar empiricamente os resultados para teor de umidade, taxas inicial e constante em função da umidade relativa do ambiente. As correlações obtidas estão apresentadas nas Equações 4.13, 4.14 e 4.15:

$$\frac{X}{X_0} = 0,0134 \cdot (\text{UR}_{\text{amb}}) - 0,5404 \quad (R^2 = 0,9397) \quad (4.13)$$

$$N_i = -0,0014 \cdot (\text{UR}_{\text{amb}}) + 0,1843 \quad (R^2 = 0,9324) \quad (4.14)$$

$$N_c = -0,0012 \cdot (\text{UR}_{\text{amb}}) + 0,1318 \quad (R^2 = 0,9687) \quad (4.15)$$

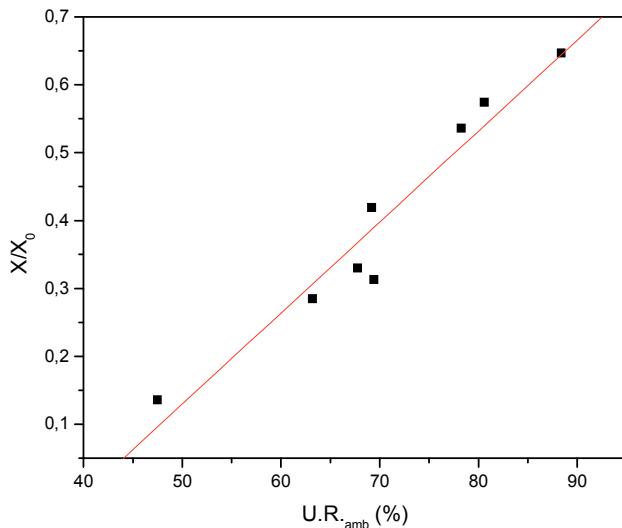


Figura 4.42: Influência da umidade relativa ambiente no teor de umidade da folha de papel durante a secagem natural.

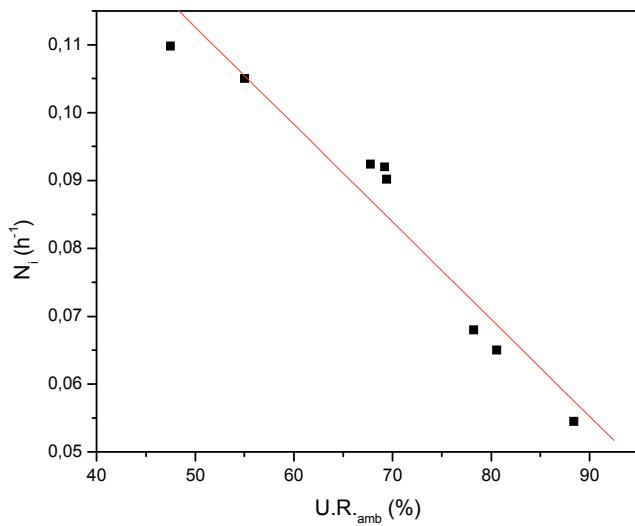


Figura 4.43: Influência da umidade relativa ambiente na taxa de secagem inicial da folha de papel durante a secagem natural.

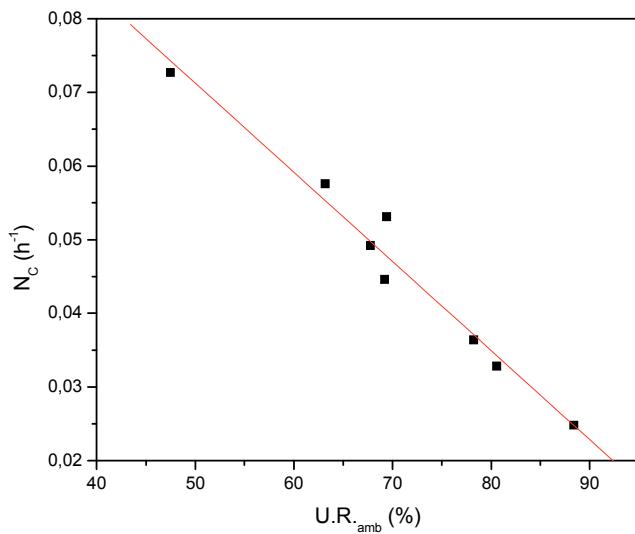


Figura 4.44: Influência da umidade relativa ambiente na taxa de secagem constante da folha de papel durante a secagem natural.

A partir das Figuras 4.42 a 4.44, verifica-se a grande dependência das condições ambientais, sobretudo da umidade relativa, para a secagem natural de folhas de papel reciclado. O mesmo ocorre em galpões de cooperativas de reciclagem, acarretando na produção de papéis com diferentes características. Ainda, o elevado tempo para a secagem completa da folha através do método tradicional, mesmo quando realizado em boas condições ambientais, conforme verificado na Figura 4.45, justifica a viabilidade da utilização de um secador de convecção forçada para secagem do papel.

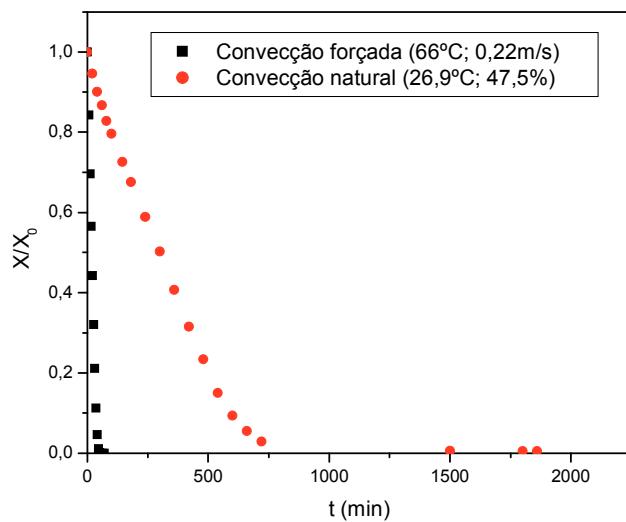


Figura 4.45: Comparação entre a secagem de convecção natural e a forçada.

4.6. Encolhimento do papel durante a secagem

A análise dos dados experimentais mostrou que as variações em (V/V_0) e em (S/S_0) durante a secagem das amostras de papel, em estufa, podem ser bem correlacionadas como funções lineares do teor de umidade das amostras. A redução na espessura foi melhor correlacionada como uma função logarítmica de X . As equações 4.16 a 4.18 representam os modelos aplicados neste trabalho para ajustar o encolhimento superficial, linear e volumétrico.

$$\frac{S}{S_0} = A \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right) + B \quad (4.16)$$

$$\frac{L}{L_0} = A' \cdot \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) + B' \quad (4.17)$$

$$\frac{V}{V_0} = A'' \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right) + B'' \quad (4.18)$$

A Tabela 4.26 resume os parâmetros determinados a partir das Equações 4.16 a 4.18, juntamente com os coeficientes de correlação.

Tabela 4.26: Parâmetros das Equações (4.16) – (4.18).

| Temperatura do ar (°C) | S/S_0 Eq. (4.16) | | | L/L_0 . Eq. (4.17) | | | V/V_0 Eq. (4.18) | | |
|---------------------------|--------------------|--------|----------------|----------------------|--------|----------------|--------------------|--------|----------------|
| | A | B | R ² | A' | B' | R ² | A'' | B'' | R ² |
| 70 | 0,1023 | 0,8974 | 0,9624 | 0,0333 | 0,9381 | 0,8899 | 0,2873 | 0,7106 | 0,9639 |
| 80 | 0,1323 | 0,8635 | 0,9723 | 0,0430 | 0,9450 | 0,9067 | 0,2841 | 0,6968 | 0,9634 |
| 90 | 0,1187 | 0,8769 | 0,9718 | 0,0501 | 0,9134 | 0,8653 | 0,3738 | 0,6162 | 0,9733 |

As Figuras 4.46 a 4.48 apresentam, respectivamente, a variação da área, espessura e volume do papel durante a secagem em função de teor de umidade do papel.

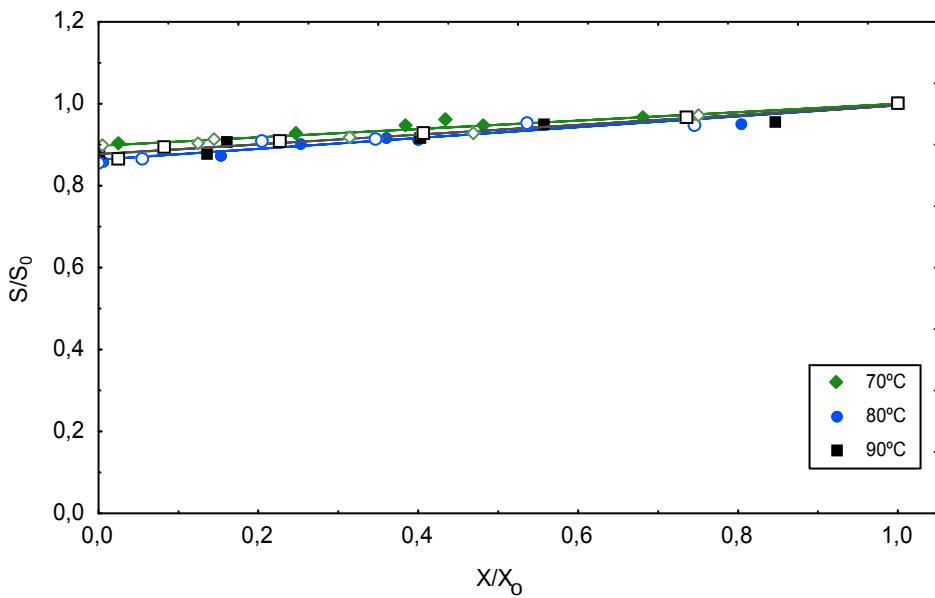


Figura 4.46: Redução da área do papel em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.16).

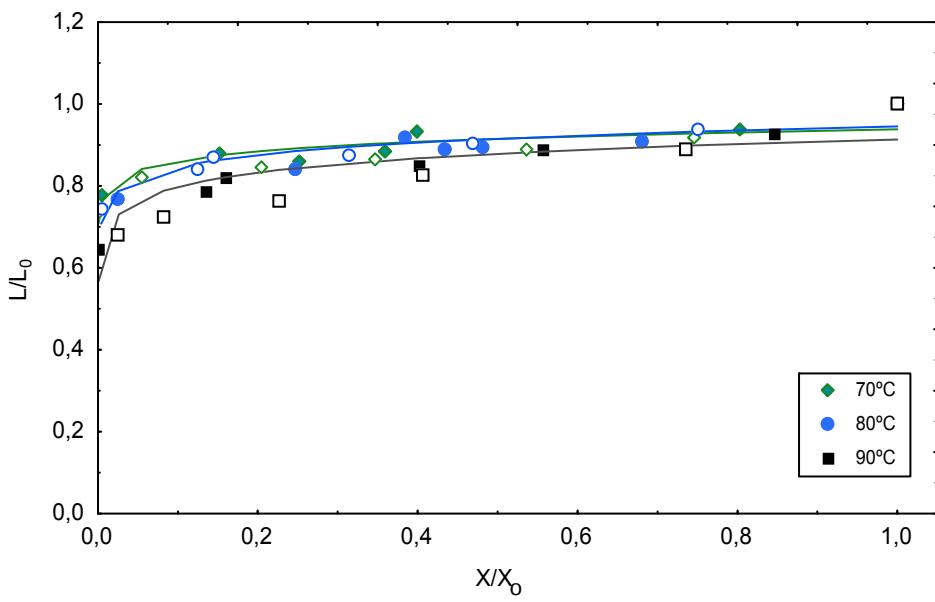


Figura 4.47: Redução linear do papel (espessura) em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.17).

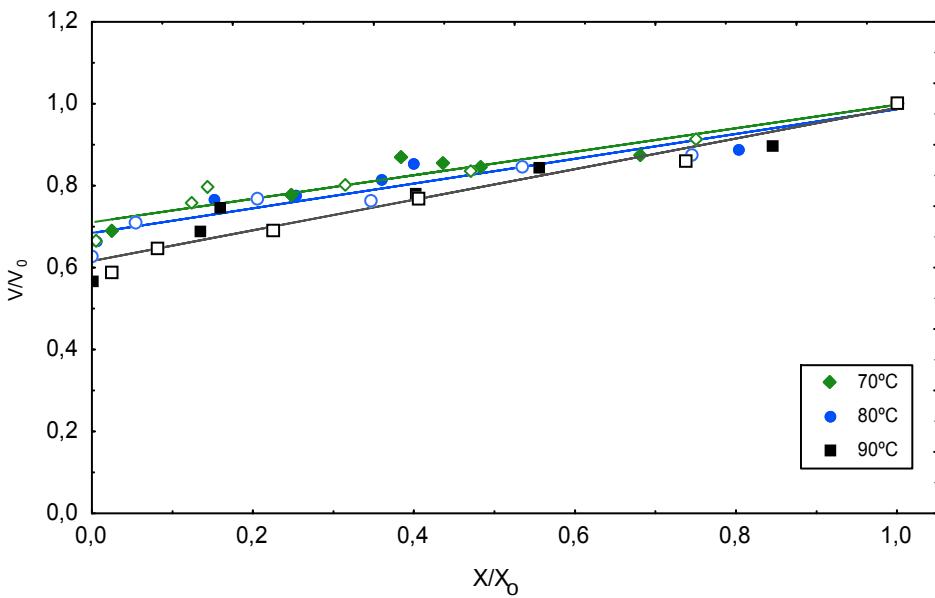


Figura 4.48: Redução volumétrica do papel em função do teor de umidade em base seca (b.s.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.18).

A partir da Tabela 4.27, verifica-se que não há nenhuma relação significativa entre as constantes da Eq. (4.16) em função da variação de temperatura. A incerteza calculada para as medidas da variação da área foi de $0,0012 \text{ mm}^2$ para todos os experimentos. Entretanto, as constantes para as Eqs. (4.17) e (4.18) revelam que a temperatura de ar tem uma pequena influência no encolhimento linear e, por conseguinte, no encolhimento volumétrico da folha de papel durante a secagem. Isto também pode ser verificado nas Figuras 4.46 a 4.48. A análise de erro realizada para as medidas de variação de espessura apresentou incertezas na faixa de $0,015$ a $0,016 \text{ mm}$ para 70°C , de $0,016 \text{ mm}$ para 80°C e de $0,013$ a $0,016 \text{ mm}$ para 90°C . Para os cálculos da variação do volume, as incertezas obtidas foram de $0,014 \text{ mm}^3$ (70°C), $0,015$ a $0,017 \text{ mm}^3$ (80°C) e $0,013 \text{ mm}^3$ (90°C).

As reduções na espessura e no volume são mais pronunciadas para a temperatura de ar mais elevada (90°C), ao contrário dos resultados obtidos por Katekawa e Silva (2004), Wang e Brennan (1995) e Lewicki e Jakubczyk (2004) que estudaram encolhimento de banana, batata e maçã durante a secagem. Porém, nestes trabalhos os autores trabalharam com alimentos e todos apresentaram o conhecido fenômeno de endurecimento da camada

superficial: o encolhimento torna-se menos pronunciado com o aumento da temperatura do ar, porque no primeiro período de secagem a alta taxa de evaporação de umidade provoca o endurecimento da superfície externa do material, que se torna impermeável ao movimento de umidade. Com este fenômeno, a remoção da água está reduzida e o encolhimento é retardado. No presente estudo, o enrijecimento foi observado para as três condições investigadas, mas uma maior deformação na direção das fibras foi verificada para a maior temperatura, o que justifica os resultados apresentados nas Figuras 4.46 a 4.48, para esta temperatura.

De acordo com a Figura 4.48, em todas as condições de secagem, a redução do volume mantém-se linear para $X/X_0 > 0,2$, e tende a desviar, aumentando ligeiramente para menores valores de X/X_0 . A redução de volume do sólido é proporcional ao volume correspondente à água evaporada durante a secagem até $X/X_0 = 0,2$. Para teores de umidade inferiores, a taxa de encolhimento da espessura desvia fortemente da linearidade, modificando o comportamento do encolhimento volumétrico. A deformação da superfície neste momento pode ocasionar mudanças estruturais, alterando a porosidade, a difusão da umidade interna no material e tendo como consequência modificações nas taxas de transferência de calor e massa.

A Figura 4.49 apresenta os resultados da evolução da densidade aparente do material em função do teor de umidade para as três condições de secagem. Verificou-se que do começo da secagem até um certo valor de teor de umidade (aproximadamente $X/X_0 = 0,4$), a densidade aparente se mantém praticamente inalterada para as três condições experimentais. Este comportamento ocorre porque a redução do volume do material é proporcional à perda de umidade evaporada durante este período da secagem. Para teores de umidade mais baixos, os valores de densidade aparente aumentam com o decorrer da secagem. Maiores valores de densidade aparente foram obtidos para os experimentos a 70°C. A baixos valores de teor de umidade, o volume do sólido sofre variações mais intensas para uma perda adicional de água, provocando um aumento da densidade aparente com a remoção da umidade. Menores valores de densidade foram obtidos para o papel seco na maior temperatura de secagem, principalmente para teores de umidade na faixa de $0 < X/X_0 < 0,2$. A análise de erro para as medidas de densidade aparente mostrou incertezas na faixa de 0,0005 a 0,0025 kg/m³ (70°C), de 0,0004 a 0,0025 kg/m³ (80°C) e de 0,0003 a 0,002 kg/m³ (90°C).

O valor médio de densidade real do sólido, obtido a partir da análise de picnometria a Hélio e usada na Eq. (3.3) foi $1880 \pm 10 \text{ kg/m}^3$, para os experimentos realizados a 70, 80 e 90°C. A densidade real do sólido foi medida a 22°C e este valor foi considerado no cálculo da porosidade.

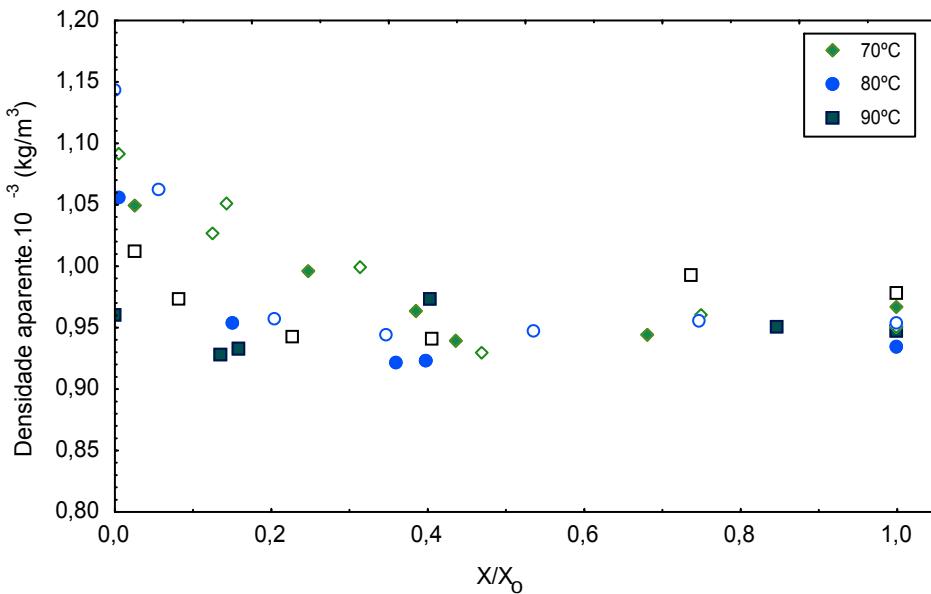


Figure 4.49: Densidade aparente em função do teor de umidade (d.b.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento.

A Figura 4.50 apresenta a evolução da porosidade calculada usando um modelo de três fases como uma função do teor de umidade adimensional (Eq. 3.3) (Mayor e Sereno, 2004). Os valores de porosidade aumentam exponencialmente com o decorrer da secagem. A umidade presente na amostra é substituída gradualmente pelo ar com a consequente formação dos poros internos. O mesmo comportamento foi observado por Wang e Brennan (1995). A Figura 4.50 também mostra a influência da temperatura nas características de porosidade interna. Foram obtidos maiores valores de porosidade para a secagem à 90°C, o que está de acordo com os menores valores de densidade aparente obtidos nesta mesma temperatura. A extensão do desenvolvimento de poros depende do comportamento das fibras durante o encolhimento. Com efeito, à taxas de secagem mais altas, as fibras internas deformam, ocasionando a formação de uma estrutura mais porosa. Por outro lado, a uma baixa temperatura de secagem as tensões internas são minimizadas. As incertezas nos

cálculos da porosidade foram na faixa de 0,012 a 0,1% (70°C), 0,02 a 0,15% (80°C) e 0,015 a 0,13% (90°C).

As características de porosidade exibem uma variação não-linear em relação ao teor de umidade. Os dados de porosidade foram ajustados por algumas correlações da literatura (Mayor e Sereno, 2004; McMinn e Magee, 1997). Entretanto, os melhores resultados foram obtidos a partir do ajuste por uma função exponencial do teor de umidade adimensional, representada pela Equação (4.19). A Tabela 4.27 apresenta os valores calculados das constantes a partir da Equação (4.19), juntamente com os coeficientes de correlação:

$$\varepsilon = a \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{X}{X_0}\right) \quad (4.19)$$

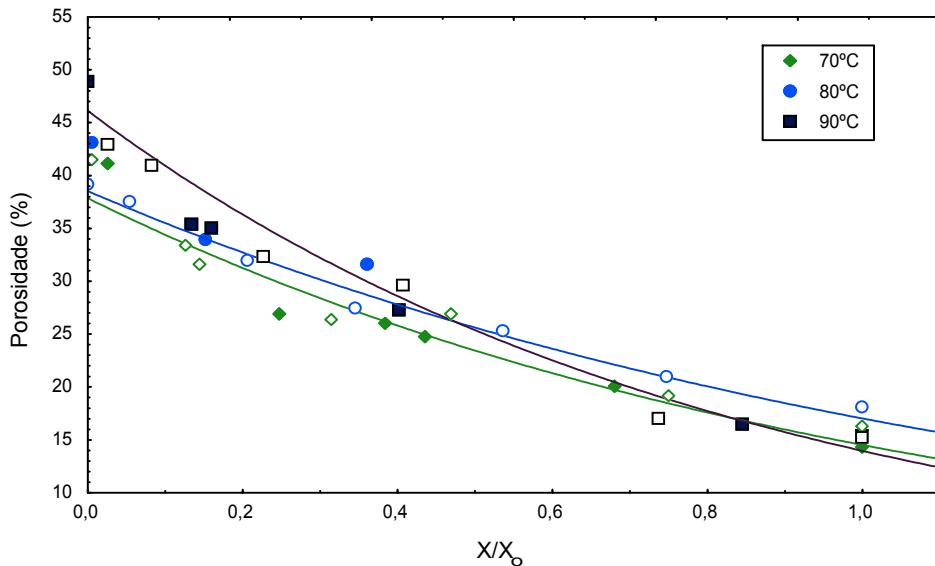


Figure 4.50: Evolução da porosidade da amostra de papel em função do teor de umidade (d.b.). Os símbolos abertos representam uma duplicata do experimento. As linhas cheias representam o ajuste pela Eq. (4.19).

Tabela 4.27: Parâmetros característicos para a Eq (4.19).

| Temperatura do ar (°C) | $\varepsilon = a \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{X}{X_0}\right)$ Eq.(4.19) | | |
|---------------------------|---|--------|----------------|
| | A | b | R ² |
| 70 | 39,86 | 0,8671 | 0,9682 |
| 80 | 38,16 | 0,9305 | 0,9528 |
| 90 | 43,76 | 1,1170 | 0,9751 |

Da Tabela 4.27, uma diferença significativa entre os parâmetros da Eq. (4.19) em função da variação de temperatura do ar foi apenas verificada para a condição experimental de 90°C. O mesmo também pode ser comprovado a partir da Figura 4.50.

A Figura 4.51 apresenta fotos da superfície de folhas de papel secas a 70, 80 e 90°C e a 0,7 m/s analisadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Pode-se visualizar a partir da Figura que uma superfície mais porosa foi obtida para o papel seco a 90°C. O grau de encolhimento foi menor para a temperatura mais baixa (70°C) que para a temperatura mais alta de secagem (90°C). Observa-se ainda que a folha seca a uma temperatura mais amena apresentou uma superfície mais homogênea, se comparada às folhas secas a 80 e 90°C, provavelmente devido à importante deformação sofrida pelo papel durante a secagem a altas temperaturas (Vieira *et al.*, 2006).

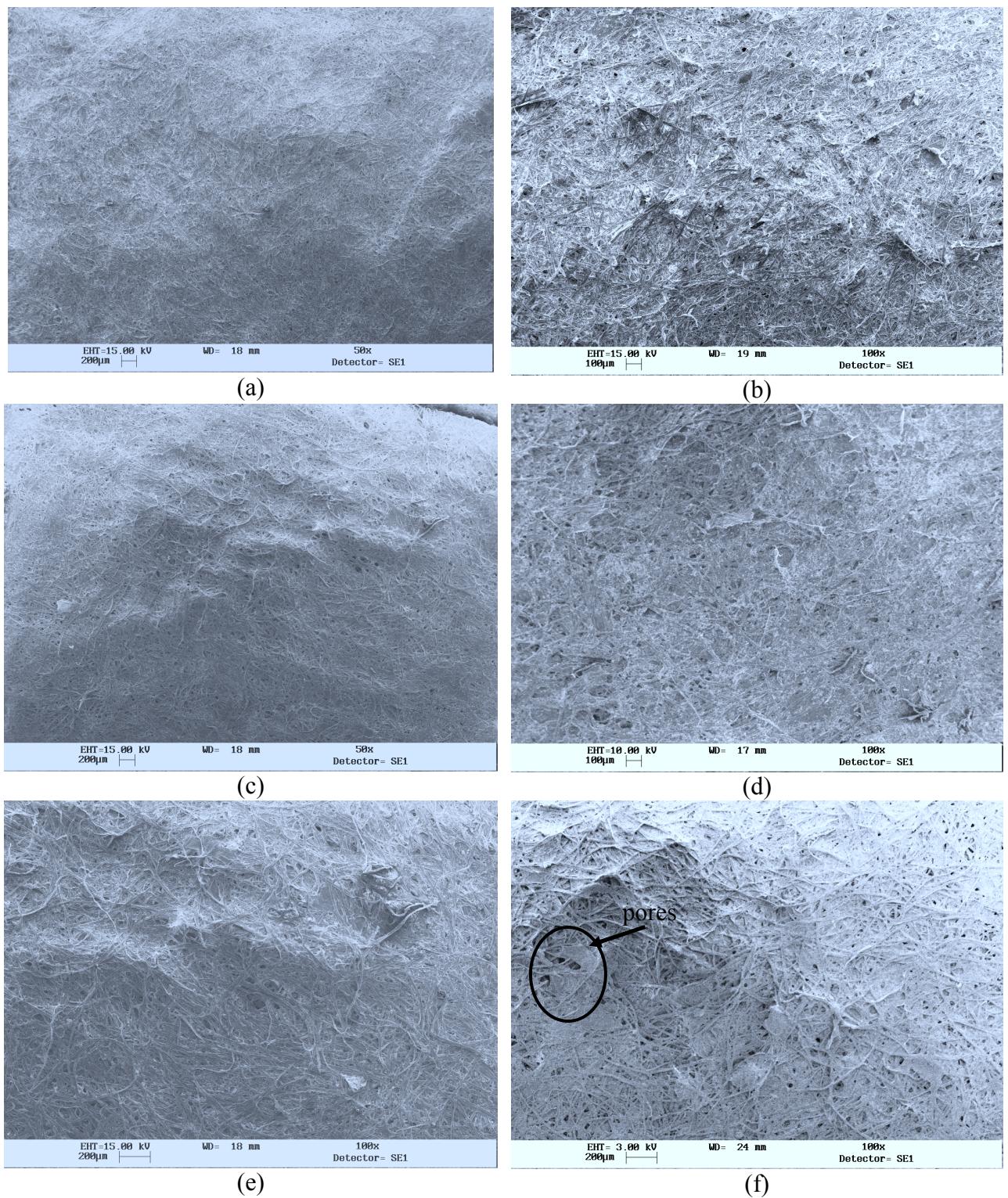


Figura 4.51: Fotos de folhas de papel analisadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) secas a: (a) 70°C (50x); (b) 70°C (100x); (c) 80°C (50x); (d) 80°C (100x); (e) 90°C (50x); (f) 90°C (100x).

As Figuras 4.52 e 4.53 apresentam os resultados obtidos pela análise de porosimetria de mercúrio para as folhas de papel secas a 70, 80 e 90°C.

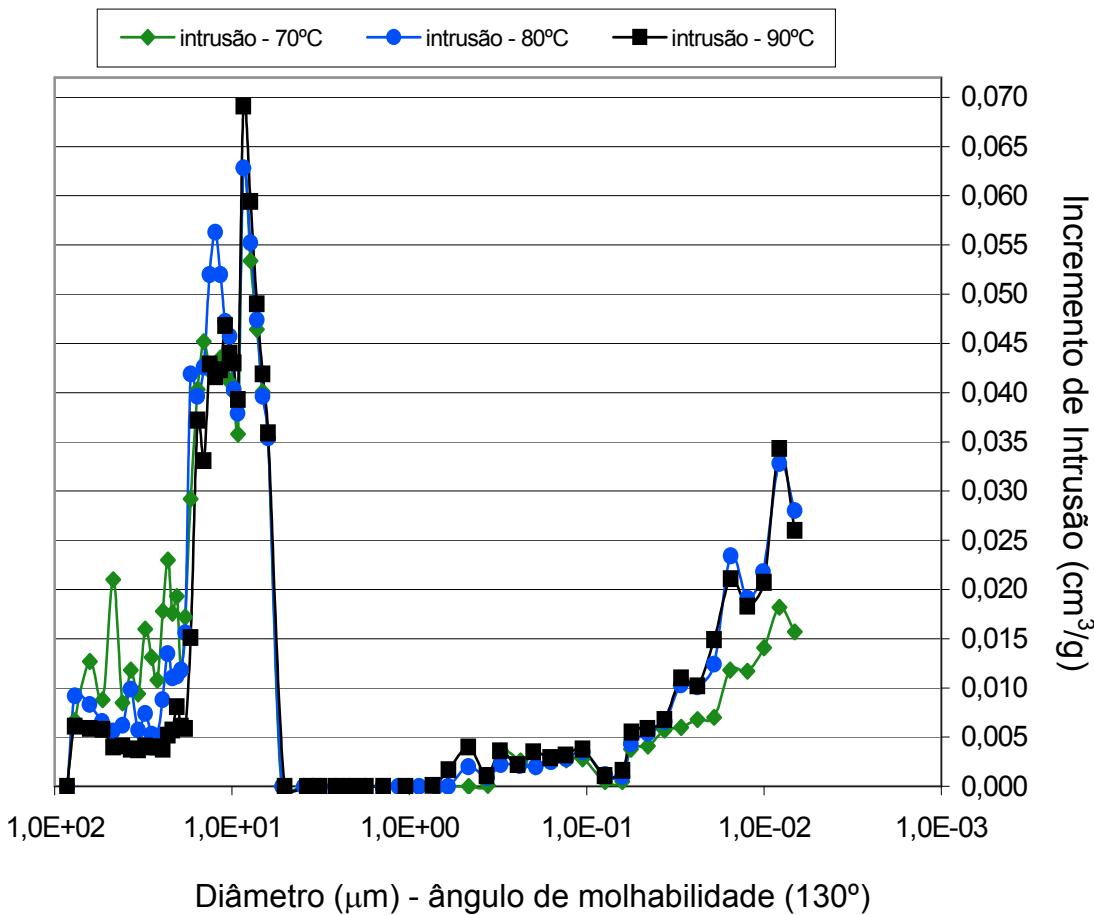


Figura 4.52: Incremento de intrusão (cm^3/g) versus diâmetro do poro (μm) – ângulo de contato: 130° .

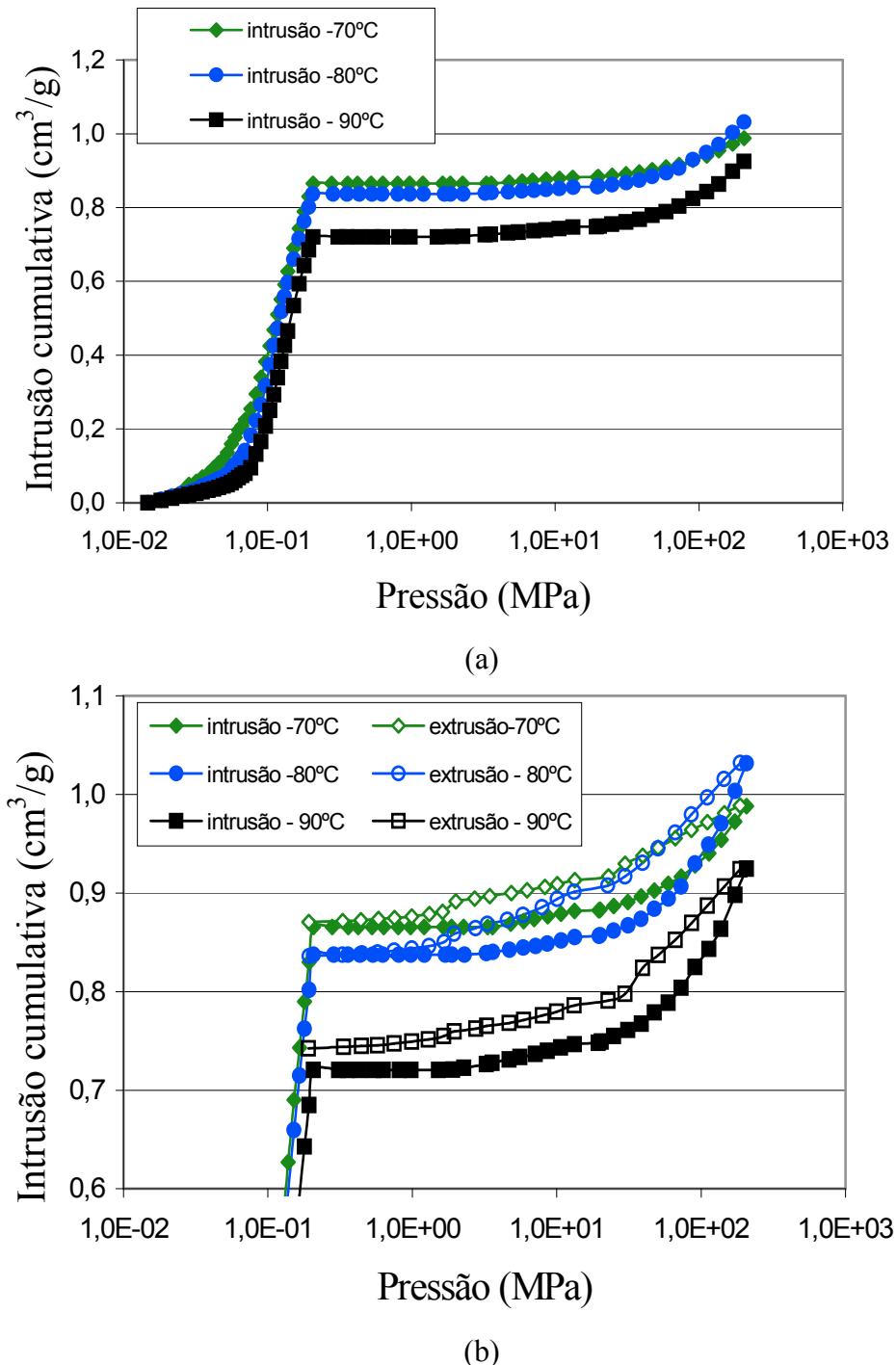


Figura 4.53: (a) Intrusão cumulativa (cm³/g) versus pressão (MPa); (b) Intrusão e extrusão cumulativa (cm³/g) versus pressão (MPa).

A Figura 4.52 indica a presença de duas faixas de diâmetro de poros predominantes: uma na região de macroporos com $5,0 \mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 85,0 \mu\text{m}$ e outra na

região de mesoporos com $0,0067\mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 0,0628\mu\text{m}$. A região de microporos do papel não pôde ser investigada em virtude da limitação do equipamento. A distribuição de tamanho de poros obtida é característica de materiais compostos por misturas, como é o caso do papel reciclado utilizado neste estudo. A primeira faixa deve corresponder às fibras celulósicas, enquanto a outra deve estar relacionada aos demais constituintes da polpa.

Verifica-se também que, para o papel seco a 70°C , obteve-se uma maior quantidade de macroporos na faixa de $18,4\mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 85,0\mu\text{m}$ se comparada às folhas de papel secas a 80 e 90°C . Já na região de mesoporos, observa-se uma menor quantidade de poros para o papel obtido em secagem mais branda (70°C).

Na faixa de $5,0\mu\text{m} < d_{\text{poros}} < 18,4\mu\text{m}$, verifica-se uma predominância de poros para o papel obtido por secagem em condição mais severa (90°C). Uma maior porosidade foi obtida para o papel seco a 90°C , o que está de acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4.50 e 4.51, respectivamente, obtidos a partir do estudo de encolhimento durante a secagem utilizando-se uma balança hidrostática e análise qualitativa realizada através de fotos de microscopia eletrônica de varredura da superfície do papel após a secagem em diferentes condições de temperatura.

A Figura 4.53 apresenta as curvas de adsorção e dessorção do mercúrio na camada interfacial das folhas de papel secas a 70 , 80 e 90°C . Verifica-se um posicionamento das isotermas de dessorção acima das de adsorção, confirmando a irreversibilidade do processo de sorção do mercúrio em papel reciclado. Segundo a IUPAC (1985), a histerese obtida para o papel reciclado pode ser classificada como tipo H3. Este tipo é observado para materiais na forma de placas planas com agregados de partículas, como é o caso das fibras de celulose presentes na polpa. Observa-se, ainda, que o efeito da histerese é mais pronunciado para o papel seco a 90°C , no qual o “loop” se estende sobre todo o intervalo de pressão de intrusão do mercúrio. Isto pode estar associado ao maior estrangulamento dos poros presentes neste papel, descrita na teoria “ink bottle” principalmente para o papel seco a 90°C .

4.7 Análise da Qualidade

O papel reciclado obtido ao final da secagem foi caracterizado segundo metodologia descrita no item 3.6. Os resultados a seguir apresentam uma síntese das análises realizadas com folhas de papel secas em três condições operacionais (66°C ; 0,22m/s), (80°C ; 0,50m/s) e (94°C ; 0,78) que, de acordo com o planejamento experimental, correspondem aos valores codificados (-1,4;-1,4), (0;0) e (+1,4;+1,4), comparando-os ao papel seco naturalmente ao ar livre. O teste de Tukey foi utilizado nesta análise a fim de se verificar se as médias obtidas para cada ensaio apresentaram uma variação estatisticamente significativa, com um intervalo de confiança de 95%.

Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)

Os baixos valores obtidos para o teor de umidade final do papel apresentados na Tabela 4.28 indicam que a secagem convectiva, tanto a natural quanto a forçada, foi eficiente. Os desvios calculados a partir de uma média de cinco medidas realizadas em cada tela são relativamente elevados se comparados com o valor médio. Entretanto, estes valores ainda podem ser considerados baixos em termos absolutos, visto que estes desvios não provêm de erros de medida, mas, sim, de uma não uniformidade da umidade presente no papel. Os índices 1 e 2 representam ensaios em duplicata, enquanto que as letras N, A, B e C representam as condições operacionais dos ensaios de secagem, sendo estas, respectivamente, secagem natural, (66°C ; 0,22m/s), (80°C ; 0,50m/s) e (94°C ; 0,78m/s).

Tabela 4.28: Teor de umidade final (b.s.) das folhas secas em diferentes condições (kg/kg).

| | Tela1 | | Tela2 | | Tela3 | | Tela4 | | Tela5 | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Média | Desvio |
| (N1) Natural | 0,0239 | 0,0070 | 0,0173 | 0,0050 | 0,0112 | 0,0025 | 0,0105 | 0,0031 | 0,0036 | 0,0029 |
| (N2) Natural | 0,0435 | 0,0093 | 0,0316 | 0,0038 | 0,0214 | 0,0019 | 0,0148 | 0,0058 | 0,0161 | 0,0160 |
| (A1) (-1,4;-1,4) | 0,0352 | 0,0056 | 0,0238 | 0,0012 | 0,0241 | 0,0028 | 0,0207 | 0,0052 | 0,0092 | 0,0051 |
| (A2) (-1,4;-1,4) | 0,0362 | 0,0078 | 0,0184 | 0,0028 | 0,0098 | 0,0064 | 0,0088 | 0,0057 | 0,0068 | 0,0031 |
| (B1) (0;0) | 0,0308 | 0,0073 | 0,0182 | 0,0065 | 0,0126 | 0,0036 | 0,0131 | 0,0059 | 0,0121 | 0,0024 |
| (B2) (0;0) | 0,0245 | 0,0088 | 0,0241 | 0,0055 | 0,0196 | 0,0043 | 0,0091 | 0,0048 | 0,0093 | 0,0027 |
| (C1) (+1,4;+1,4) | 0,0282 | 0,0100 | 0,0098 | 0,0034 | 0,0138 | 0,0048 | 0,0500 | 0,0017 | 0,0044 | 0,0033 |
| (C2) (+1,4;+1,4) | 0,0192 | 0,0058 | 0,0151 | 0,0080 | 0,0105 | 0,0041 | 0,0138 | 0,0059 | 0,0084 | 0,0014 |

Gramatura média (g/m^2)

O valor de gramatura do papel (Tabela 4.29) foi determinado a partir de uma média de sete medidas experimentais realizadas para cada tela, utilizando-se amostras de dois ensaios distintos (duplicata) realizados em três condições operacionais ($66^\circ\text{C}; 0,22\text{m/s}$), ($80^\circ\text{C}; 0,50\text{m/s}$) e ($94^\circ\text{C}; 0,78\text{m/s}$), comparando-os ao papel seco naturalmente ao ar livre. As médias seguidas de expoente com mesma letra não diferiram significativamente ao nível de probabilidade de 5%, segundo o teste de Tukey.

Tabela 4.29: Resultados da análise da gramatura média (g/m^2).

| | Tela1 | | Tela2 | | Tela3 | | Tela4 | | Tela5 | |
|-----------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-------------------------|--------|
| | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| (N) Natural | 324,17 ⁿ | 8,63 | 274,92 ⁿ | 13,92 | 238,79 ⁿ | 10,84 | 260,74 ⁿ | 14,52 | 285,78 ⁿ | 10,79 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 184,90 ^{a,b} | 11,7 | 192,60 ^{a,c} | 8,52 | 195,94 ^a | 11,23 | 200,50 ^a | 12,47 | 186,51 ^{a,b} | 9,04 |
| (B) (0;0) | 180,69 ^{a,b} | 8,08 | 215,20 ^b | 8,6 | 157,70 ^{b,c} | 6,48 | 162,58 ^{b,c} | 6,77 | 174,04 ^{a,b,c} | 11,06 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 160,34 ^c | 10,3 | 180,01 ^{a,c} | 9,78 | 156,24 ^{b,c} | 6,69 | 164,04 ^{b,c} | 9,14 | 170,01 ^{b,c} | 8,54 |

A Figura 4.54 apresenta a influência das condições de secagem na gramatura final do papel para a tela 1. Verifica-se uma diferença significativa da gramatura final do papel seco ao natural em relação ao papel seco no secador convectivo, indiferente da condição operacional utilizada. De acordo com o teste de Tukey, os valores médios obtidos para as folhas de papel secas na condição mais branda ($66^\circ\text{C}; 0,22\text{m/s}$) e no ponto central ($80^\circ\text{C}; 0,50 \text{ m/s}$) não diferiram entre si. Entretanto, o papel seco na condição mais severa ($94^\circ\text{C}; 0,78 \text{ m/s}$) apresentou um menor valor de gramatura, se comparado às demais condições de secagem. Isto ocorre em virtude de uma maior porosidade do papel seco nesta condição. Portanto, para uma mesma área, obtém-se uma menor massa de papel. Comportamentos semelhantes foram obtidos para as demais telas (ver Anexo C), com pequenas diferenças entre si, o que reforça o conceito de que a posição da tela no secador influencia na secagem da tela.

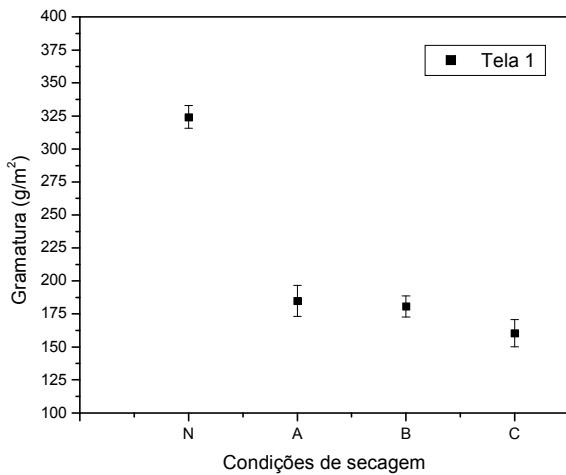


Figura 4.54: Influência das condições de secagem na gramatura média das folhas de papel para a tela 1. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Espessura Média (mm)

A espessura média das folhas de papel foi determinada a partir de uma média aritmética de vinte medidas experimentais, sendo dez medidas de cada ensaio em duplicata. As médias seguidas de expoente com mesma letra não diferiram significativamente ao nível de probabilidade de 5%, segundo o teste de Tukey.

Tabela 4.30: Resultados da análise da espessura média (mm).

| | Tela1 | | Tela2 | | Tela3 | | Tela4 | | Tela5 | |
|-----------------|---------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio | Média | Desvio |
| (N) Natural | 0,66 ⁿ | 0,01 | 0,65 ⁿ | 0,01 | 0,61 ⁿ | 0,01 | 0,61 ⁿ | 0,01 | 0,62 ⁿ | 0,01 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 0,49 ^{a,b} | 0,02 | 0,53 ^{a,c} | 0,05 | 0,49 ^{a,b,c} | 0,03 | 0,41 ^{a,b,c} | 0,04 | 0,51 ^{a,b} | 0,04 |
| (B) (0;0) | 0,50 ^{a,b} | 0,02 | 0,47 ^{b,c} | 0,09 | 0,49 ^{a,b,c} | 0,10 | 0,40 ^{a,b,c} | 0,03 | 0,47 ^{a,b,c} | 0,08 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 0,44 ^c | 0,04 | 0,49 ^{a,b,c} | 0,06 | 0,47 ^{a,b,c} | 0,07 | 0,41 ^{a,b,c} | 0,04 | 0,44 ^{b,c} | 0,05 |

A Figura 4.55 apresenta a influência das condições de secagem na espessura média do papel para a tela 1. De forma similar à gramatura, também se verifica uma diferença significativa da espessura média do papel seco ao natural em relação ao papel seco no secador convectivo. A maior espessura do papel seco ao natural pode estar associada à secagem mais lenta da folha nesta condição. Maiores valores de gramatura e

densidade aparente obtidos para o papel seco ao natural também devem ter contribuído para o aumento da espessura das folhas secas ao ar livre. Os valores médios obtidos para as folhas de papel secas na condição mais branda e no ponto central são estatisticamente iguais para a tela 1. O papel seco na condição mais severa apresentou um menor valor de espessura, se comparado às demais condições de secagem para a tela 1. Para as demais telas (ver Anexo C), as condições operacionais de secagem praticamente não influenciaram no valor final da espessura, verificando-se uma diferença apenas em relação ao tipo de secagem convectiva (natural ou forçada).

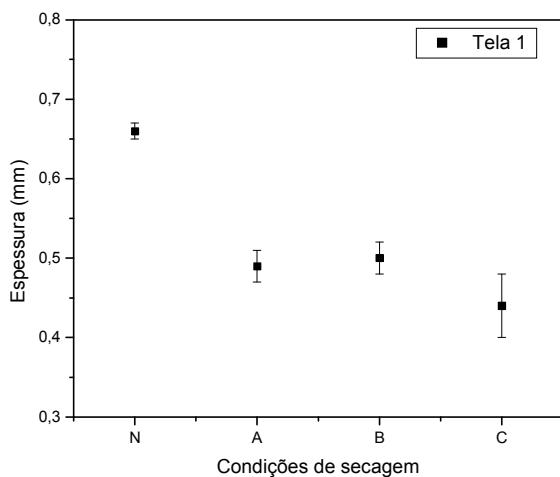


Figura 4.55: Influência das condições de secagem na espessura média das folhas de papel para a tela 1. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Densidade aparente

A densidade aparente do papel (Tabela 4.31) foi determinada utilizando-se uma balança hidrostática a partir de uma média de cinco medidas experimentais realizadas para cada tela, utilizando-se amostras de dois ensaios distintos (duplicata) realizados em três condições operacionais (-1,4;-1,4), (0;0) e (+1,4;+1,4), e comparando-as ao papel seco naturalmente ao ar livre. As médias seguidas de expoente com mesma letra não diferiram significativamente com um intervalo de confiança de 95%, segundo o teste de Tukey.

Tabela 4.31: Resultados da análise da densidade aparente (g/cm^3).

| | Tela1 | | Tela2 | | Tela3 | | Tela4 | | Tela5 | |
|------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | Média * | Desvio |
| (N1) Natural | 1,1185 ^{n,a} | 0,0273 | 1,1161 ^{n,a} | 0,0197 | 1,0897 ^{n,a} | 0,0111 | 1,0839 ^{n,a} | 0,0233 | 1,0933 ^{n,a} | 0,0215 |
| (N2) Natural | 1,0986 ^{n,a} | 0,0262 | 1,1028 ^{n,a} | 0,013 | 1,1026 ^{n,a} | 0,0258 | 1,0945 ^{n,a} | 0,017 | 1,1023 ^{n,a} | 0,0253 |
| (A1) (-1,4;-1,4) | 1,1115 ^{n,a} | 0,0441 | 1,0877 ^{n,a} | 0,0179 | 1,0893 ^{n,a} | 0,0252 | 1,0939 ^{n,a} | 0,0362 | 1,0762 ^{n,a} | 0,0437 |
| (A2) (-1,4;-1,4) | 1,1010 ^{n,a} | 0,0354 | 1,0848 ^{n,a} | 0,0291 | 1,0963 ^{n,a} | 0,0380 | 1,0796 ^{n,a} | 0,0460 | 1,0757 ^{n,a} | 0,0497 |
| (B1) (0;0) | 1,0258 ^b | 0,0204 | 1,0177 ^{b,c} | 0,025 | 1,0409 ^b | 0,0239 | 1,0201 ^{b,c} | 0,0158 | 1,0169 ^{b,c} | 0,0307 |
| (B2) (0;0) | 1,0407 ^b | 0,0338 | 0,9903 ^{b,c} | 0,0428 | 1,0200 ^b | 0,0383 | 0,9984 ^{b,c} | 0,0219 | 0,9949 ^{b,c} | 0,0167 |
| (C1) (+1,4;+1,4) | 0,9751 ^c | 0,0297 | 0,9625 ^{b,c} | 0,0334 | 0,9712 ^c | 0,0379 | 0,9917 ^{b,c} | 0,0217 | 0,9738 ^{b,c} | 0,0423 |
| (C2) (+1,4;+1,4) | 0,9705 ^c | 0,0147 | 0,9695 ^{b,c} | 0,0192 | 0,9899 ^c | 0,0371 | 0,9999 ^{b,c} | 0,0229 | 0,9729 ^{b,c} | 0,0173 |

A influência das condições de secagem na densidade aparente do papel ao final da secagem pode ser visualizada na Figura 4.56 para a tela 1. De forma similar às propriedades anteriores, verifica-se uma redução do valor da densidade aparente com o aumento das variáveis de secagem (temperatura e velocidade do ar). De acordo com o teste de Tukey, o papel seco na condição de secagem mais branda não apresentou uma diferença significativa no valor de densidade aparente se comparado ao papel seco naturalmente ao ar livre. Isto sugere que o papel seco a temperatura e a velocidade do ar mais baixas não sofre modificações tão severas quanto o papel seco em condições mais drásticas. Este comportamento também foi verificado no estudo do encolhimento do papel durante a secagem, no qual foram obtidos maiores valores de densidade aparente para o papel seco a 70°C. O fenômeno do enrijecimento da camada externa da folha fixando o volume final do material antes do término da secagem e a deformação das fibras contribuiu para a formação de um papel menos denso e mais poroso quando seco a altas temperaturas. Comportamentos semelhantes foram obtidos para as demais telas (ver Anexo C), com pequenas diferenças entre si, pois de acordo com a posição da tela no secador, o ar pode estar mais direcionado ou não, influenciando o tempo de secagem da polpa.

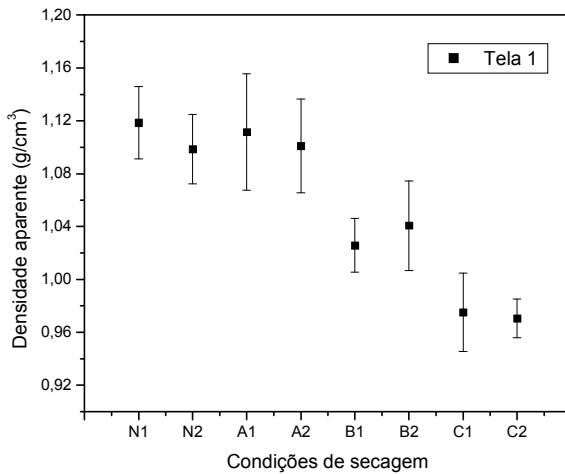


Figura 4.56: Influência das condições de secagem na densidade aparente das folhas de papel para a tela 1. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Densidade real

A densidade real do papel (Tabela 4.32) foi obtida a partir da análise de picnometria a Hélio, utilizando-se amostras de dois ensaios distintos (duplicata) realizados em três condições operacionais (-1,4;-1,4), (0;0) e (+1,4;+1,4), comparando-os ao papel seco naturalmente ao ar livre. Amostras provenientes das cinco telas foram reunidas em cada análise pela quantidade de material necessário para a análise. Este procedimento pode ser utilizado uma vez que o valor da densidade real é o mesmo em todas as telas para cada condição operacional de secagem, pois todas partiram de uma mesma polpa.

Tabela 4.32: Resultados da análise da densidade real.

| Condição operacional | Densidade real (g/cm³) |
|----------------------|------------------------|
| (N1) Natural | 1,7343 |
| (N2) Natural | 1,7615 |
| (A1) (-1,4;-1,4) | 1,7319 |
| (A2) (-1,4;-1,4) | 1,7135 |
| (B1) (0;0) | 1,7437 |
| (B2) (0;0) | 1,7278 |
| (C1) (+1,4;+1,4) | 1,7377 |
| (C2) (+1,4;+1,4) | 1,7090 |

A densidade real é uma propriedade que depende da natureza do material. Os valores obtidos de densidade real para as folhas secas em diferentes condições deveriam ser iguais, visto que se trata de um mesmo material. As diferenças encontradas no valor desta propriedade para folhas secas em condições diferentes podem estar associadas a pequenas variações na concentração de sólidos presente em cada polpa de papel utilizada para a formatação das folhas.

Porosidade

A porosidade das folhas de papel foi determinada a partir da Equação (3.5) apresentada no item 3.6.7. Para tanto foram utilizados os valores de teor de umidade (b.s.), densidade aparente e real apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.28, 4.31 e 4.32. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.33, onde cada valor representa uma média aritmética de cinco medidas experimentais. O teste de Tukey foi realizado nesta análise. As médias seguidas de expoente com mesma letra não diferiram significativamente com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.33: Resultados da análise da porosidade.

| | Tela1 | | Tela2 | | Tela3 | | Tela4 | | Tela5 | |
|------------------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | Média* | Desvio |
| (N1) Natural | 34,4026 ^{n,a} | 1,4448 | 34,8440 ^{n,a} | 0,9550 | 36,6565 ^{n,a} | 0,6122 | 37,0280 ^{n,a} | 1,3417 | 36,7909 ^{n,a} | 1,2891 |
| (N2) Natural | 35,6562 ^{n,a} | 1,7745 | 35,9380 ^{n,a} | 0,6471 | 36,4210 ^{n,a} | 1,4944 | 37,2417 ^{n,a} | 0,9982 | 36,9386 ^{n,a} | 1,4600 |
| (A1) (-1,4;-1,4) | 34,2162 ^{n,a} | 2,8134 | 36,1284 ^{n,a} | 1,0489 | 36,0203 ^{n,a} | 1,5997 | 35,8963 ^{n,a} | 2,3085 | 37,4492 ^{n,a} | 2,5753 |
| (A2) (-1,4;-1,4) | 34,1401 ^{n,a} | 2,2439 | 35,8797 ^{n,a} | 1,6617 | 35,5703 ^{n,a} | 2,4418 | 36,5996 ^{n,a} | 2,7804 | 36,9229 ^{n,a} | 2,8027 |
| (B1) (0;0) | 39,8693 ^b | 1,1398 | 40,8636 ^b | 1,3623 | 39,7492 ^b | 1,5167 | 40,9324 ^{b,c} | 1,1013 | 41,1622 ^{b,c} | 1,7412 |
| (B2) (0;0) | 38,7122 ^b | 2,3002 | 41,7011 ^b | 2,5445 | 40,1411 ^b | 2,3110 | 41,8382 ^{b,c} | 1,3128 | 42,0363 ^{b,c} | 0,9328 |
| (C1) (+1,4;+1,4) | 42,7560 ^c | 1,7200 | 44,2152 ^c | 1,8300 | 43,5483 ^c | 2,2286 | 42,7210 ^{b,c} | 1,1794 | 43,7792 ^{b,c} | 2,5609 |
| (C2) (+1,4;+1,4) | 42,4561 ^c | 0,8424 | 42,6805 ^c | 1,0033 | 41,6541 ^c | 2,2089 | 40,9296 ^{b,c} | 1,3112 | 42,7342 ^{b,c} | 1,0589 |

A Figura 4.57 apresenta a influência das condições de secagem na porosidade do papel para a tela 1. Verifica-se um aumento do valor da porosidade do papel com o aumento das variáveis de secagem (temperatura e velocidade do ar). De acordo com o teste

de Tukey, o papel seco na condição de secagem mais branda não apresentou uma diferença significativa no valor de porosidade se comparado ao papel seco em condições naturais para todas as cinco telas analisadas. Aumentando-se a temperatura e a velocidade do ar de secagem, verifica-se um aumento no valor da porosidade do papel, comprovando os resultados obtidos no estudo do encolhimento do papel durante a secagem, no qual foram obtidos maiores valores de porosidade para o papel seco a 90°C. Comportamentos semelhantes foram obtidos para as demais telas (ver Anexo C), sendo que para as telas 4 e 5 os valores médios de porosidade obtidos para as folhas de papel secas na condição de ponto central (80°C; 0,50 m/s) e na condição extrema (94°C; 0,78 m/s) não diferiram entre si.

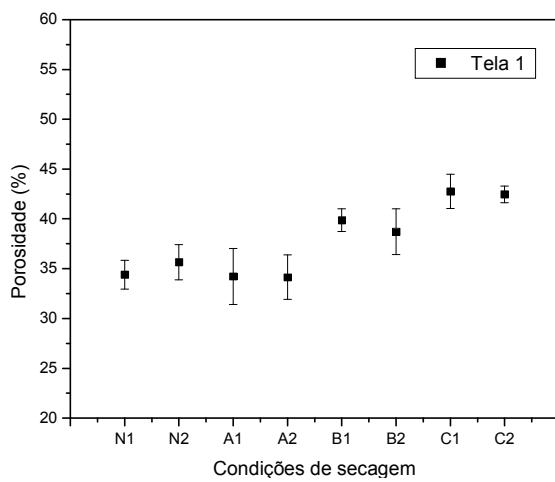


Figura 4.57: Influência das condições de secagem na porosidade das folhas de papel para a tela 1. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Resistência à tração e ao arrebentamento e alongamento

Dentre as diversas propriedades mecânicas usualmente requeridas para papel cartão, destacam-se o alogamento e os índices de tração, de arrebentamento e de rasgo. O índice de rasgo é uma propriedade intrínseca que está associada à dimensão das fibras. Neste trabalho, utilizou-se apenas um tipo de polpa, mantendo-se constante o tempo e a rotação de Trituração, o que resulta em um papel com fibras de dimensões semelhantes. Portanto, o índice de rasgo do papel não foi determinado, pois esta propriedade não é, em princípio, alterada pelas condições operacionais de secagem. Os resultados obtidos pela análise de resistência à tração e alongamento encontram-se na Tabela 4.34 e nas Figuras 4.58 e 4.59.

Tabela 4.34: Resultados da análise de resistência à tração e alongamento.

| Condição operacional | Resistência à tração | | Alongamento | | Índice de tração (Nm/g) |
|----------------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|----------------------------|
| | Média | Desvio | Média | Desvio | |
| (N) Natural | 4,51 ^{n,a,b,c} | 1,43 | 2,33 ^{n,a,b,c} | 0,55 | 22,44 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 5,17 ^{n,a,b,c} | 1,19 | 2,32 ^{n,a,b,c} | 0,41 | 23,82 |
| (B) (0;0) | 5,42 ^{n,a,b,c} | 0,89 | 2,66 ^{n,a,b,c} | 0,37 | 25,33 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 5,35 ^{n,a,b,c} | 0,69 | 2,43 ^{n,a,b,c} | 0,39 | 24,77 |

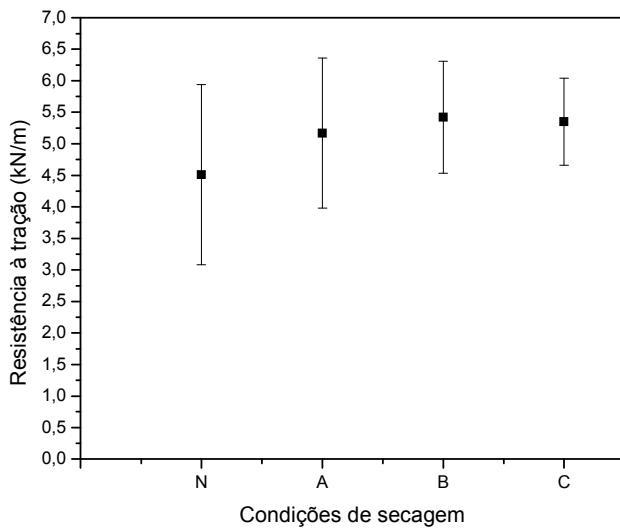


Figura 4.58: Influência das condições de secagem na resistência à tração das folhas de papel. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Embora não haja uma diferença significativa entre os valores obtidos de resistência à tração, verifica-se uma tendência crescente no valor desta propriedade com o aumento das condições operacionais de secagem. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.60 que apresenta a influência das condições de secagem na resistência ao arrebentamento das folhas.

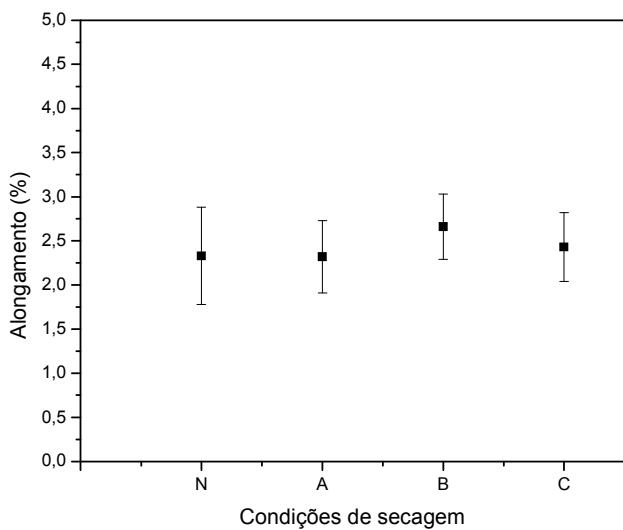


Figura 4.59: Influência das condições de secagem no alongamento das folhas de papel.

Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

O alongamento longitudinal das folhas do papel reciclado variou de 2,32 a 2,66%, não sendo influenciado pelas condições de secagem. Estes valores estão próximos aos obtidos com cartões reciclados fabricados a partir de embalagens cartonadas Longa Vida (2,3 a 2,8%). Entretanto, estes valores encontram-se bem abaixo dos obtidos para os cartões não-reciclados fabricados com celulose de fibra curta existentes no mercado brasileiro que variam de 4,4 a 5,6% (Neves, 2001).

Tabela 4.35: Resultados da análise de resistência ao arrebentamento.

| Condição operacional | Resistência ao arrebentamento (kPa) | | Índice de arrebentamento (kPam ² /g) |
|----------------------|-------------------------------------|--------|---|
| | Média | Desvio | |
| (N) Natural | 164,00 ^{n,a,b,c} | 43,17 | 0,82 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 229,20 ^{n,a,b,c} | 56,95 | 1,06 |
| (B) (0;0) | 203,00 ^{n,a,b,c} | 79,54 | 0,95 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 256,80 ^{n,a,b,c} | 32,08 | 1,19 |

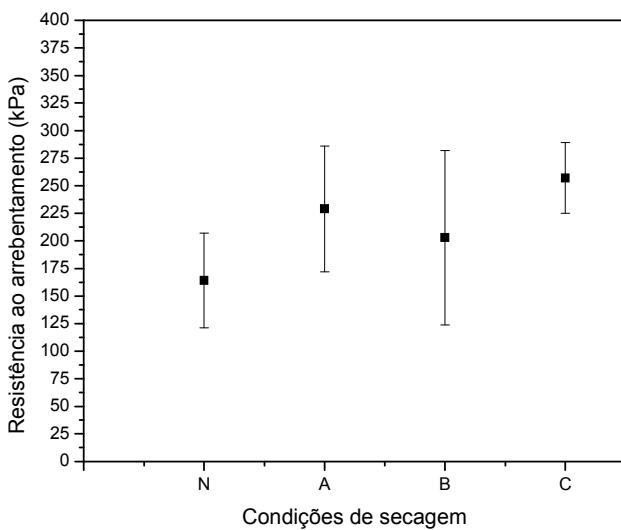


Figura 4.60: Influência das condições de secagem na resistência ao arrebentamento das folhas de papel. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Os valores dos cartões brasileiros obtidos no mercado situam-se entre 35 e 54 Nm/g para o índice de tração e entre 1,9 e 3,6kPam²/g para o índice de arrebentamento, enquanto que os valores obtidos em laboratório para o papel reciclado a partir de embalagens cartonadas Longa Vida variam de 54,4 a 61,5Nm/g para o índice de tração e entre 3,1 e 3,6kPam²/g para o índice de arrebentamento (Neves, 2001). Em termos de resistência mecânica, o papel fabricado neste trabalho apresentou menores índices de tração (22,44 a 25,33Nm/g) e de arrebentamento (0,82 a 1,19kPam²/g) se comparado aos cartões não-reciclados existentes no mercado brasileiro. Entretanto, os menores valores destas propriedades não chegam a inviabilizar o uso destes cartões para fins artesanais e decorativos, que são os mais empregados em pequenas cooperativas produtoras de papel reciclado no Brasil.

Estabilidade dimensional

Os resultados da análise da variação dimensional da folha de papel após a imersão de água encontram-se na Tabela 4.36. Embora não se tenha verificado uma influência significativa das condições operacionais de secagem nesta propriedade (de acordo com o Teste de Tukey), observa-se, a partir da Figura 4.61, uma tendência decrescente da variação

dimensional do papel após imersão em água com o aumento das variáveis operacionais de secagem. Isto significa que a secagem realizada a maiores valores de temperatura e velocidade do ar produz um papel mais resistente à variação de suas dimensões quando sujeito a oscilações do teor de umidade, ou seja, ele estará menos sujeito a problemas durante a impressão.

Tabela 4.36: Resultados da análise da variação dimensional do papel após imersão em água.

| Condição operacional | Variação dimensional (%) | |
|----------------------|--------------------------|--------|
| | Média | Desvio |
| (N) Natural | 2,26 ^{n,a} | 0,54 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 1,78 ^{n,a,b,c} | 0,66 |
| (B) (0;0) | 1,30 ^{a,b,c} | 0,00 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 1,30 ^{a,b,c} | 0,00 |

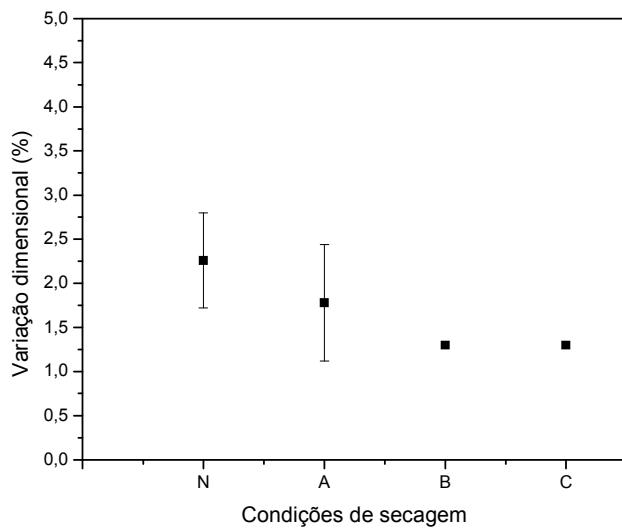


Figura 4.61: Influência das condições de secagem na variação dimensional das folhas de papel após imersão em água. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Absorção de água

A Tabela 4.37 apresenta os resultados da análise de ascensão de água por capilaridade. O grau de absorção do papel está relacionado com a resistência mecânica e a

porosidade do mesmo. De acordo com o teste de Tukey, verifica-se que uma diferença no valor desta propriedade apenas para o papel seco ao natural. Embora o papel seco ao natural tenha apresentado uma menor porosidade se comparada ao papel seco no secador, ele se mostrou menos resistente mecanicamente e menos estável quando sujeito a variações do teor de umidade. Isto pode estar associado a sua baixa resistência à penetração da água (Figura 4.62).

Tabela 4.37: Resultados da análise de ascensão de água por capilaridade.

| Condição operacional | Ascenção de água por capilaridade (mm) | |
|----------------------|--|--------|
| | Média | Desvio |
| (N) Natural | 40,60 ⁿ | 1,92 |
| (A) (-1,4;-1,4) | 19,28 ^{a,b,c} | 7,75 |
| (B) (0;0) | 13,70 ^{a,b,c} | 3,38 |
| (C) (+1,4;+1,4) | 16,50 ^{a,b,c} | 1,46 |

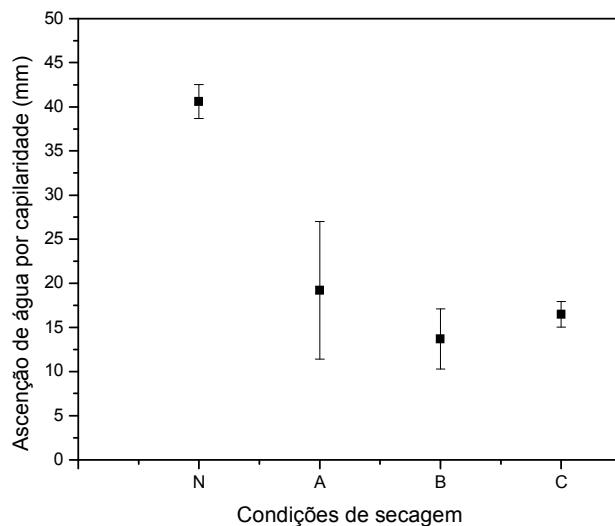


Figura 4.62: Influência das condições de secagem na ascensão de água nas folhas de papel por capilaridade. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Recomenda-se a aplicação de resinas sobre a superfície externa das folhas a fim de que evite a penetração da umidade nas folhas, prejudicando a sua utilização tanto de forma artesanal e decorativa como para demais fins.

Análise da superfície do papel

A Figura 4.63 mostra a superfície das folhas de papel secas ao natural e por convecção forçada no secador nas temperaturas de 70, 80 e 90°C. A velocidade de ar foi mantida constante em 0.7 m/s para analisar o efeito de temperatura na superfície de papel. Pode-se verificar a partir desta figura que uma superfície mais porosa e com maior rugosidade foi obtida para a secagem da folha de papel realizada a 90°C. As superfícies dos papéis secos em condições naturais e por convecção forçada a 70°C parecem ser mais homogêneas se comparadas aos demais secos a 80°C e 90°C, em virtude da deformação da folha sofrida durante a secagem a altas temperaturas. Isto comprova os resultados obtidos no estudo do encolhimento do papel durante a secagem, onde se verificou a ocorrência de modificações significativas de propriedades estruturais e uma baixa qualidade do produto para o papel seco a 90°C, indicando, assim, uma temperatura de secagem limite para a secagem convectiva do papel reciclado analisado.

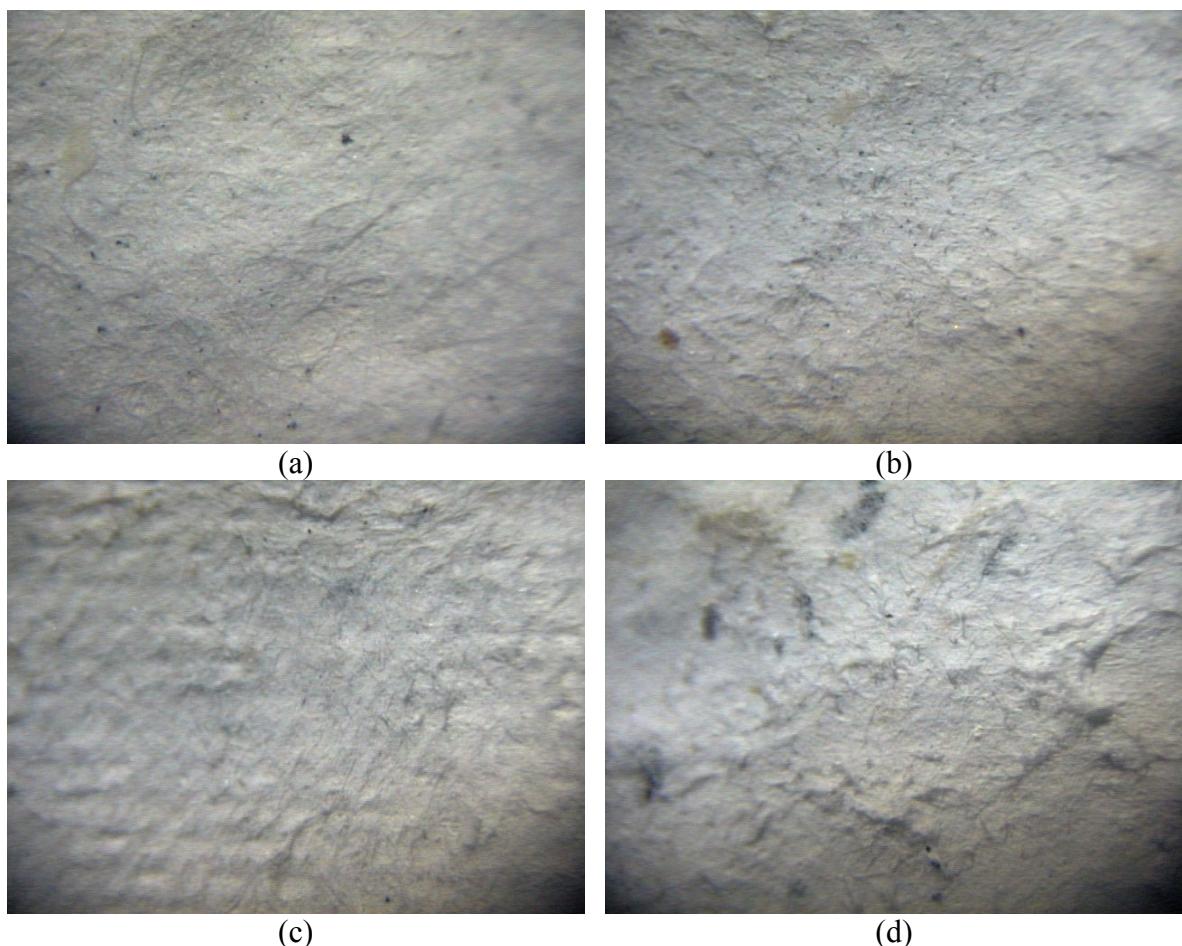


Figure 4.63: Fotos da superfície de folhas de papel analisadas pelo Microscópio Óptico secas: (a) condições naturais (50x); (b) 70°C (50x); (c) 80°C (50x); (d) 90°C (50x).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho pode-se concluir que:

- De acordo com as fotos da polpa de papel pelo microscópio óptico, as fibras apresentaram comprimento que variou entre 0,607 mm a 1,038mm, sendo então classificadas como fibras curtas. A partir das fotos obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) observou-se que o papel seco obtido apresenta um arranjo randômico de fibras emaranhadas.
- O secador projetado e utilizado neste trabalho mostrou-se adequado para a obtenção dos dados de secagem do papel reciclado tipo cartão, obtendo-se reproduzibilidade nos ensaios experimentais.
- A umidade relativa do ar na saída do secador manteve-se baixa, mesmo para as condições mais severas de secagem. Desse modo, pode-se ainda aproveitar esse ar acoplando-se outros módulos de secagem, a fim de secar mais folhas de papel; outra alternativa é a recirculação parcial do ar ainda não saturado.
- As curvas de cinética de secagem obtidas para a polpa de celulose de papel reciclado deste estudo apresentaram uma fase inicial, em torno de 5 minutos, uma fase de secagem à taxa constante e uma pequena fase de taxa decrescente. Os períodos de taxa constante e decrescente foram ajustados pelo modelo empírico de Page e pelo modelo similar à solução

da equação de Fick. Obteve-se um excelente ajuste de ambos os modelos aos pontos experimentais.

- Baseado no perfil das curvas de taxa de secagem, o papel foi classificado de acordo com LUIKOV (1968) como um material capilar-poroso, com uma grande área superficial de evaporação. Além disso, ele também pode ser considerado como não higroscópico.
- A análise estatística permitiu uma abordagem quantitativa da influência das condições operacionais do processo de secagem da polpa do papel reciclado. Concluiu-se que para as duas variáveis respostas analisadas, a velocidade do ar (termo linear) influí de forma mais significativa quando comparado com a variação da temperatura (termo linear). As variáveis do processo analisadas, temperatura e velocidade do ar, influenciam positivamente, reduzindo o tempo de secagem. O incremento destas variáveis reduz o teor de umidade final do papel e aumenta as taxas de secagem inicial e constante.
- A análise estatística dos modelos empíricos pela tabela ANOVA e pelo teste F mostra que os modelos obtidos não apresentaram falta de ajuste, sendo preditivos para correlacionar as variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar) e a variável resposta (teor de umidade final). O Teste F e os gráficos de distribuição de resíduos mostram que os valores obtidos foram concordantes com os experimentais e os resíduos se distribuíram de forma aleatória, indicando que os modelos representam adequadamente as variações nesta faixa de valores.
- A qualidade final do papel é prejudicada para maiores valores de velocidade e temperatura do ar de secagem. Em condições mais severas a superfície do papel tem aspecto menos uniforme e mais ressecado.
- As isotermas de dessorção do papel obtidas pelo equipamento Dynamic Vapour Sorption 2 (DVS) foram classificadas como tipo II (BET), caracterizada por um processo de sorção

multi-camada. Verificou-se na região de condensação capilar um aumento significativo da umidade de equilíbrio do papel na condição de secagem mais branda (70°C ; 0,30m/s). O papel seco em condições mais severas (90°C ; 0,70m/s) apresenta poros mais fechados, resultando em um menor teor de umidade de equilíbrio quando submetido à atmosfera mais úmida. Verificou-se também, que a um valor de umidade relativa constante, o aumento da temperatura reduz o teor de umidade de equilíbrio do papel nas três condições analisadas. Um limite seguro para o armazenamento do papel reciclado é 60% de umidade relativa ambiente, para temperaturas superiores a 25°C . A Equação de GAB permitiu o melhor ajuste dos dados de sorção do papel até a umidade relativa de 90%.

- A secagem realizada nas condições operacionais mais brandas, ou seja, baixos valores de temperatura e velocidade do ar de secagem, apresentou maiores eficiências, tanto em termos de evaporação (E_{ev}) e convecção (E_{conv}), quanto em termos energéticos (EE e ES), além de exigir um menor consumo de ar por cada kg de água evaporada, sendo comparável aos valores obtidos para secadores convectivos contínuos industriais e superior aos obtidos para secadores de papel, que variam em torno de 20%.
- O papel seco ao natural apresentou uma boa qualidade sob o ponto de vista visual, com uma superfície uniforme. Verificou-se um aumento significativo do tempo de secagem e uma forte dependência do teor de umidade final e das taxas de secagem com a umidade relativa do ambiente.
- O encolhimento superficial e volumétrico do papel reciclado durante a secagem foi linearmente correlacionado com o teor de umidade do material. Um pequeno desvio da linearidade foi observado no comportamento da redução do volume para $X/X_0 < 0,2$. A contração da espessura da folha de papel foi melhor correlacionada como uma função logarítmica do teor de umidade. O papel sofreu uma deformação considerável na direção das fibras quando seco à temperatura de 90°C . Portanto, a redução de volume durante a secagem foi mais pronunciada para a secagem na temperatura mais elevada.

-
- A densidade aparente foi influenciada pela temperatura do ar de secagem. Maiores densidade foram obtidas para temperaturas mais baixas, para um dado teor de umidade na faixa de $0 < X/X_0 < 0,4$. Os valores de densidade aparente aumentaram durante a secagem para baixos teores de umidade. Para razões de umidade superiores a 0,4, a densidade aparente mantém-se praticamente inalterada.

 - A evolução da porosidade foi calculada usando um modelo trifásico. A remoção da água durante a secagem provocou um aumento nos valores de porosidade. Para um dado teor de umidade, um papel mais poroso foi obtido a altas temperaturas, como uma consequência do fenômeno de endurecimento da camada externa e da contração irregular das fibras, provocando a deformação do papel. A porosidade do material foi bem correlacionada por uma função exponencial do teor de umidade.

 - A análise de folhas de papel pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) indicou uma superfície mais homogênea e menos porosa para aquelas secas a 70°C, assim como uma superfície mais deformada para aquelas secas a 90°C. Folhas de papel secas a altas temperaturas tornaram-se rígidas e ressecadas, apresentando uma má qualidade, se comparada às folhas secas a 70 e 80°C.

 - A análise de distribuição de tamanho de poros indicou a presença de duas regiões distintas de diâmetro de poros: uma região de macroporos, $5,0\mu\text{m} < d_{\text{poro}} < 85,0\mu\text{m}$ e uma região predominantemente de mesoporos, $0,0067\mu\text{m} < d_{\text{poro}} < 0,0628\mu\text{m}$.

 - A histerese obtida pela intrusão-extrusão de mercúrio no papel reciclado pode ser classificada como Tipo H3, segundo a classificação da IUPAC (1985) e o efeito e a extensão da histerese foram mais pronunciados para o papel seco a 90°C.

 - Como conclusão geral deste trabalho sobre a morfologia do material, pode-se inferir que o encolhimento e a evolução da porosidade durante a secagem, assim como a análise da

qualidade da superfície (MEV), apresentaram resultados similares para os papéis secos a 70 e 80°C. Modificações significativas de propriedades estruturais e uma baixa qualidade do produto foram verificadas para o papel seco a 90°C, indicando, assim, uma temperatura de secagem limite para a secagem convectiva do papel reciclado analisado.

- As condições de secagem influenciaram as propriedades do papel reciclado. Maiores valores de espessura, gramatura e densidade aparente e uma menor porosidade foram obtidos para o papel seco naturalmente ao ar livre, se comparado ao papel seco no secador. Na secagem convectiva forçada, um aumento nas variáveis operacionais (temperatura e velocidade do ar) produziu um papel mais poroso, com menores valores de espessura, gramatura e densidade aparente. Verificou-se, também, que o papel seco nas condições mais brandas (66°C; 0,22m/s) apresentou características semelhantes ao papel seco ao natural. Assim, pode-se obter um papel reciclado tipo cartão com uma qualidade adequada utilizando o secador convectivo, reduzindo-se sensivelmente o tempo necessário para a secagem da folha.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Dando continuidade ao estudo do processo de secagem de polpa de celulose para a fabricação de papel reciclado, têm-se as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Variar a formulação da polpa, adicionando corantes à base de produtos naturais, tais como sementes e folhas, alterar a concentração de sólidos da polpa, adicionar agentes alisadores, etc.
- Verificar a influência do tempo de Trituração da polpa na qualidade final do papel.
- Variar a faixa de estudo da variável velocidade do ar para uma faixa mais próxima da realidade, em torno de 6m/s.
- Otimizar a formulação e as condições operacionais de secagem, baseando-se em critérios energéticos e de qualidade.

- Aumentar o número de módulos no secador, acoplando mais cinco telas, uma vez que o ar de saída do secador não se encontra completamente saturado, podendo ainda ser aproveitado. Outra sugestão seria a recirculação parcial do ar de saída.
- Efetuar o scale-up do equipamento, visando a sua utilização em “pequena” escala industrial.
- Contactar pequenas cooperativas produtoras de papel reciclado e acompanhar a construção de uma unidade no local, verificando, também, outras fontes de energia mais baratas para o aquecimento e bombeamento do ar de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, A. R. Papel reciclado para um desenvolvimento sustentável. Relatório de Estágio. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, 2001.
- ARÉVALO-PINEDO, A.; GIRALDO-ZUNIGA, A. D.; SANTOS, F. L.; ARÉVALO, Z. D. S and ARÉVALO, R. P. Sorption isotherms experimental data and mathematical models for murici pulp (*Byrsonina sericea*). Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol B, p. 1241-1248, 2004.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W. and BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. Journal of Food Engineering, 55, p. 323-330, 2002.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Ed. UNICAMP, p. 3, 2001.
- BAUTISTA, R. C.; SIEBENMORGGEN, T. J.; CNOSEN, A. G. Fissure formation. Characterization in rice kernels using video microscopy. Proceedings of 12th International Drying Symposium IDS 2000, Elsevier Science, Amsterdam, 2000. Em CD-ROM.
- BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e papel. Disponível em: <<http://www.bracelpa.pt>>. Acesso em: 20 jun. 2003.
- BRUIN, S. and LUYBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: a review of recent developments. In: Advances in drying, ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v. 1, 155-215, 1980.
- BRUNAUER, S.; EMMET, P. H. and TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of American Chemical Society, v. 60, p. 309-319, 1938.
- BYSTRÖM, S.; LÖNNSTEDT, L. Paper recycling: a discussion of methodological approaches. Resources, Conservation and Recycling, vol. 28, p. 55-65, 2000.

- CARVALHO, S. M. L. Gerenciamento de resíduos hospitalares e avaliação da secagem como método de redução de volume e grau de periculosidade. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2003.
- CAVALCANTE, J. A. Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha *Sargassum* sp. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2003.
- CELPA. Associação Nacional da Indústria papeleira Disponível em: <<http://www.celpa.pt>>. Acesso em: 20 junho. 2003.
- CELULOSE ON LINE. Informações e negócios no mundo da celulose. Introdução ao processo de obtenção de celulose. Disponível em: <<http://www.celuloseonline.com.br>>. Acesso em: 25 jan.. 2004.
- CEMPRE. Compromisso empresarial para reciclagem Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>> Acesso em: 25 jan.. 2004.
- CETEA-LEC. Centro de Tecnologia de Embalagem – Laboratório de Embalagens Celulósicas. Disponível em: <<http://www.cetea.ital.org.br/cetea/lec.html>> Acesso em: 20 junho. 2003.
- COLLINS, F. and SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, p. 1401-1406, 2000.
- COMITRE, V. O consumo de energia no setor de papel e celulose e impactos na agricultura. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1999.
- COOK, E. M.; DUMONT, H. D. Process drying practice. New York: Mc Graw-Hill, 1991.
- COUMANS, W. J. and KRUF, W. M. A. Transport parameters and shrinkage in paper drying. *Drying'94. Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS'94)*, ed. V. Rudolph e R. B. Keey, Hemisphere Publ., p. 1205-1212, 1994.
- COUMANS, W. J. e KRUF, W. M. A. Mechanistic and lump approaches of internal transport phenomena during drying of paper sheet. *Drying Technology*, vol. 13, nº 4, p. 985-998, 1995.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. Pergamon Press, Oxford, 1975.

- DEWETTINCK, K.; MESSENS, W.; DEROO, L. and HUYGHEBAERT, A. Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gelatin and starch hydrolysate. *Lebensm-Wiss. U-Technol.*, 32, p. 102-106, 1999.
- DULLIEN, F. A. L. *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. USA: Academic Press, 2. ed., 1992, 574p.
- DVS user guide/manual V.9.0 – Surface Measurement Systems, SMS Ltda. 1997-2000, 18p.
- FARDIM, P. E. Composição química da superfície da polpa Kraft de Eucaliptus: caracterização e influências nas propriedades físicas e físico-químicas das fibras. Tese de Doutorado. Campinas: Instituto de Química, UNICAMP, 1999.
- FARIA, L. J. G. Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em leito fixo. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 1998.
- FERLIN, P. Le séchage dans les industries: Théorie du séchage. Choix et dimensionnement d'un séchoir. Polycopié de l'Option Gene Chimique et Agro-Alimentaire. ECOLE CENTRALE DE PARIS, 1998.
- FONSECA, M. G. D. Estudo da competitividade de cadeias integradas no Brasil: impactos das zonas de livre comércio. Cadeia: Papel e Celulose. Disponível em: <http://www.eco.unicamp.br/neit/cadeias_integradas/NT_FINAL_Papel_e_Celulose> Acesso em: 20 jun. 2003.
- FORTE GIL, M. A.; PIETROBON, C. L. R e PEREIRA, N. C. Reciclagem de papel utilizando métodos artesanais. V Encontro Anual de Iniciação Científica – CNPq/UEL/UEM/UEPG/UNIOESTE, Londrina – PR, 1996.
- GROSSI, M. G. L.; VALENTE, J. P. S. Educação ambiental. FUNDACENTRO-São Paulo. Universidade Estadual Paulista – UNESP/ Botucatu. Instituto de Biociências, 129 p, 2001.
- GUIMARÃES, L. T. Utilização do sistema de informação geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na bacia do Paquequer, Teresópolis – RJ, Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2000.

- HATAMIPOUR, M. S.; MOWLA, D. Correlations for shrinkage, density and diffusivity for drying of maize and green peas in a fluidized bed with energy carrier. *Journal of Food Engineering*, 59, p. 221-227, 2003.
- HATAMIPOUR, M. S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, vol. 55, 3, p. 247-252, 2002.
- INFOINVEST. Disponível em: <<http://www.infoinvest.com.br/modulos>>. Acesso em: 03 nov. 2005.
- ISO 5635:1978 – Papel e papelão – Determinação da variação dimensional após imersão em água.
- ISLAM, Md. R.; MUJUMDAR, A. S. Role of product shrinkage in drying rate predictions using a liquid diffusion model. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol. 30, nº3, p. 391-400, 2003.
- IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. Physical Vhemistry Division. Commission on colloid and surface chemistry including catalysis. Reporting Physiosorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure & Appl. Chem.*, 57(4), p. 603-619, 1985.
- KATEKAWA, M. E and SILVA, M. A. Study of porosity behavior in convective drying of bananas. *Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol B, p. 1427-1434, 2004.
- KEEY, R. B. Drying of loose and particle materials. New York: Hemisphere Publishing Corporation, p. 247-251, 1992.
- KEEY, R. B. Drying: principles and practice, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- KORAN, Z. The evolution of the structure and properties of paper during dewatering and drying. *Drying of solids*. Ed. A.S. MUJUMDAR, p. 96-113, 1990.
- LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. *Food Technology*, vol. 22, Nº3, p. 263-272, 1968.
- LEHTINEN, J. Condebelt drying of paper and paperboard for optimizing quality and production for many grades. *Drying Technology*, vol. 13, nº 8-9, p. 2049-2068, 1995.

- LEWICKI, P. P. and JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, nº 64, p. 307-314, 2004.
- LIMA, A. C. C. Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. Dissertação de Mestrado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 1998.
- MARINOS-KOURIS, D. and MAROULIS, Z. B. Transport Properties in the Drying of Solids. *Handbook of Industrial Drying*. Ed. A. S. MUJUMDAR, vol. 1, p. 113-159, 1995.
- MAROULIS, Z. B.; KROKIDA, M. K.; RAHMAN, M. S. A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying. *Journal of Food Engineering*, 52, p. 47-52, 2002.
- MASKAN, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, p. 177-182, 2001.
- MAY, B. K. and PERRÉ, P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 54, p. 271-282, 2002.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, vol.61, p. 373-386, 2004.
- Mc CORMICK, P. Y. Solids drying fundamentals. In: PERRY, R. H. and CHILTON, C. H. *Chemical engineer's handbook*. Mc Graw-Hill Co. 5ed. Sec. 20-4, 1983.
- McMINN, W. A. M. and MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – Part I. *Journal of Food Engineering*, 33, p. 37-48, 1997.
- MIDILLI, A., KUCUK, H. and YAPAR, Z., A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, No. 7, 1503-13, 2002.
- MOTA LIMA, O. C.; MIOTTO, D. M. M., ROSA, J. C. e LIMA, S. M. Estudo sobre a secagem de papel IV: Uma análise dos perfis de temperatura. *Anais do XXIV Congresso de Sistemas Particulados (XXIV ENEMP)*, vol. 1, p. 357-362, Uberlândia, 1996a.

- MOTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C. e FORTEL GIL, M. A. Alguns aspectos da secagem de papel artesanal. Anais do XXV Congresso de Sistemas Particulados (XXIV ENEMP), vol. 1, p. 363-368, Uberlândia, 1996b.
- MOTA LIMA, O. C. e FORTEL GIL, M. A. Alguns aspectos da secagem de papel artesanal II: Análise da secagem convectiva. Anais do XXV Congresso de Sistemas Particulados (XXV ENEMP), vol. 2, p. 639-646, São Carlos, 1997a.
- MOTA LIMA, O. C.; MACHADO, M. A. L. S. e OLIVEIRA, V. M. Estudo sobre a secagem de papel V: Secagem condutiva/convectiva com ar ambiente em convecção forçada. Anais do XXV Congresso de Sistemas Particulados (XXV ENEMP), vol. 2, p. 647-653, São Carlos, 1997b.
- MOTA LIMA, O. C.; MASSARANI, G.; PEREIRA, N. C. e MACHADO, M. A. L. S. Estudo sobre a secagem de papel VI: Secagem condutiva/convectiva com ar ambiente em convecção forçada. Anais do XXVI Congresso de Sistemas Particulados (XXVI ENEMP), vol. 2, p. 429-436, Teresópolis, 1998.
- MOTA LIMA, O. C.; MASSARANI, G.; PEREIRA, N. C. e MACHADO, M. A. L. S. Taxas de secagem condutiva/convectiva de papel com ar ambiente em convecção forçada. Anais do XXVII Congresso de Sistemas Particulados (XXVII ENEMP), p. 525-532, Campos do Jordão, 1999.
- MOTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C. and MACHADO, M. A. L. S. Generalized drying rate curves in paper drying. Drying 2000. Proceedings of the 12th International Drying Symposium (IDS'2000). Noordwijkerhout, Holanda, 2000a.
- MOTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C. and MACHADO, M. A. L. S. Generalized drying curves in conductive/convective paper drying. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 17, nº 4-7, p. 539-547, Dec 2000b.
- MOTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C. e MENDES, E. S. Curvas generalizadas na análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. Anais do XXX Congresso de Sistemas Particulados (XXX ENEMP), São Carlos, 2002.
- MOTA LIMA, O. C.; MACHADO, G. D.; LUCHEIS, R. M. and PEREIRA, N. C. Moisture equilibrium isotherms for a handmade kraft paper. Drying 2004. Proceedings of

the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol B, p. 1241-1248, 2004.

MOTA LIMA, O. C.; ROCHA, S. A.; TOFOLI, C. M; SOUZA, L. H. C. D. and PEREIRA, N. C. Heat transfer of short- and long-fiber cellulose. Proceedings of the 3rd Inter-American Drying Conference, 2005 (ISSN 0771706340) CD-ROM.

MUJUMDAR, A. S. Innovation in drying. Drying Technology, vol. 14, nº 6, p. 1459-1475, 1996.

MUJUMDAR, A. S.; MENON, A. S. Drying of solids: Principles, Classification and Selection of Dryers. Handbook of Industrial Drying. Ed. A. S. MUJUMDAR, vol. 1, p. 1-40, 1995.

NAZHAD, M. and PASZNER, L. Temperature effect on paper recycling. Drying'94. Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS 94), ed. V. Rudolph e R. B. Keey, Hemisphere Publ., p. 1239-1246, 1994.

NBR NM ISO 1924-2:2001 – Papel e papelão – Determinação da resistência à tração e alongamento. Método de velocidade constante.

NBR NM ISO 2758:2001 – Papel e papelão – Determinação da resistência ao arrebentamento.

NBR NM ISO 8787:2001 – Papel e papelão – Determinação da absorção de água por capilaridade.

NEVES, F. L. Efeito da reciclagem nas características físico-mecânicas de cartões multifolhados obtidos a partir de embalagens longa vida. O Papel, pp. 28-37, 2001. Disponível em: <<http://www.tetrapak.com.br>> Acesso em 29/11/05.

OCHOA, M. R.; KESSELER, A. G.; PIRONE, B. N.; MÁRQUEZ, C. A. and De MICHELIS, A. Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa Rubiginosa* L.) fruits. Lebensm. – Wiss. U-Technol., 35, p- 400-406, 2002.

OWER, E. E PANKHURST,R. C. The Measurement of Air. Pergamon Presse, 5 ed., p. 362, 1977.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. Basic process calculations in drying. Handbook of Industrial Drying. Ed. A. S. MUJUMDAR, vol. 1, p. 71-112, 1995.

- PALTAKARI, J. T. Experimental study of the effect of dryer configuration on internal temperature and moisture profiles in the sheet during cyclic contact drying. Drying 2000. Proceedings of the 12th International Drying Symposium (IDS`2000). Noordwijkerhout, Holanda, 2000.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M. e BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus Sp.*) em fatias. Ciênc. Tecnol. Aliment., vol.21, Nº 3, Campinas, 2001. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 20 abril 2005.
- PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review, Journal of Agricultural Engineering Researches, 32: 1-29, 1985.
- PASSOS, M. L.; TRINDADE, A. L. G.; d'ANGELO, J. V. H. and CARDOSO, M. Drying of black liquor in spouted bed of inert particles. Drying Technology, vol.22, Nº5, p. 1041-1067, 2004.
- PEÑA, L. M. R. Estudo de pré-tratamentos para a obtenção de tomate desidratado em fatias. Dissertação de Mestrado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 1999.
- PIKULIK, I. I. and POIRIER, N. A. Combined convective and conductive drying of paper. Drying'94. Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS`94), ed. V. Rudolph e R. B. Keey, Hemisphere Publ., p. 1163-1170, 1994.
- POIRIER, N. A and PIKULIK, I. I. The effect of drying temperature on the quality of paper. Drying'96. Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS`94), ed. C. Strumilo e Z. Pakowski, Hemisphere Publ., p. 1189-1196, 1996.
- PRADO, M. M. e SARTORI, D. J. M. Estudo do fenômeno de encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, vol. 21 (1), p. 11-20, 2002.
- RAGHAVAN, V. G. S.; RENNIE, T. J.; SUNJKA, P. S.; ORSAT, V.; PHAPHUANGWITTAYAKUL, W. and TERDTOON, P. Energy aspects of novel techniques for drying biological materials. Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol B, p. 1021-1028, 2004.

- RAMESH, M.N. Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Lebensm. – Wiss. U-Technol.*, 36, p- 245-255, 2003.
- RECICLA. Disponível em: <<http://www.abre.org.br/recicla.htm>>. Acesso em: 25 jan. 2004.
- RECIPAC. Associação Nacional de Recuperação e Reciclagem de Papel e Cartão Disponível em: <<http://www.recipac.pt>>. Acesso em: 25 jan. 2004.
- ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C, and VIOLLAZ, P.E. Drying of Foods: Evaluation of a Drying Model. *Journal of Food Engineering*, 26, p. 1-12, 1995.
- RUEFF, M. and FALOUI, F. Influence of sheet structure and process conditions on paper drying. *Drying'94. Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS'94)*, ed. V. Rudolph e R. B. Keey, Hemisphere Publ., p. 1221-1228, 1994.
- SERRA-TOSIO, J. M.; REVERDY-BRUAS, N. and CHAVE, Y. Development of na experimental method to evaluate the paper making potential of pulps dried with diffrent conditions. *Proceedings of the 3rd Inter-American Drying Conference*, 2005 (ISSN 0771706340) CD-ROM.
- SHERWOOD, T. K. The drying of solids II. *Industrial and Engineering Chemistry*. v.21, nº10, p. 976-980, oct. 1929.
- SIMAL, S.; ROSSELÓ, C.; BERNA, A. and MULET, A. Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37, p. 423-435, 1998.
- SOKHANSANJ, S. Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in drying*, v. 3, Hemisp. Publishing Co., 1984.
- STENSTRÖM, S. Product engineering by the paper drying. *Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol A, p. 89-98, 2004.
- STENZEL, M.; MOTA LIMA, O. C.; ALMEIDA, A. M. e PEREIRA, N. C. Secagem condutiva/convectiva de celulose em convecção forçada. *Anais do XXVIII Congresso de Sistemas Particulados (XXVIII ENEMP)*, Teresópolis, p. 453-460, 2001.
- STRUMLLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986.

- TALLA, A.; PUIGGALI, J. R.; JOMAA, W. and JANNOT, Y. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, vol.64, p. 103-104, 2004.
- UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.unicamp.com.br>>. Acesso em: 27 jan. 2004.
- VAXELAIRE, J.; BONGIOVANNI, J. M.; MOUSQUES, P. and PUIGGALI, J. R. Thermal drying of residual sludge. *Wat. Res.*, vol. 34, 17, p. 4318-4323, 2000.
- VIEIRA, M. G. A., ESTRELLA, L. and ROCHA, S. C. S. Análise da Cinética de Secagem de Papel Reciclado em Secador Convectivo. *Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, 24-27 de outubro (2004) CD-ROM, 2005a.
- VIEIRA, M. G. A., ESTRELLA, L. and ROCHA, S. C. Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper in convective drying. *Proceedings of the 3rd Inter-American Drying Conference*, Montreal, Aug., 2005b, CD-ROM.
- VIEIRA, M. G. A., ESTRELLA, L., SILVA, M. A. and ROCHA, S. C. S. Shrinkage of recycled paper sheet during drying. *Special Issue on Drying R&D in Brazil*, M. A. Silva and S. C. S. Rocha (eds), vol. 24, Nº 4, p. 465-474, 2006.
- WANG, N. and BRENNAN, J. G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, p. 61-76, 1995.
- WELTY, J. R.; WICKS, C. E. and WILSON, R. E. *Fundamentals of Momentum, heat and mass transfer*. 3rd ed, Ed. John Wiley & Sons, Inc., p. 756, 1984.
- YOUNG, J. H. Fiber preparation and approach flow. In *Pulp and paper: Chemistry and Chemical Technology*, 3rd Edition, vol. 2, Ed. James P. Casey, p. 869-880, 1980.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12(7), p. 1653-1666, 1994.
- ZUBEN, F. N. Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak. *Caderno de artigos*. 1996. Disponível em: <<http://www.tetrapak.com.br>>. Acesso em: 25 jan. 2004.

ANEXO A

Ensaio 1: X1 (-1) = 70°C, X2 (-1) = 0,30 m/s

Tabela A1: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 1.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $X_{0(b.s)}$ (kg/kg) | 12,745 | 12,059 | 10,173 | 11,065 | 11,396 |
| $X_{t(b.s)}$ (kg/kg) | 3,180 | 3,097 | 2,667 | 3,086 | 4,742 |
| $X_{cr(b.s)}$ (kg/kg) | 7,868 | 6,777 | 5,258 | 3,086 | 4,742 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 25,42 | 30,83 | 61,27 | 87,72 |
| $t_{secagem}$ (min) | 105,00 | 106,77 | 107,80 | 108,72 | 150,00 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

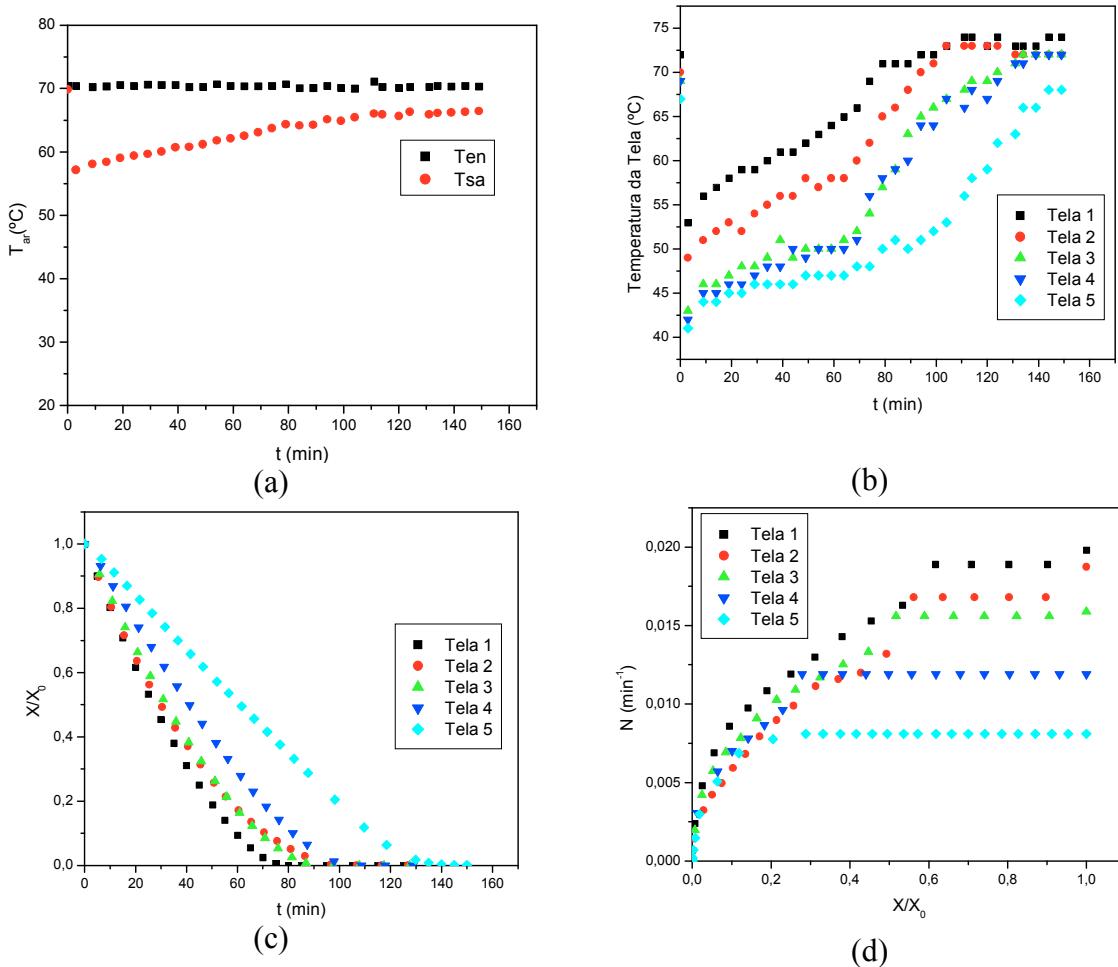


Figura A1: Curvas de secagem para o ensaio 1: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 2: X1 (-1) = 70°C, X2 (+1) = 0,70 m/s

Tabela A2: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 2.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 10,636 | 12,066 | 9,094 | 8,088 | 11,590 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,382 | 0,413 | 0,514 | 0,320 | 0,154 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,708 | 4,186 | 2,747 | 2,300 | 2,608 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 20,50 | 31,00 | 41,20 | 46,90 |
| $t_{secagem}$ (min) | 60,00 | 65,60 | 66,00 | 76,40 | 87,00 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

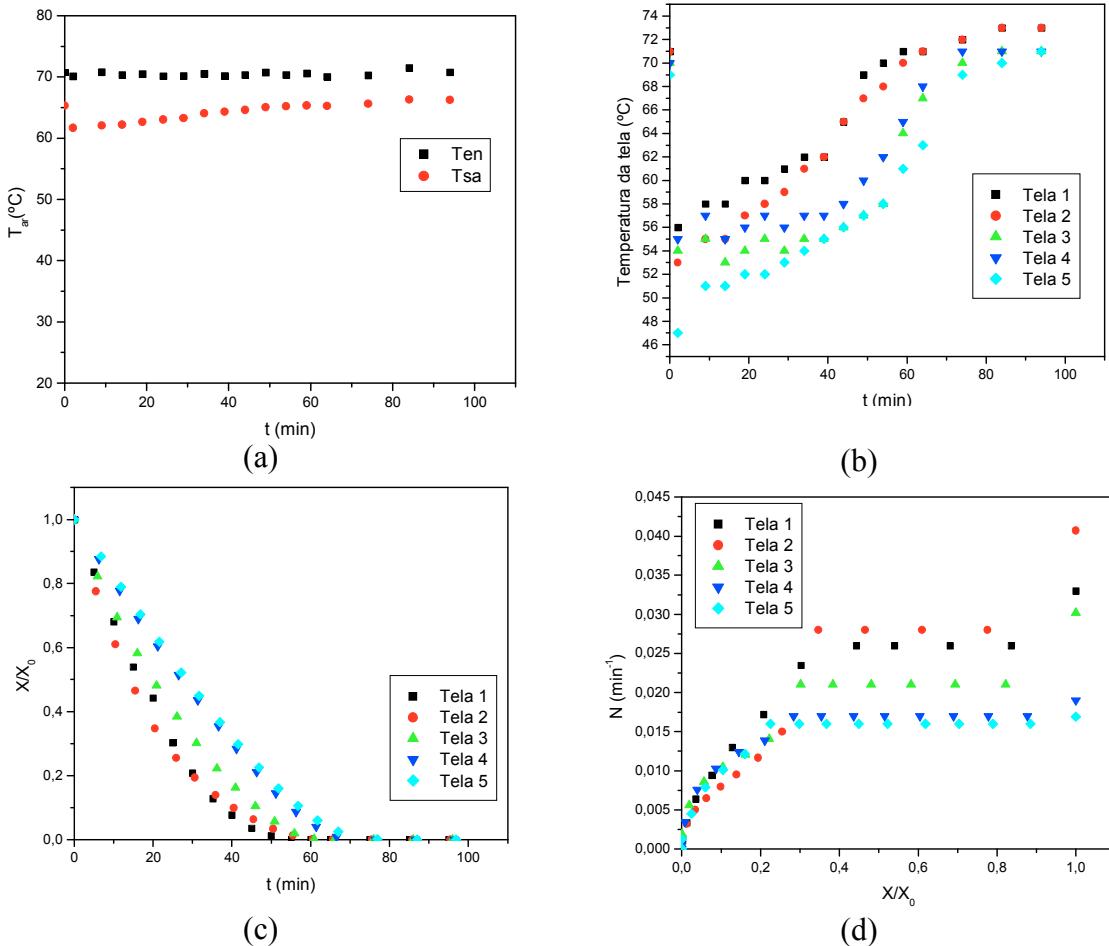
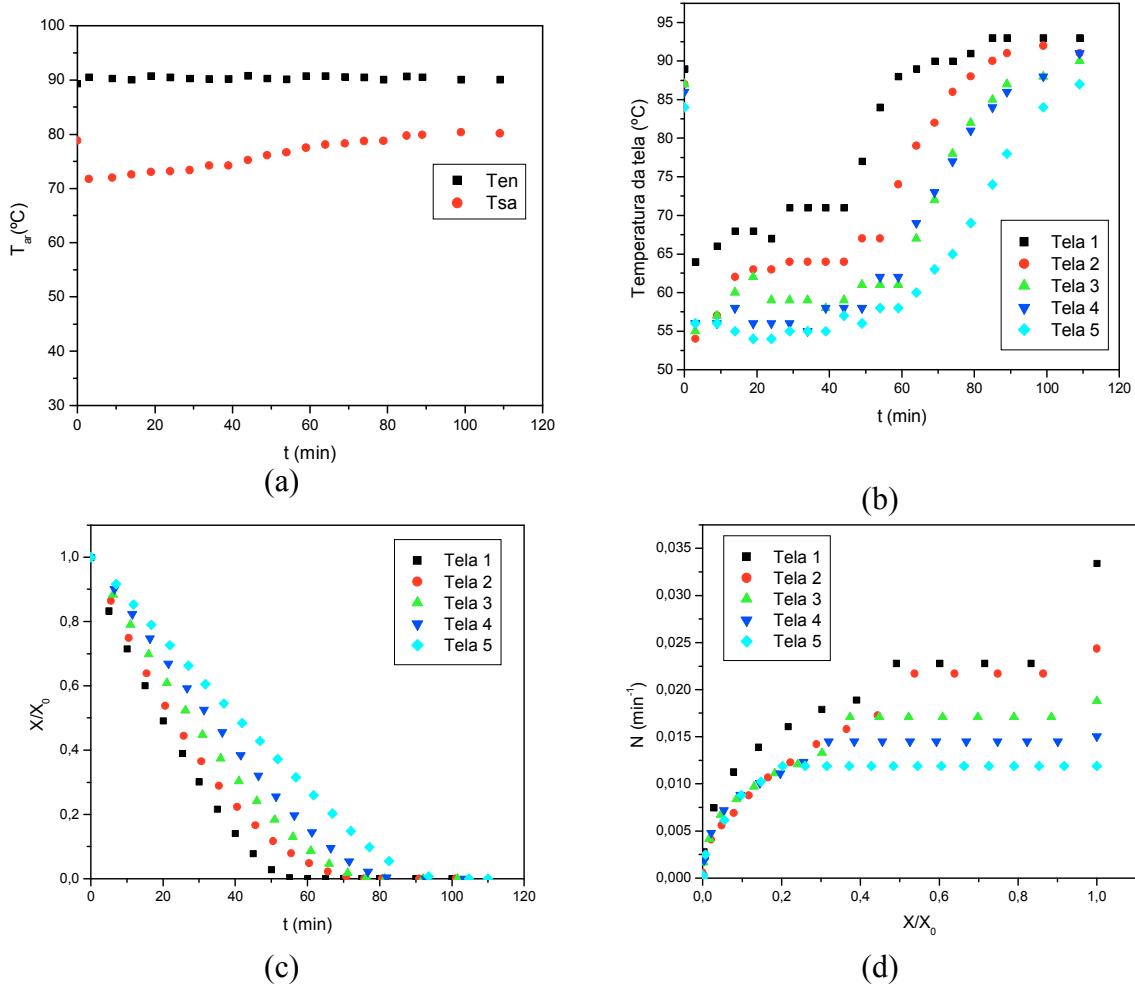


Figura A2: Curvas de secagem para o ensaio 2: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

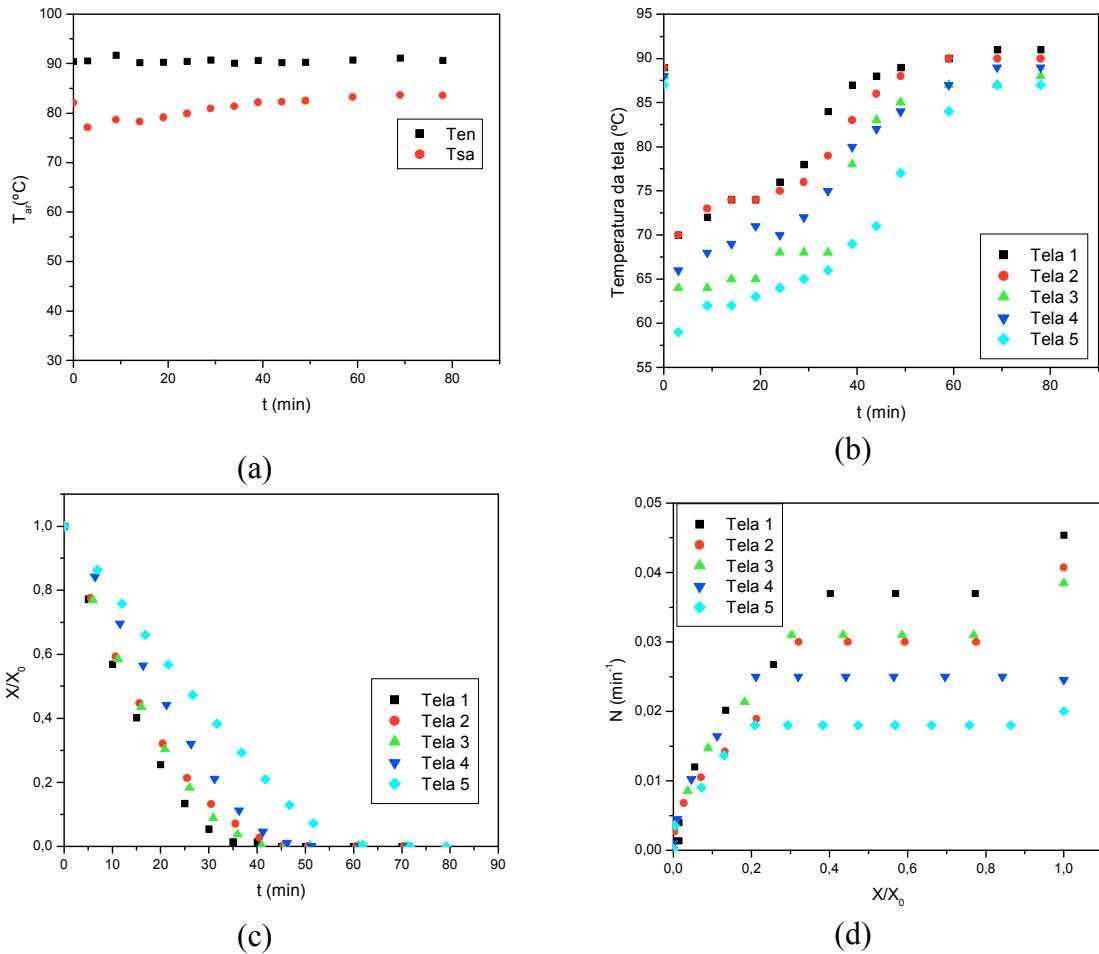
Ensaio 3: X1 (+1) = 90°C, X2 (-1) = 0,30 m/s
Tabela A3: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 3.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $X_{0(b.s)}$ (kg/kg) | 9,937 | 9,139 | 8,236 | 8,907 | 10,082 |
| $X_t(b.s)$ (kg/kg) | 0,774 | 1,069 | 1,509 | 1,295 | 1,489 |
| $X_{cr(b.s)}$ (kg/kg) | 4,880 | 4,920 | 3,077 | 2,848 | 2,044 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 20,58 | 36,00 | 46,45 | 66,92 |
| $t_{secagem}$ (min) | 60,00 | 75,75 | 81,42 | 92,75 | 104,70 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |


Figura A3: Curvas de secagem para o ensaio 3: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 4: X1 (+1) = 90°C, X2 (+1) = 0,70 m/s
Tabela A4: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 4.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 10,958 | 10,296 | 9,783 | 9,920 | 9,824 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,000 | 0,002 | 0,007 | 0,002 | 0,002 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,406 | 3,302 | 2,962 | 2,092 | 2,057 |
| t_{cr} (min) | 15,00 | 20,50 | 20,90 | 31,20 | 41,70 |
| $t_{secagem}$ (min) | 45,00 | 50,50 | 71,00 | 61,30 | 71,70 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |


Figura A4: Curvas de secagem para o ensaio 4: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 5: X1 (-1.4) = 66°C, X2 (0) = 0,50 m/s
Tabela A5: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 1.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 11,720 | 10,939 | 9,343 | 10,319 | 10,195 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 1,158 | 1,472 | 1,648 | 1,420 | 2,036 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 5,741 | 5,621 | 4,016 | 4,513 | 4,135 |
| t_{cr} (min) | 20,25 | 20,75 | 30,80 | 36,25 | 51,50 |
| $t_{secagem}$ (min) | 70,00 | 80,50 | 86,00 | 86,50 | 112,60 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

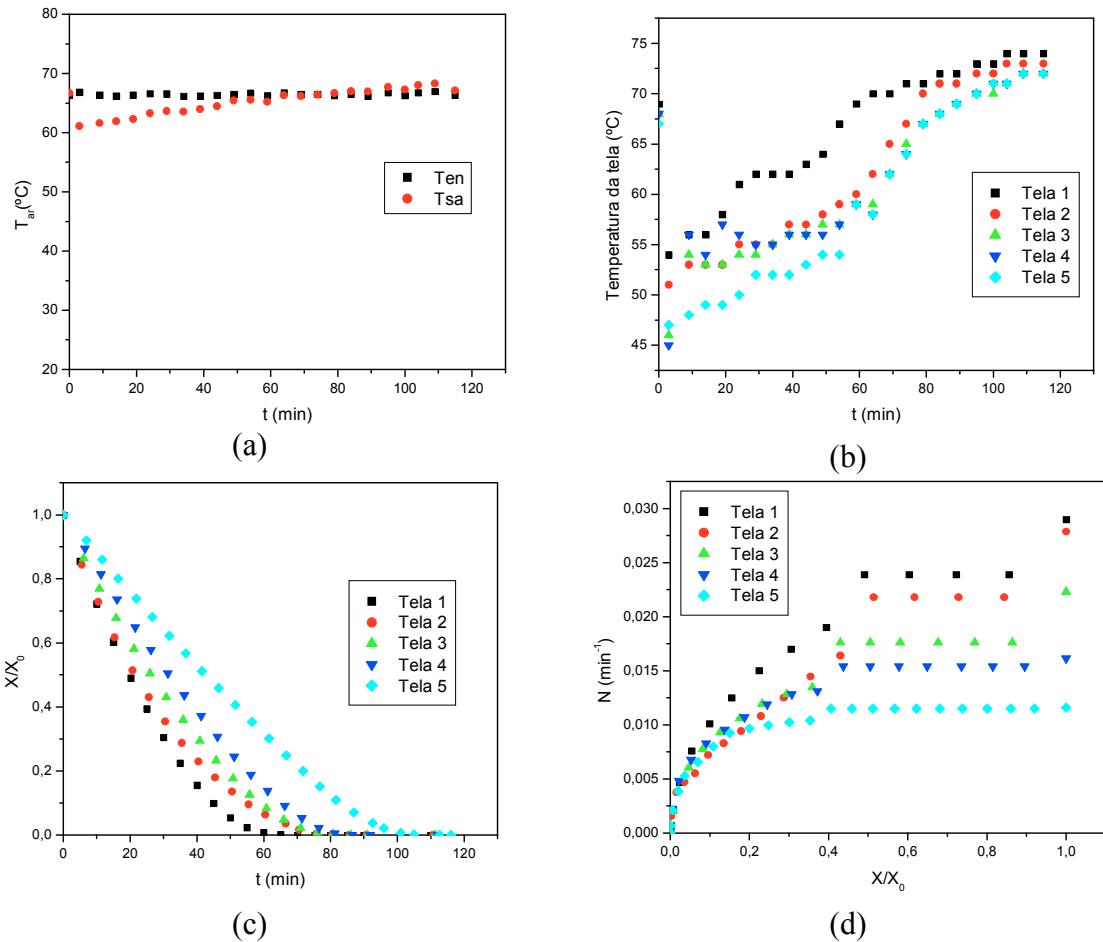


Figura A5: Curvas de secagem para o ensaio 5: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 6: X1 (+1,4) = 94°C, X2 (0) = 0,50 m/s

Tabela A6: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 6.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 7,941 | 8,237 | 7,985 | 7,656 | 8,011 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,014 | 0,016 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 2,695 | 2,870 | 2,239 | 1,407 | 1,155 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 20,50 | 25,90 | 41,30 | 51,90 |
| $t_{secagem}$ (min) | 45,00 | 50,60 | 51,00 | 71,70 | 72,30 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

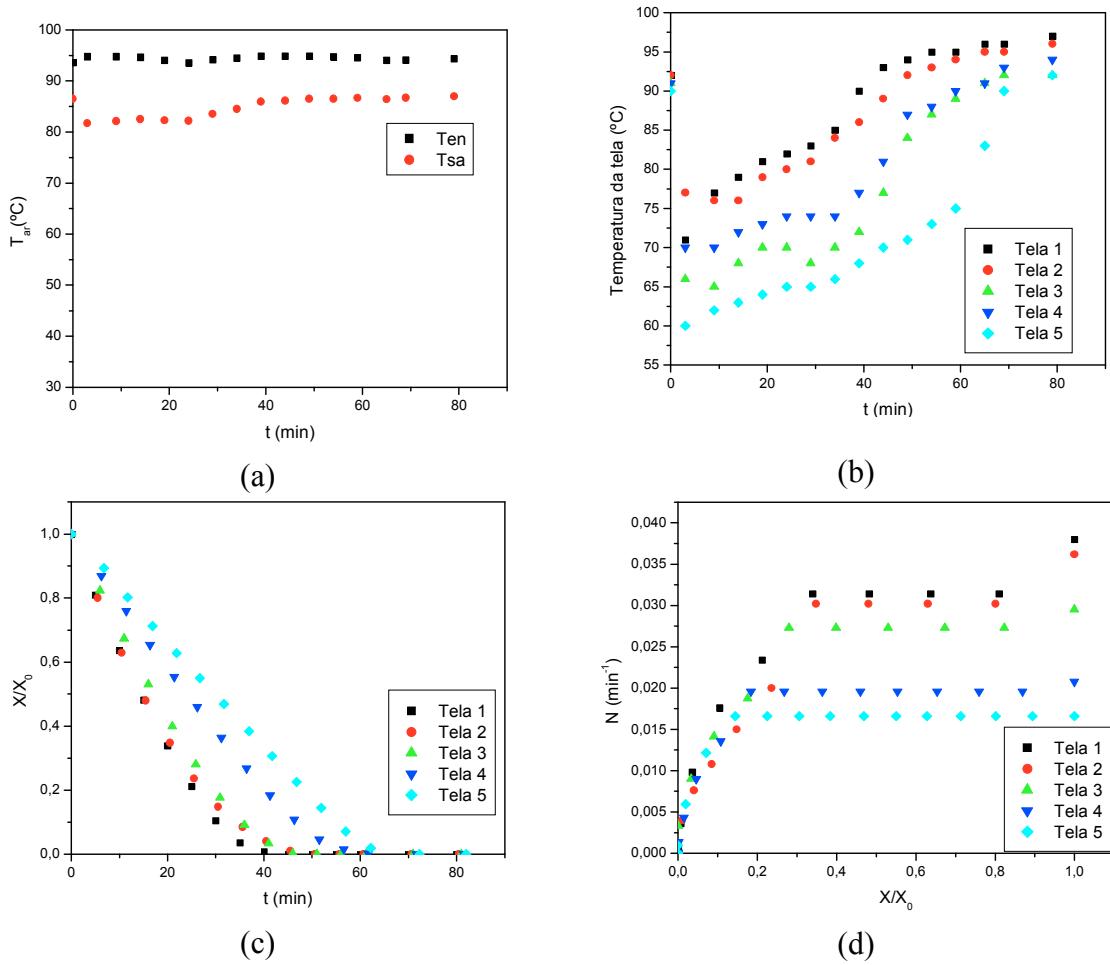
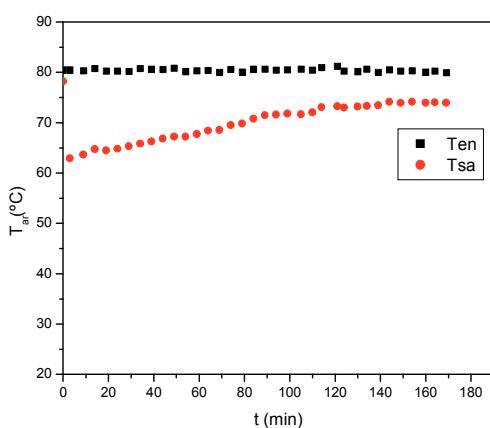


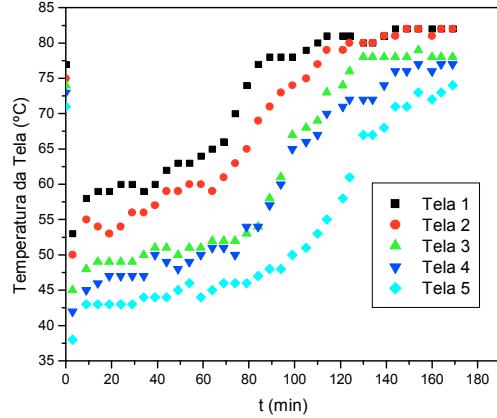
Figura A6: Curvas de secagem para o ensaio 6: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 7: X1 (0) = 80°C, X2 (-1.4) = 0,22 m/s
Tabela A7: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 7.

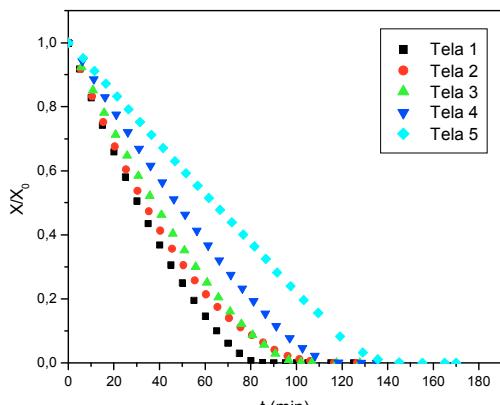
| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 12,106 | 11,462 | 9,830 | 10,067 | 11,387 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 3,708 | 3,492 | 3,447 | 3,692 | 5,004 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 5,273 | 4,734 | 3,447 | 1,939 | 2,236 |
| t_{cr} (min) | 35,00 | 40,42 | 50,93 | 81,23 | 103,18 |
| $t_{secagem}$ (min) | 95,00 | 116,53 | 117,55 | 128,50 | 165,00 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |



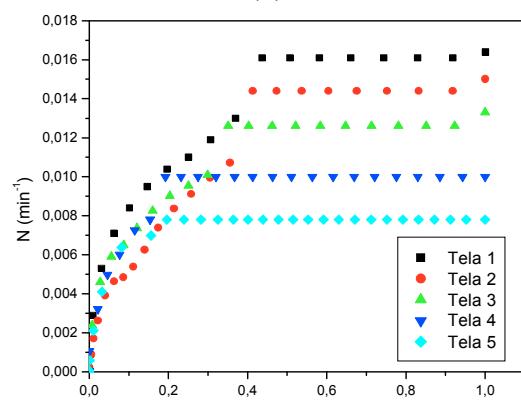
(a)



(b)



(c)

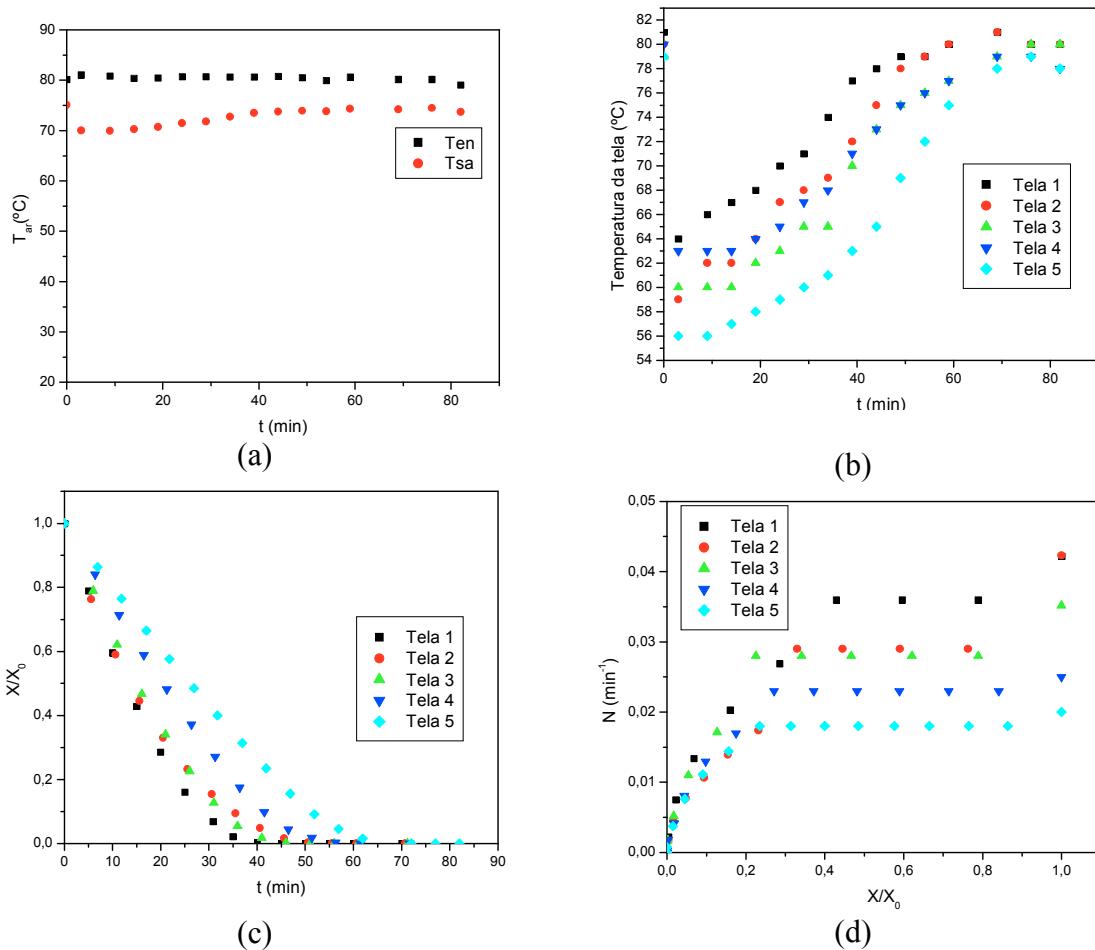


(d)

Figura A7: Curvas de secagem para o ensaio 7: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

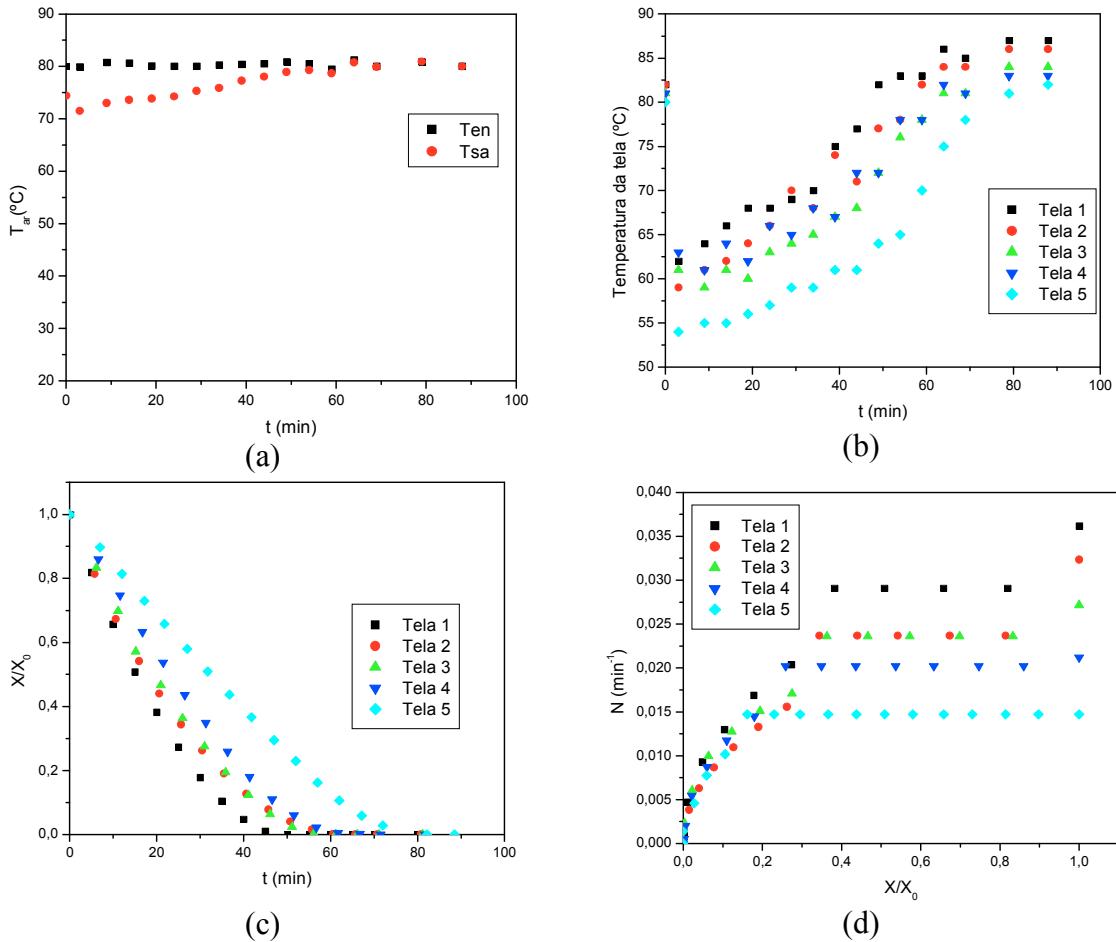
Ensaio 8: X1 (0) = 80°C, X2 (+1.4) = 0,78 m/s
Tabela A8: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 8.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 10,263 | 10,983 | 11,917 | 9,750 | 10,465 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,003 | 0,028 | 0,005 | 0,000 | 0,000 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,403 | 3,629 | 2,278 | 2,640 | 2,456 |
| t_{cr} (min) | 15,00 | 20,50 | 26,00 | 31,30 | 41,90 |
| $t_{secagem}$ (min) | 45,00 | 55,50 | 51,00 | 61,50 | 72,00 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |


Figura A8: Curvas de secagem para o ensaio 8: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 9: X₁ (0) = 80°C, X₂ (0) = 0,50 m/s
Tabela A9: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 9.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X _{0 (b.s)} (kg/kg) | 12,302 | 10,651 | 10,771 | 11,224 | 11,493 |
| X _{t (b.s)} (kg/kg) | 0,134 | 0,428 | 0,244 | 0,056 | 0,316 |
| X _{cr (b.s)} (kg/kg) | 4,702 | 3,663 | 3,907 | 2,916 | 1,863 |
| t _{cr} (min) | 20,00 | 25,60 | 26,00 | 36,30 | 57,00 |
| t _{secagem} (min) | 55,00 | 65,70 | 61,20 | 71,50 | 82,20 |
| t _{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |


Figura A9: Curvas de secagem para o ensaio 9: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 10: X1 (0) = 80°C, X2 (0) = 0,50 m/s

Tabela A10: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 10.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 11,139 | 10,705 | 11,145 | 10,542 | 11,191 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,346 | 0,644 | 0,138 | 0,028 | 0,145 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,472 | 4,872 | 2,800 | 3,849 | 4,021 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 20,50 | 30,80 | 31,25 | 41,85 |
| $t_{secagem}$ (min) | 55,00 | 65,50 | 61,15 | 66,35 | 86,90 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

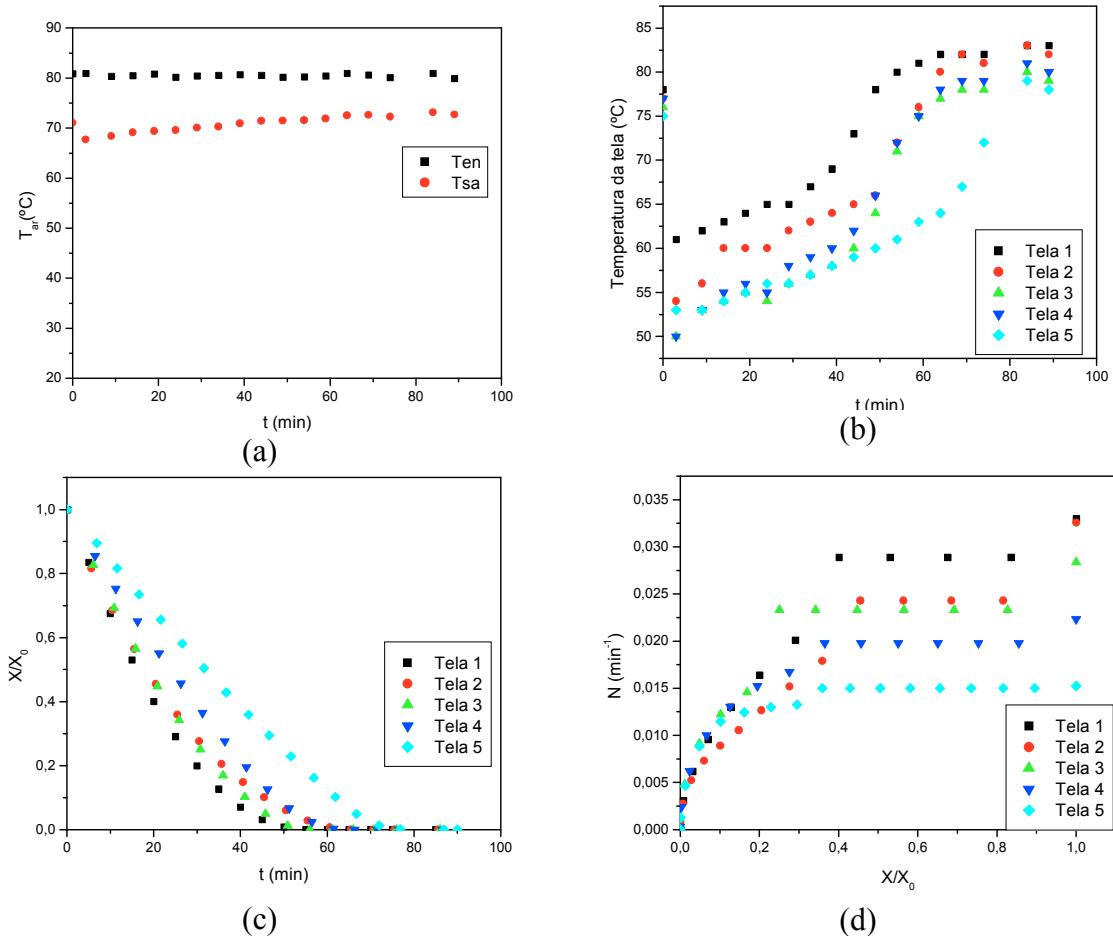


Figura A10: Curvas de secagem para o ensaio 10: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 11: X1 (0) = 80°C, X2 (0) = 0,50 m/s
Tabela A11: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 11.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|-------|--------|-------|-------|--------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 9,610 | 10,606 | 8,555 | 9,898 | 10,838 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,331 | 0,176 | 0,559 | 0,048 | 0,106 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,293 | 2,832 | 3,615 | 3,814 | 3,403 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 25,40 | 25,67 | 31,12 | 46,67 |
| $t_{secagem}$ (min) | 55,00 | 60,50 | 66,00 | 66,67 | 82,58 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

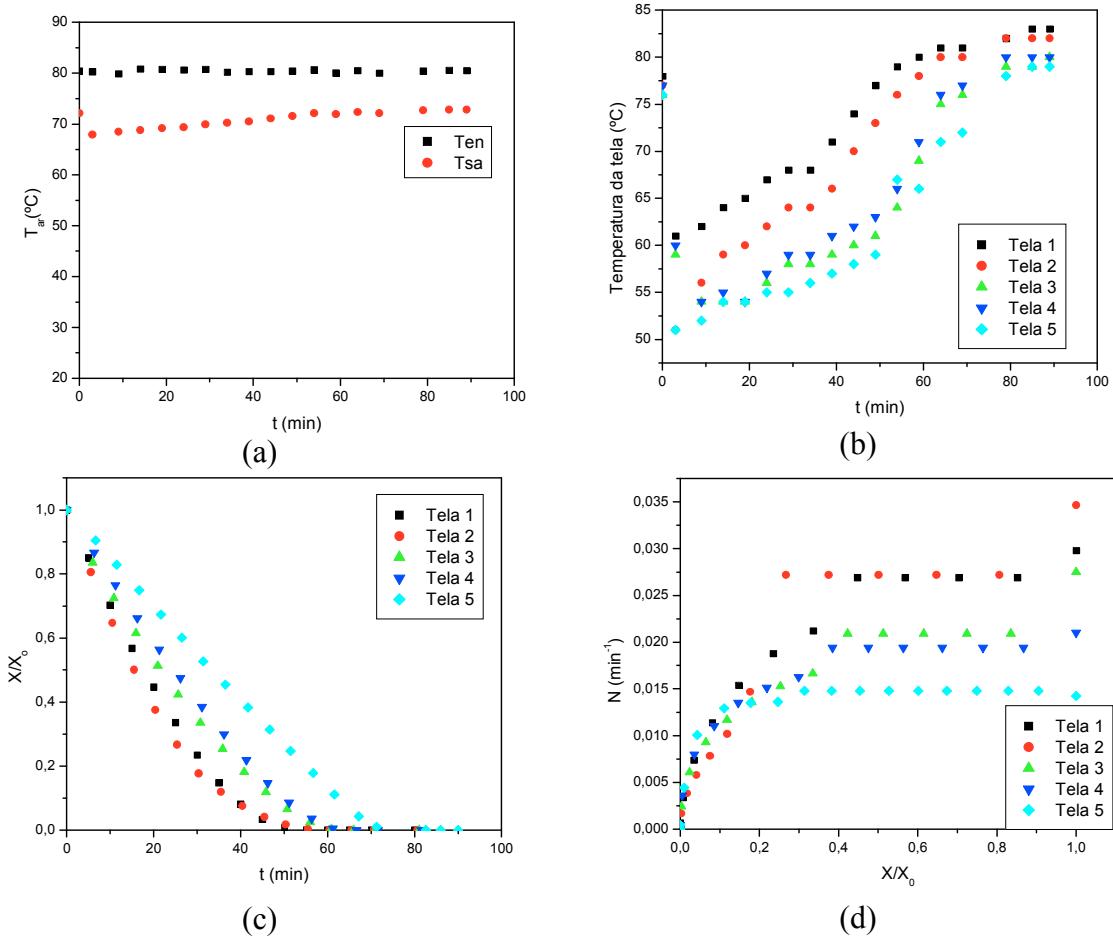


Figura A11: Curvas de secagem para o ensaio 11: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 12: X1 (0) = 80°C, X2 (0) = 0,50 m/s

Tabela A12: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 12.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 10,693 | 9,605 | 9,258 | 8,712 | 9,571 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,357 | 0,722 | 1,011 | 0,388 | 0,770 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,400 | 4,501 | 4,063 | 3,029 | 2,943 |
| t_{cr} (min) | 20,00 | 20,58 | 25,92 | 36,25 | 51,83 |
| $t_{secagem}$ (min) | 55,00 | 70,75 | 71,87 | 82,17 | 93,00 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

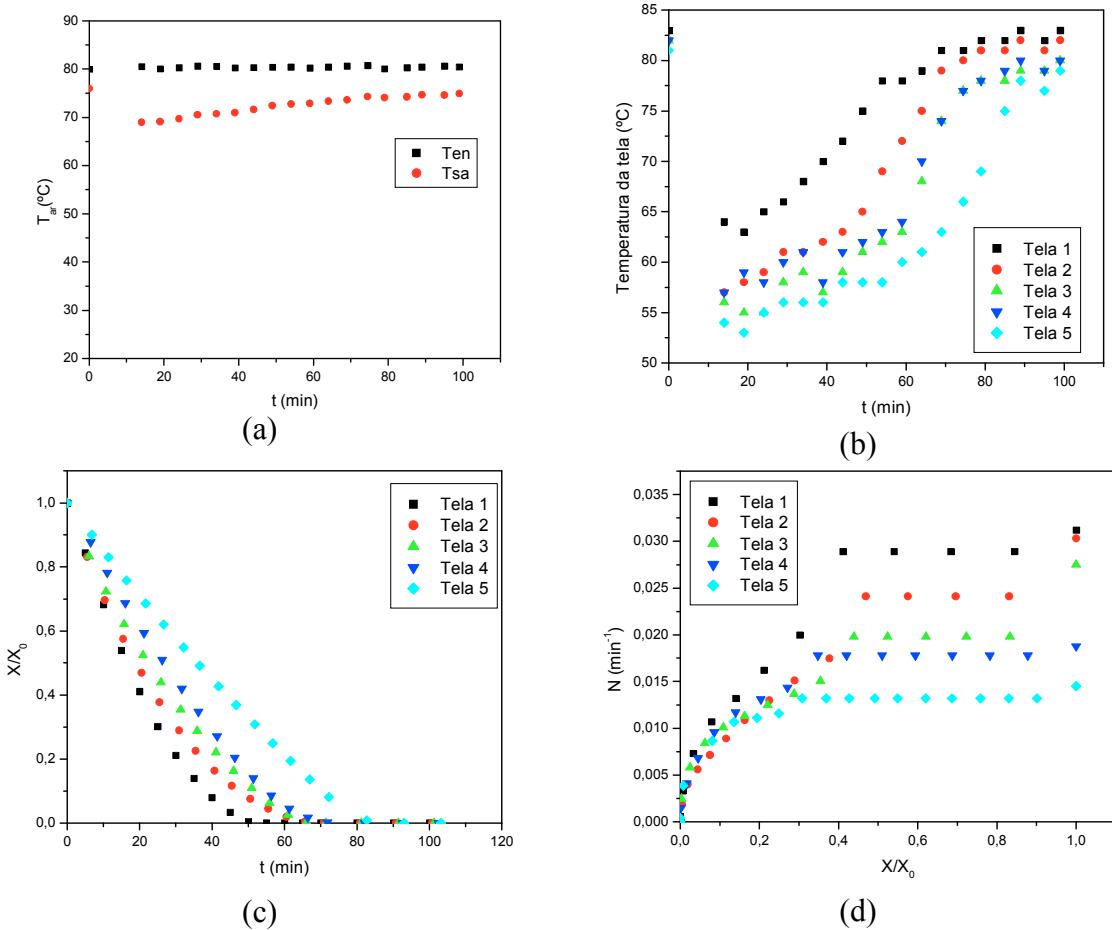


Figura A12: Curvas de secagem para o ensaio 12: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 13: X1 (0) = 80°C, X2 (0) = 0,50 m/s

Tabela A13: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 13.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| X_0 (b.s) (kg/kg) | 10,072 | 9,423 | 8,672 | 9,015 | 9,438 |
| X_t (b.s) (kg/kg) | 0,367 | 0,148 | 0,201 | 0,0032 | 0,130 |
| X_{cr} (b.s) (kg/kg) | 5,477 | 2,996 | 2,270 | 2,519 | 2,104 |
| t_{cr} (min) | 15,00 | 25,50 | 30,83 | 36,25 | 51,75 |
| $t_{secagem}$ (min) | 60,00 | 60,50 | 60,86 | 66,83 | 82,25 |
| t_{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |

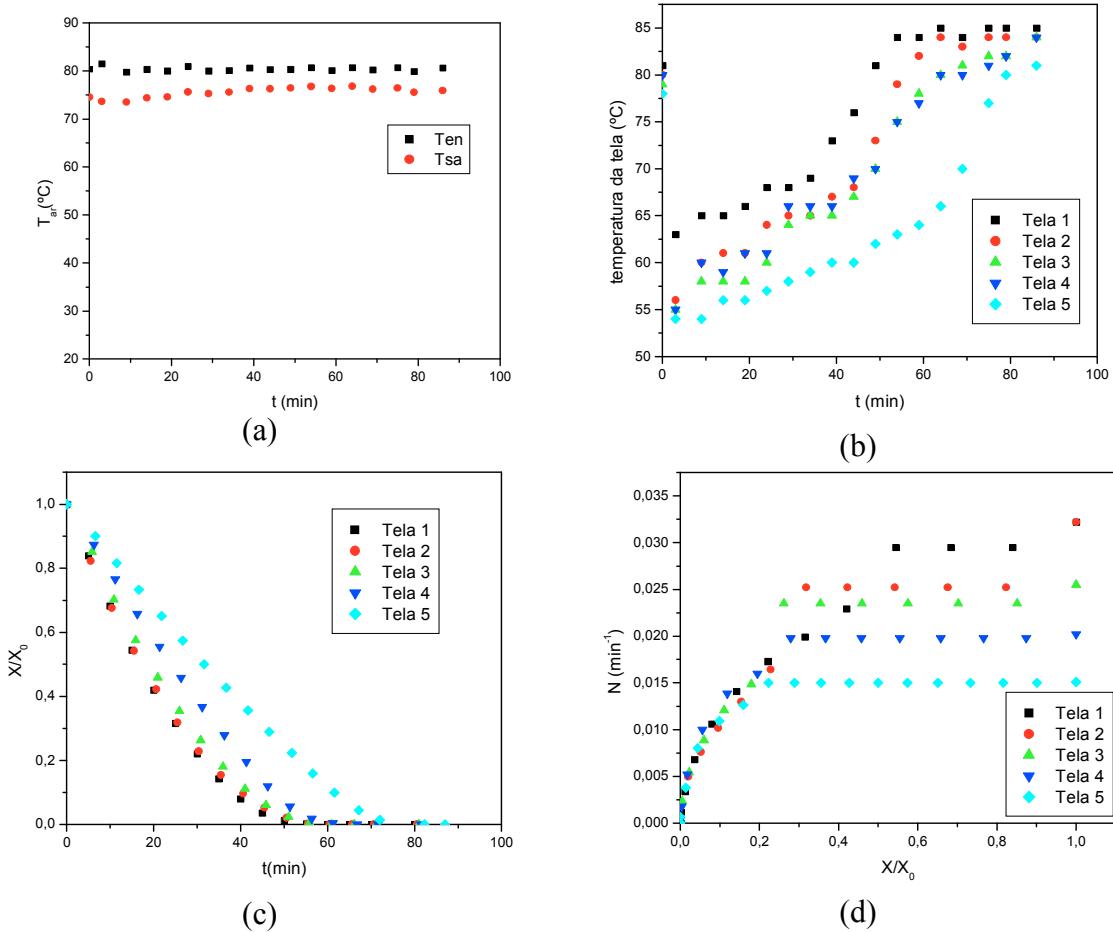
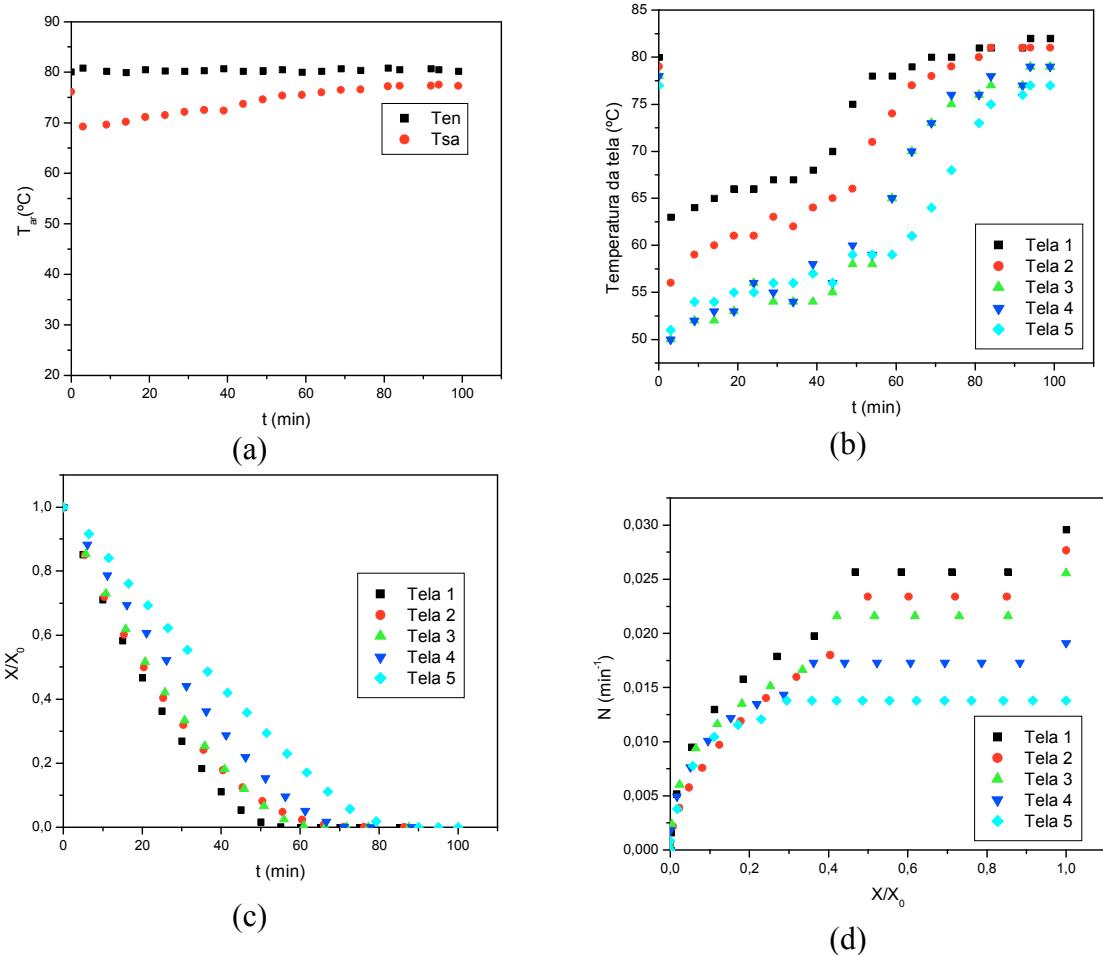


Figura A13: Curvas de secagem para o ensaio 13: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Ensaio 14: X₁ (0) = 80°C, X₂ (0) = 0,5 m/s
Tabela A14: Resultados da análise da cinética de secagem para o ensaio 14.

| Tela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|
| X ₀ (b.s) (kg/kg) | 10,152 | 9,989 | 9,660 | 9,815 | 10,021 |
| X _t (b.s) (kg/kg) | 0,553 | 0,811 | 0,628 | 0,496 | 0,575 |
| X _{cr} (b.s) (kg/kg) | 4,739 | 4,940 | 4,068 | 3,553 | 2,949 |
| t _{cr} (min) | 20,00 | 20,42 | 25,75 | 36,20 | 51,50 |
| t _{secagem} (min) | 60,00 | 76,17 | 66,30 | 77,95 | 90,00 |
| t _{fixo} (min) | 45,50 | 50,50 | 51,00 | 61,30 | 71,70 |


Figura A14: Curvas de secagem para o ensaio 14: (a) Parâmetros do ar de entrada e saída; (b) Perfis de temperatura da tela; (c) Curva de secagem convectiva; (d) Curvas de taxa de secagem.

Reprodutibilidade

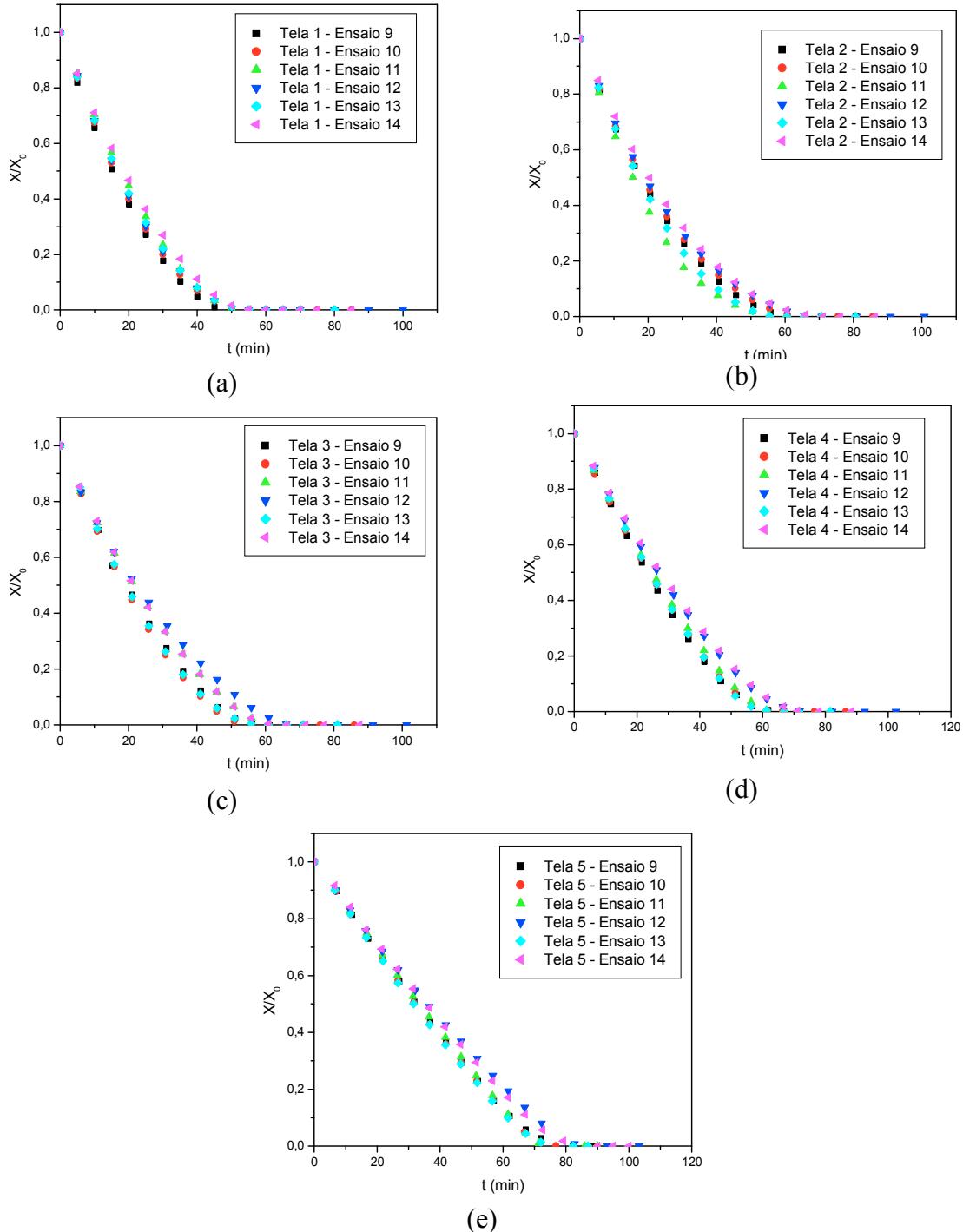


Figura A15: Curvas de secagem convectiva para ensaios realizados no ponto central: (a) tela 1; (b) tela 2; (c) tela 3; (d) tela 4; (e) tela 5.

ANEXO B

Tela 1

- Taxa de secagem inicial (N_i)

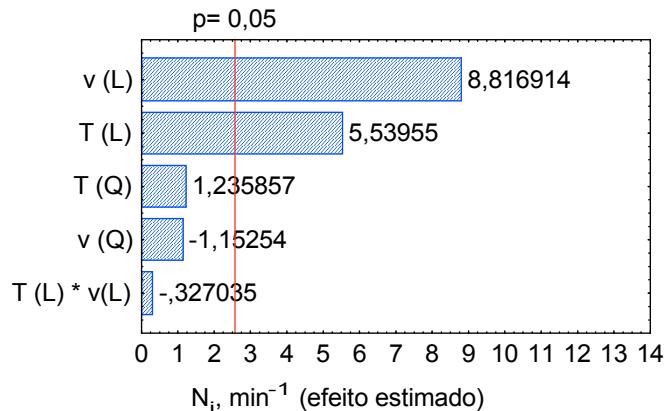


Figura B1: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial (tela 1).

Modelo estatístico codificado (Equação B1):

$$N_i = 0,032 + 0,0048 \cdot T + 0,0076 \cdot v \quad (B1)$$

Tabela B1: Coeficientes de regressão para a resposta N_i (R_1) da tela 1.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,032043 | 0,000654 | $6,68 \cdot 10^{-8}$ | 0,030362 | 0,033723 |
| $T(L)$ | 0,004791 | 0,000865 | 0,002631 | 0,002568 | 0,007014 |
| $v(L)$ | 0,007625 | 0,000865 | 0,000312 | 0,005402 | 0,009849 |

Tabela B2: Análise de variância para a resposta N_i (R_1) da tela 1.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $6,05 \cdot 10^{-4}$ | 2 | $3,024 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $9,02 \cdot 10^{-5}$ | 11 | $8,2 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $6,03 \cdot 10^{-5}$ | 6 | $1,01 \cdot 10^{-5}$ |
| Erro puro | $2,99 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $5,98 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | $7,39 \cdot 10^{-4}$ | 13 | - |

$$R^2 = 0,8779$$

Tabela B3: Valores para o teste F para a resposta N_i (R_1) da tela 1.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 402,73 | 3,98 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,69 | 4,95 |

% de variação explicada: 81,85

% máxima de variação explicável: 95,95

$$F_{\text{calculado}} = 101,19 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{6,5} (\alpha = 95\%) = 4,95 \text{ (não há falta de ajuste do modelo)}$$

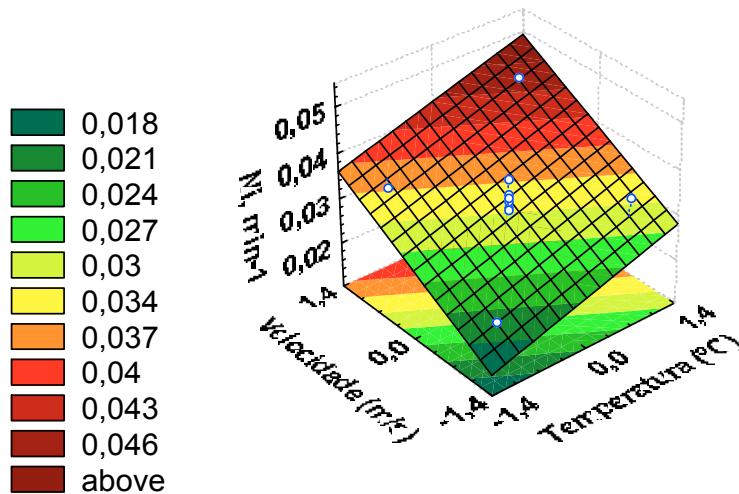
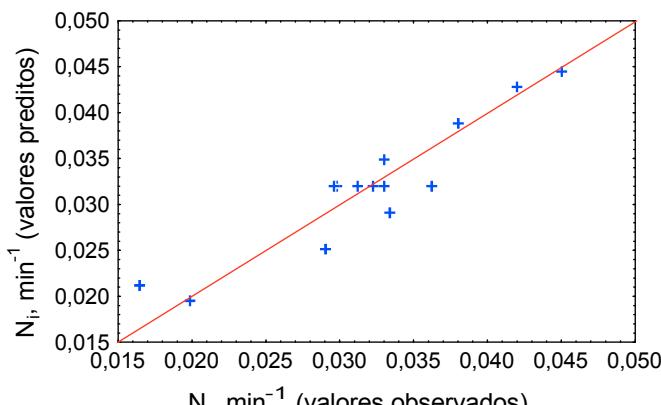
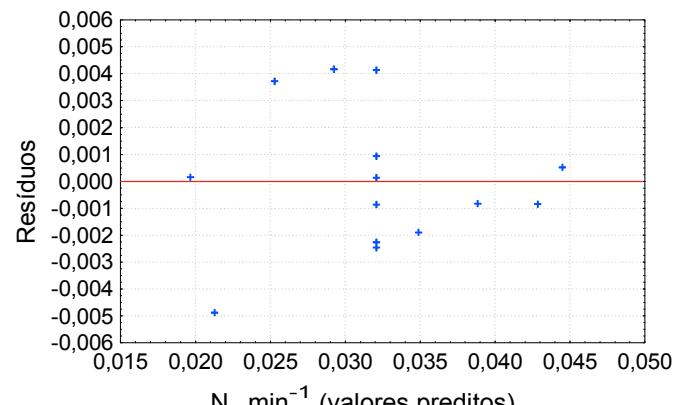


Figura B2: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial (tela 1).



(a)



(b)

Figura B3: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial (tela 1).

- Taxa de secagem constante (N_c)

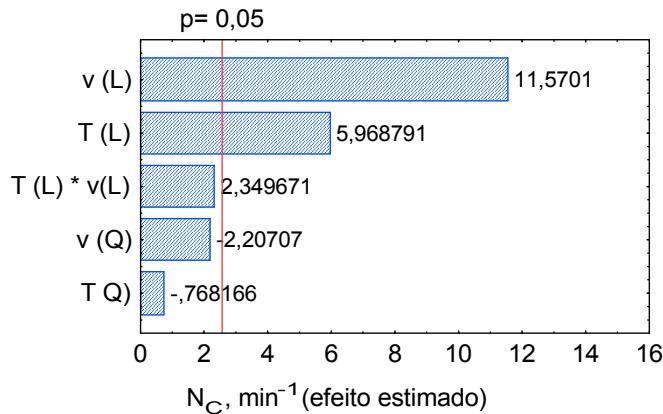


Figura B4: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante (tela 1).

Modelo estatístico codificado (Equação B2):

$$N_c = 0,0272 + 0,0032 \cdot T + 0,0062 \cdot v \quad (\text{B2})$$

Tabela B4: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 1.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,027221 | 0,000404 | $1,36 \cdot 10^{-8}$ | 0,026183 | 0,028259 |
| T (L) | 0,003188 | 0,000534 | 0,00189 | 0,001815 | 0,004561 |
| v (L) | 0,00618 | 0,000534 | $8,46 \cdot 10^{-5}$ | 0,004807 | 0,007553 |

Tabela B5: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 1.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $3,87 \cdot 10^{-4}$ | 2 | $1,92 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $4,50 \cdot 10^{-5}$ | 11 | $4,09 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $3,36 \cdot 10^{-5}$ | 6 | $5,60 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $1,14 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $2,28 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | $4,32 \cdot 10^{-4}$ | 13 | - |

$$R^2 = 0,8958$$

Tabela B6: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 1.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 47,30 | 3,98 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 2,00 | 4,95 |

% de variação explicada: 89,58

% máxima de variação explicável: 97,36

$$F_{\text{calculado}} = 11,88 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{6,5} (\alpha = 95\%) = 4,95$ (não há falta de ajuste do modelo)

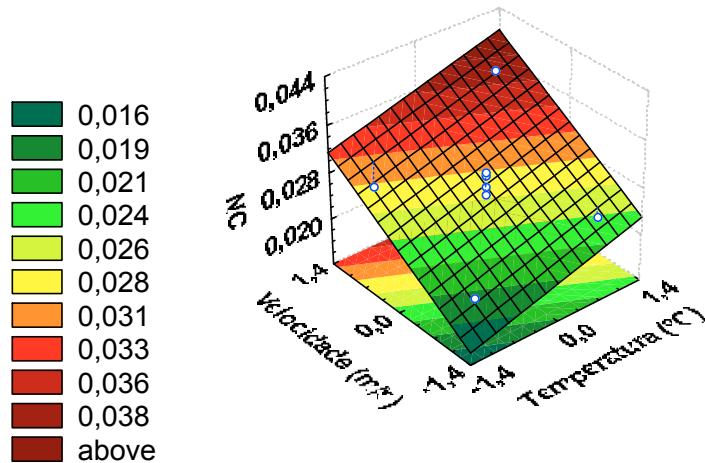
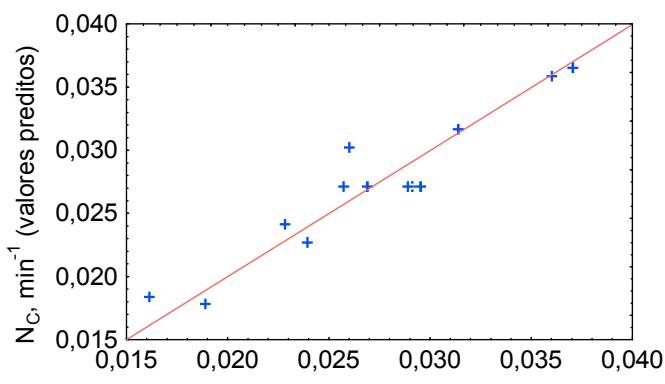
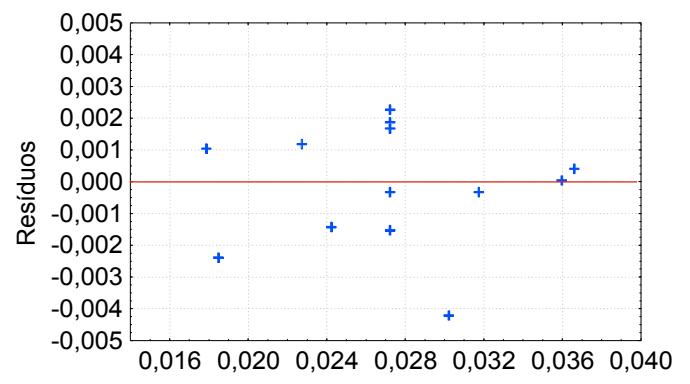


Figura B5: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante (tela 1).



(a)



(b)

Figura B6: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante (tela 1).

- Teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial ($\frac{X_f}{X_0}$)

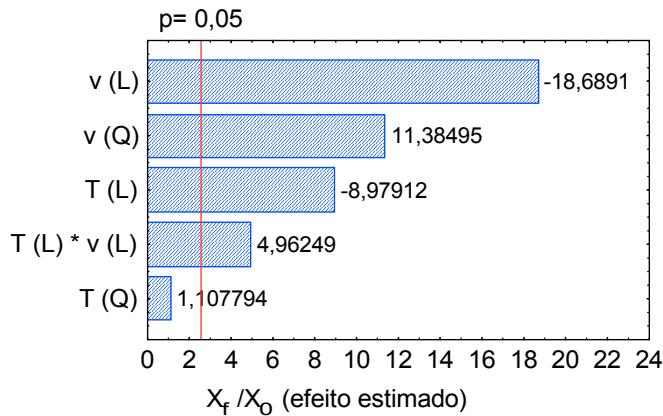


Figura B7: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado (tela 1).

Modelo estatístico codificado (Equação B3):

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0366 - 0,0435 \cdot T - 0,0905 \cdot v + 0,0569 \cdot v^2 + 0,034 \cdot T \cdot v \quad (\text{B3})$$

Tabela B7: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 1.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,036604 | 0,004655 | 0,000534 | 0,024639 | 0,048569 |
| T (L) | -0,043500 | 0,004845 | 0,000286 | -0,05595 | -0,031050 |
| v (L) | -0,090540 | 0,004845 | $8,07 \cdot 10^{-6}$ | -0,103000 | -0,078090 |
| v (Q) | 0,056979 | 0,005028 | $9,35 \cdot 10^{-5}$ | 0,044055 | 0,069903 |
| T^*v | 0,034000 | 0,006851 | 0,004239 | 0,016388 | 0,051612 |

Tabela B8: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 1.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,109464 | 4 | 0,027366 |
| Resíduos | $4,422 \cdot 10^{-3}$ | 9 | $4,91 \cdot 10^{-4}$ |
| Falta de ajuste | $3,483 \cdot 10^{-3}$ | 4 | $8,71 \cdot 10^{-4}$ |
| Erro puro | $9,39 \cdot 10^{-4}$ | 5 | $1,88 \cdot 10^{-4}$ |
| Total | 0,113886 | 13 | - |

$R^2 = 0,9612$

Tabela B9: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 1.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 55,73 | 3,63 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 4,63 | 5,19 |

% de variação explicada: 96,12

% máxima de variação explicável: 99,18

$$F_{\text{calculado}} = 15,36 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{4,5} (\alpha = 95\%) = 5,19 \text{ (não há falta de ajuste do modelo)}$$

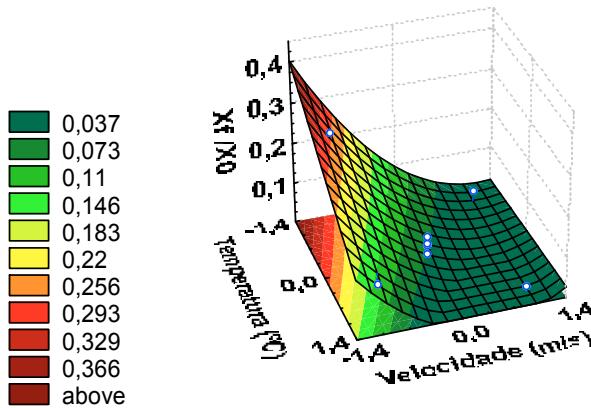
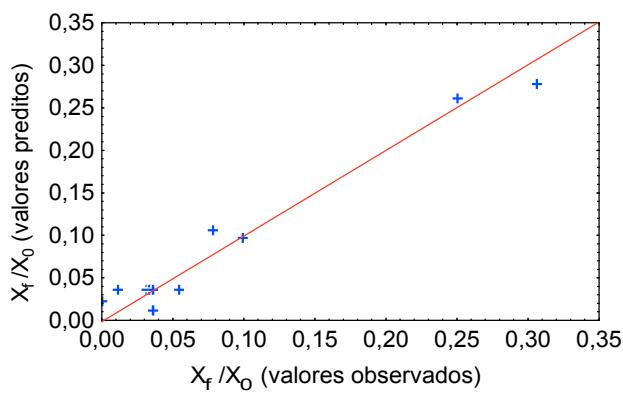
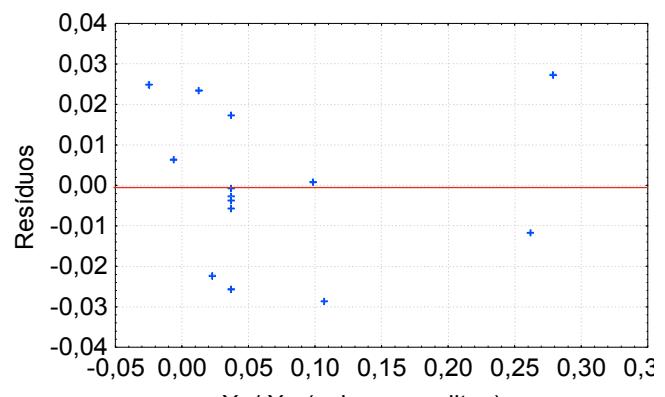


Figura B8: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado (tela 1).



(a)



(b)

Figura B9: (a) Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado (tela 1).

Tela 2

- Taxa de secagem inicial (N_i)

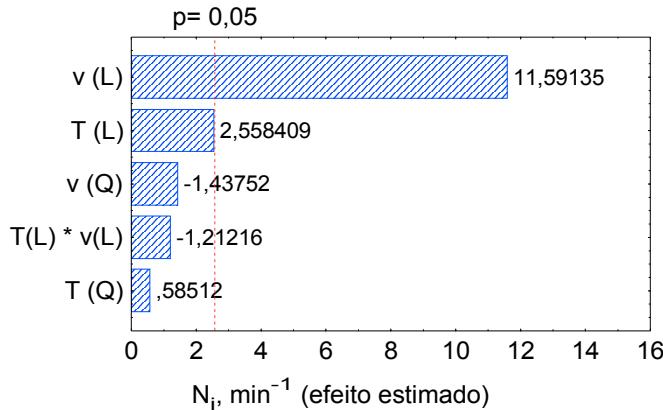


Figura B10: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial (tela 2).

Modelo estatístico codificado (Equação B4):

$$N_i = 0,0311 + 0,0021 \cdot T + 0,0096 \cdot v \quad (\text{B4})$$

Tabela B10: Coeficientes de regressão para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 2.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,031079 | 0,000628 | $6,39 \cdot 10^{-8}$ | 0,029463 | 0,032694 |
| $T(L)$ | 0,002127 | 0,000831 | $0,050745$ | $-1 \cdot 10^{-5}$ | 0,004264 |
| $v(L)$ | 0,009635 | 0,000831 | $8,39 \cdot 10^{-5}$ | 0,007499 | 0,011772 |

Tabela B11: Análise de variância para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 2.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $7,791 \cdot 10^{-4}$ | 2 | $3,895 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $5,59 \cdot 10^{-5}$ | 11 | $5,08 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $2,83 \cdot 10^{-5}$ | 6 | $4,72 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $2,76 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $5,53 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000835 | 13 | - |

$R^2 = 0,9329$

Tabela B12: Valores para o teste F para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 2.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 76,07 | 3,98 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,853 | 4,95 |

% de variação explicada: 93,30

% máxima de variação explicável: 96,69

$$F_{\text{calculado}} = 19,11 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{6,5} (\alpha = 95\%) = 4,95$ (não há falta de ajuste do modelo)

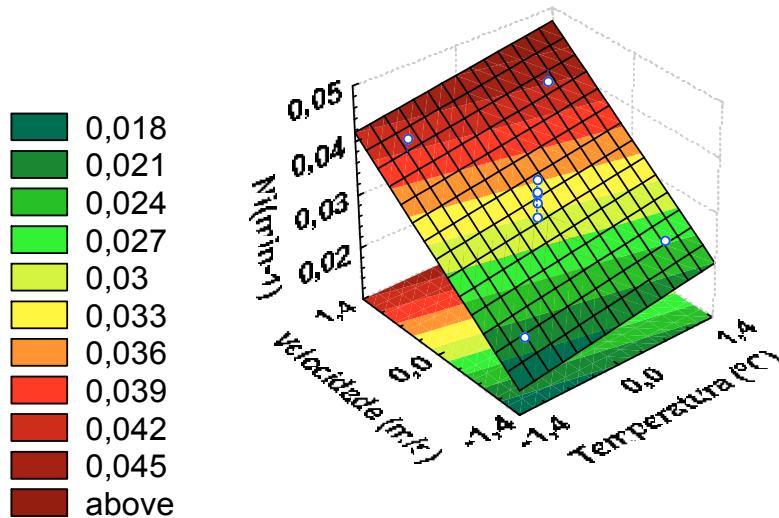
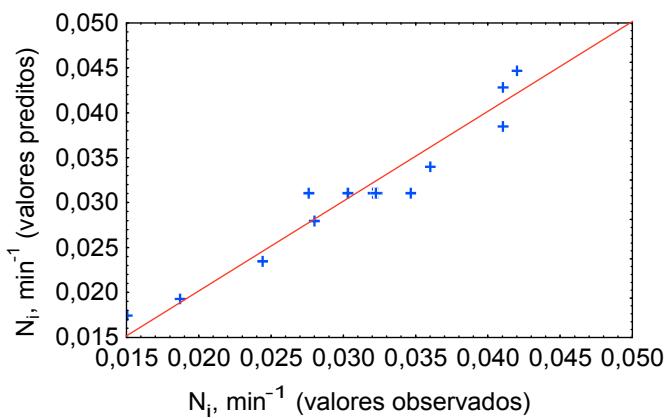
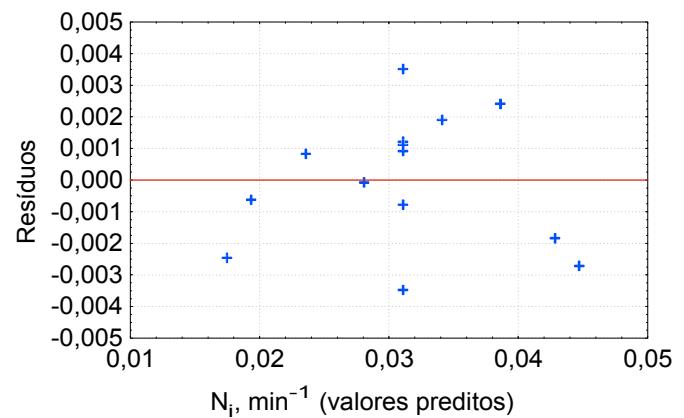


Figura B11: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial (tela 2).



(a)



(b)

Figura B12: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial (tela 2).

- Taxa de secagem constante (N_c)

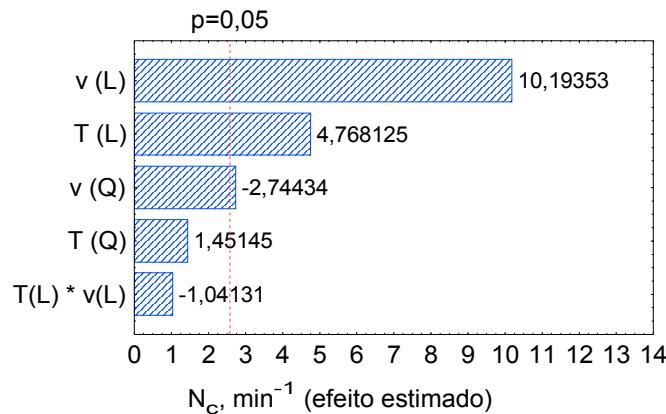


Figura B13: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante (tela 2).

Modelo estatístico codificado (Equação B5):

$$N_c = 0,0251 + 0,0023 \cdot T + 0,005 \cdot v - 0,0015 \cdot v^2 \quad (\text{B5})$$

Tabela B13: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 2.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,025108 | 0,000473 | $4,49 \cdot 10^{-8}$ | 0,023892 | 0,026324 |
| T (L) | 0,002347 | 0,000492 | 0,005023 | 0,001082 | 0,003613 |
| v (L) | 0,005018 | 0,000492 | 0,000156 | 0,003753 | 0,006284 |
| v(Q) | -0,001463 | 0,000511 | 0,035222 | -0,002777 | -0,000150 |

Tabela B14: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 2.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Regressão | $2,615 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $8,7167 \cdot 10^{-5}$ |
| Resíduos | $1,9298 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $1,9298 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $9,603 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,92 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $9,695 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,94 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,0002808 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9313$$

Tabela B15: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 2.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 45,17 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,99 | 5,05 |

% de variação explicada: 93,13

% máxima de variação explicável: 96,55

$$F_{\text{calculado}} = 12,17 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

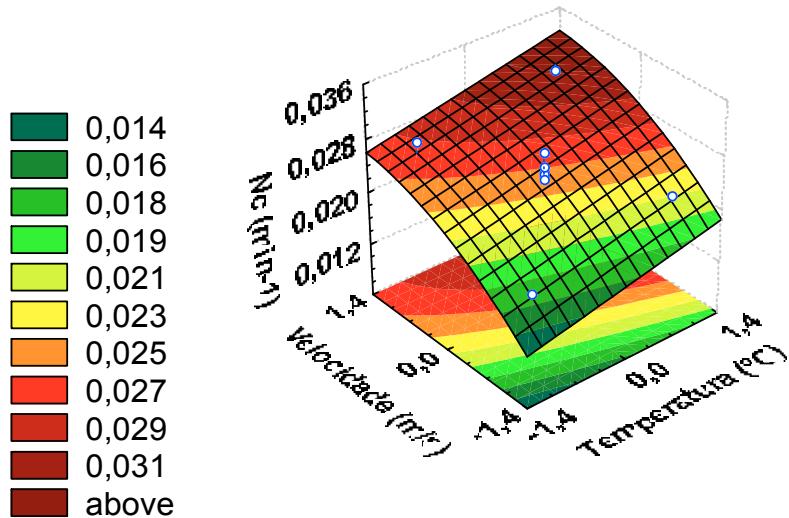
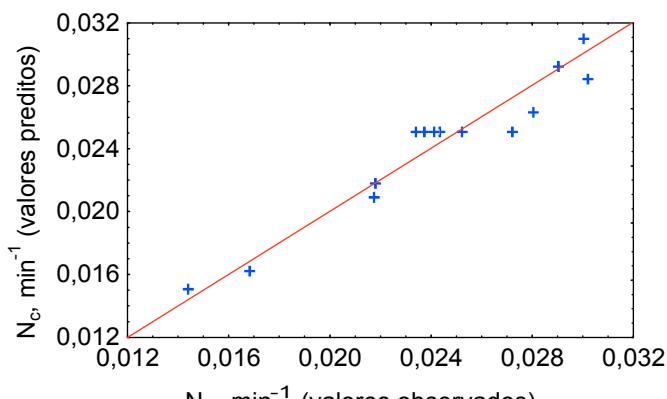
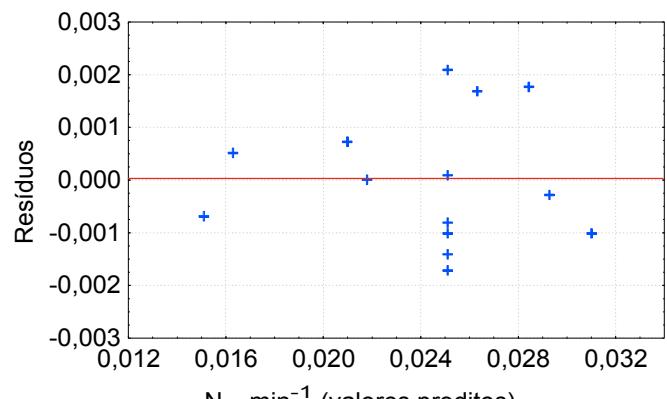


Figura B14: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante (tela 2).



(a)



(b)

Figura B15: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante (tela 2).

- Teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial ($\frac{X_f}{X_0}$)

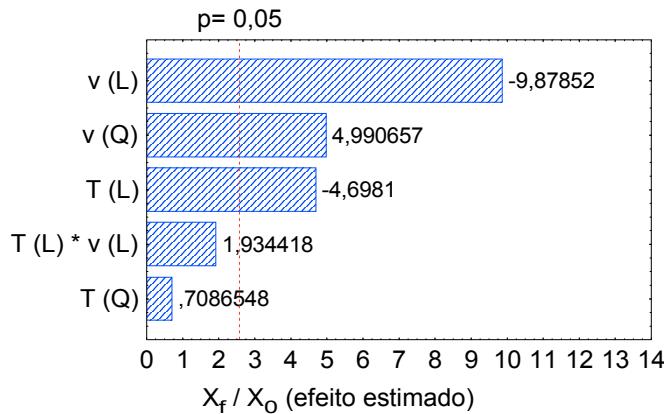


Figura B16: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado (tela 2).

Modelo estatístico codificado (Equação B6):

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0532 - 0,0456 \cdot T - 0,0959 \cdot v + 0,0498 \cdot v^2 \quad (\text{B6})$$

Tabela B16: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 2.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,053238 | 0,009323 | 0,002301 | 0,029271 | 0,077205 |
| T (L) | -0,045590 | 0,009704 | 0,005346 | -0,070540 | -0,020650 |
| v (L) | -0,09586 | 0,009704 | 0,000181 | -0,120810 | -0,070920 |
| v (Q) | 0,049857 | 0,01007 | 0,004282 | 0,023970 | 0,075744 |

Tabela B17: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 2.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,108611 | 3 | $3,62 \cdot 10^{-2}$ |
| Resíduos | 0,008105 | 10 | $8,105 \cdot 10^{-4}$ |
| Falta de ajuste | 0,004338 | 5 | $8,68 \cdot 10^{-4}$ |
| Erro puro | 0,003767 | 5 | $7,53 \cdot 10^{-4}$ |
| Total | 0,116716 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9305$$

Tabela B18: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 2.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 44,66 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,15 | 5,05 |

% de variação explicada: 93,05

% máxima de variação explicável: 96,77

$$F_{\text{calculado}} = 12,03 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

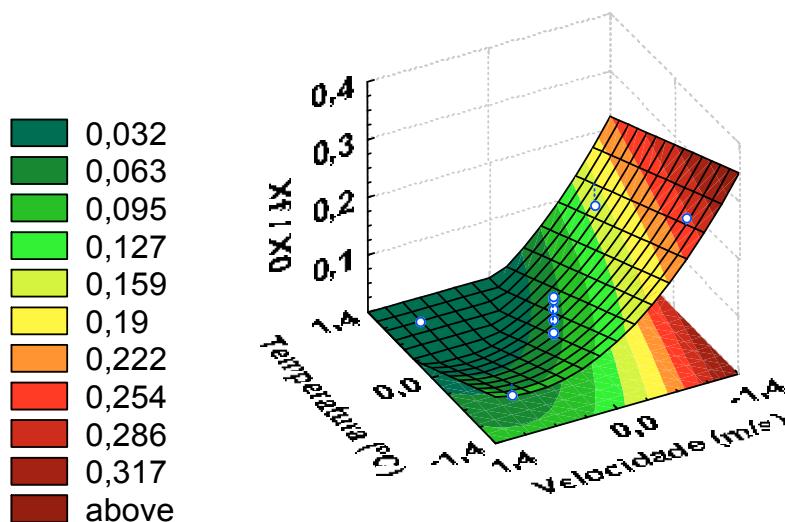
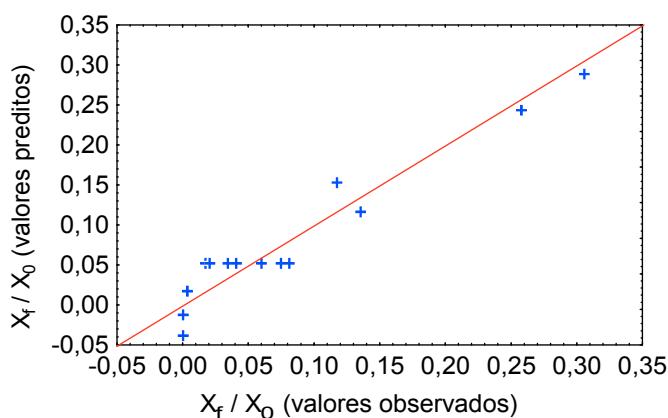
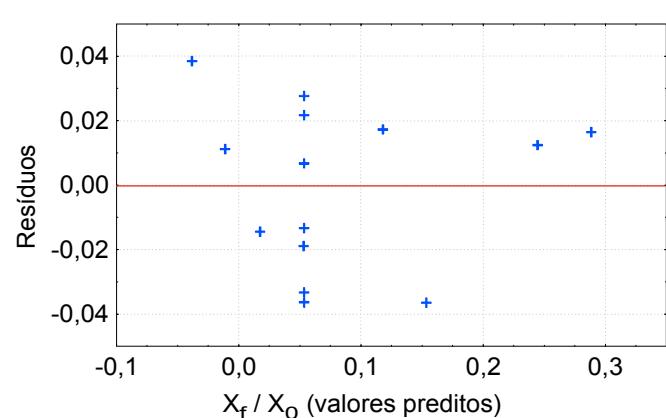


Figura B17: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado (tela 2).



(a)



(b)

Figura B18: (a) Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado (tela 2).

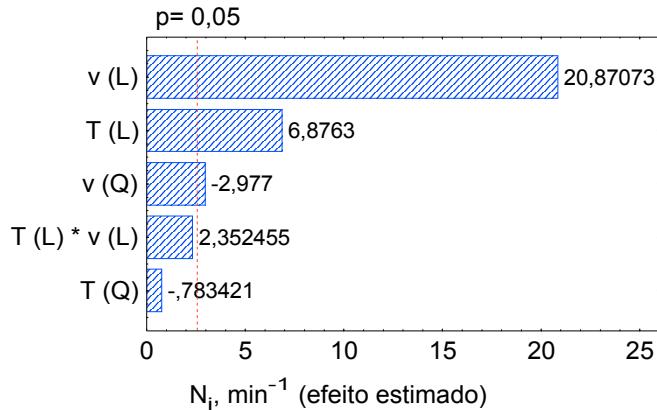
Tela 3**- Taxa de secagem inicial (N_i)**

Figura B19: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial (tela 3).

Modelo estatístico codificado (Equação B7):

$$N_i = 0,0266 + 0,0026 \cdot T + 0,0080 \cdot v - 0,0012 \cdot v^2 \quad (\text{B7})$$

Tabela B19: Coeficientes de regressão para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,026658 | 0,000368 | $9,52 \cdot 10^{-9}$ | 0,025711 | 0,027604 |
| T (L) | 0,002635 | 0,000383 | 0,000995 | 0,001650 | 0,003620 |
| v (L) | 0,007999 | 0,000383 | $4,68 \cdot 10^{-6}$ | 0,007013 | 0,008984 |
| v (Q) | -0,001160 | 0,000398 | 0,032807 | -0,002190 | -0,000140 |

Tabela B20: Análise de variância para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $5,775 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $1,92 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $1,454 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $1,454 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $8,99 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $5,88 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,18 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000592 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9749$$

Tabela B21: Valores para o teste F para a resposta N_i (R_1) da tela 3.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 132,38 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,52 | 5,05 |

% de variação explicada: 97,55

% máxima de variação explicável: 99,01

$$F_{\text{calculado}} = 35,68 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

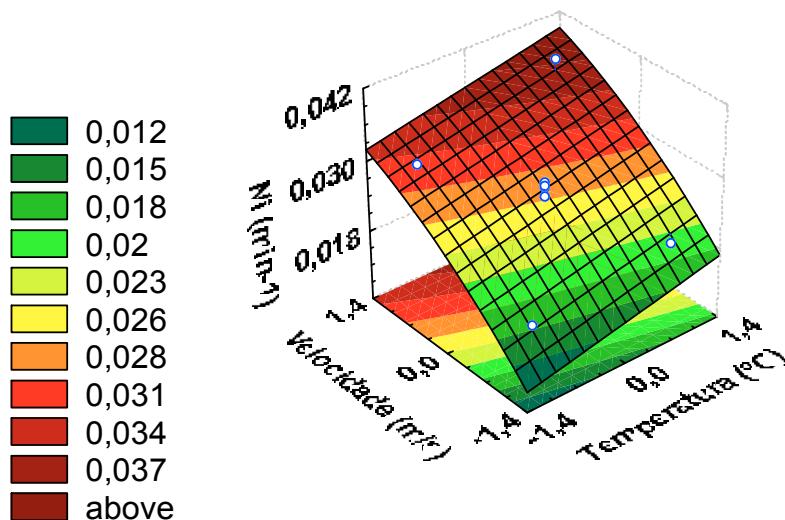


Figura B20: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial (tela 3).

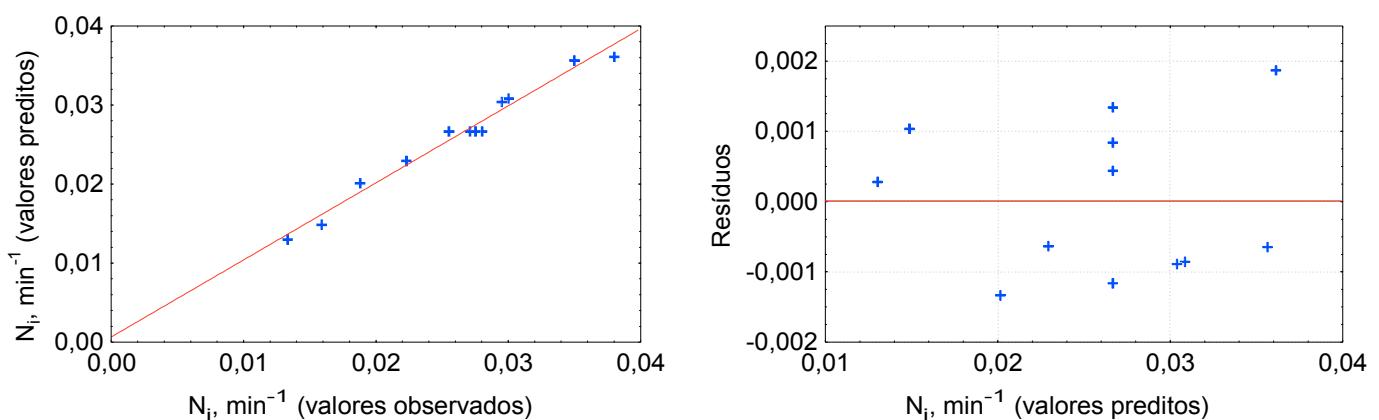


Figura B21: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial (tela 3).

- Taxa de secagem constante (N_c)

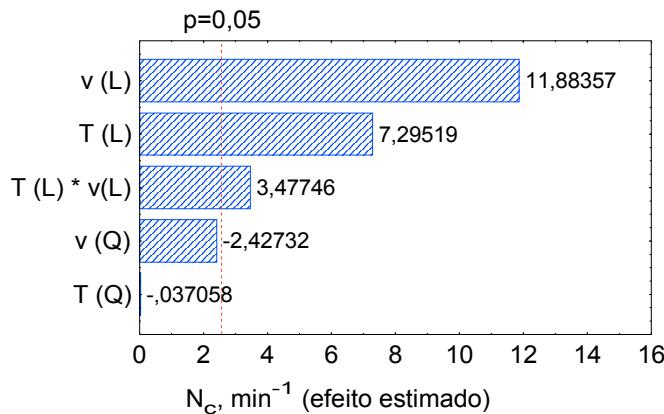


Figura B22: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante (tela 3).

Modelo estatístico codificado (Equação B8):

$$N_c = 0,0217 + 0,0031 \cdot T + 0,0051 \cdot v + 0,0021 \cdot T \cdot v \quad (\text{B8})$$

Tabela B22: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,021750 | 0,000327 | $1,45 \cdot 10^{-8}$ | 0,020910 | 0,022590 |
| T (L) | 0,003152 | 0,000432 | 0,000758 | 0,002041 | 0,004263 |
| v (L) | 0,005135 | 0,000432 | 0,000074 | 0,004024 | 0,006246 |
| T^*v | 0,002125 | 0,000611 | 0,017707 | 0,000554 | 0,003696 |

Tabela 23: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $3,0823 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $1,027 \cdot 10^{-4}$ |
| Resíduos | $1,777 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $1,777 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $2,06 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $7,47 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,49 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000326 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9455$$

Tabela B24: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 3.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 57,82 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,38 | 5,05 |

% de variação explicada: 94,54

% máxima de variação explicável: 97,71

$$F_{\text{calculado}} = 15,18 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

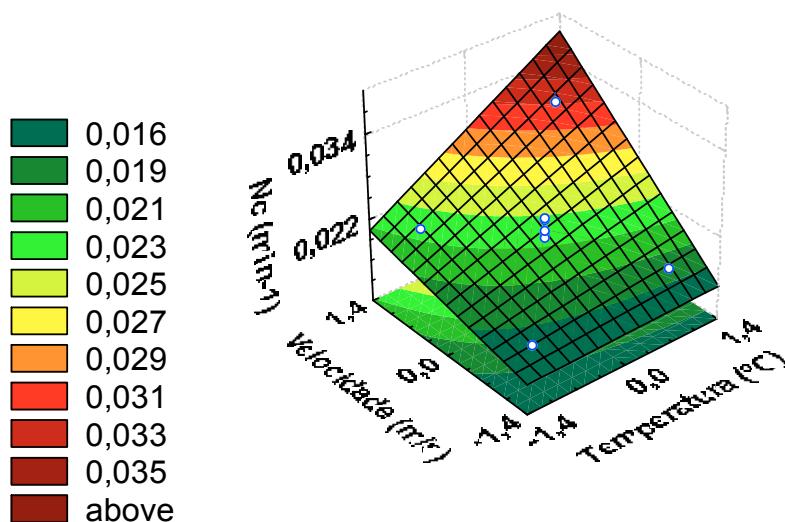
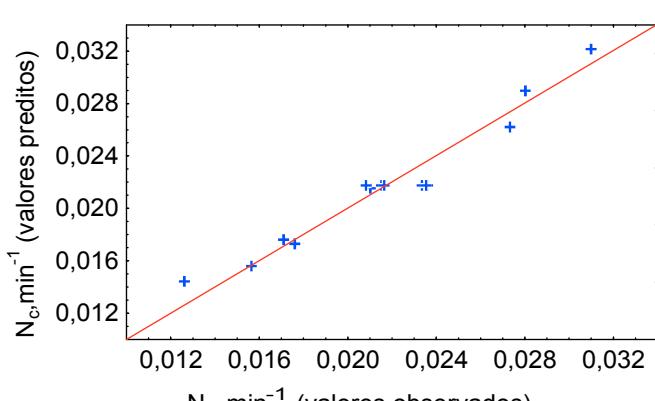
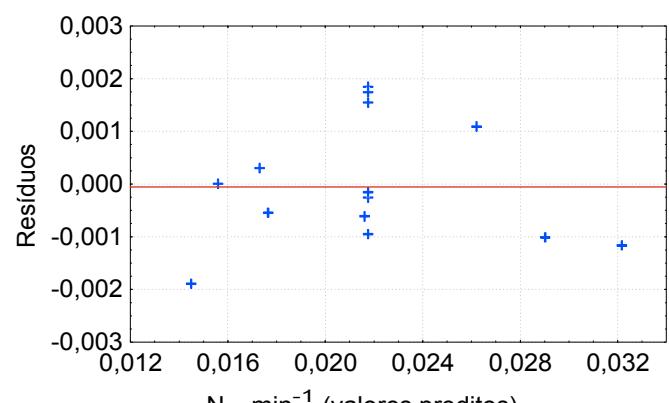


Figura B23: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante (tela 3).



(a)



(b)

Figura B24: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante (tela 3).

- Teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial ($\frac{X_f}{X_0}$)

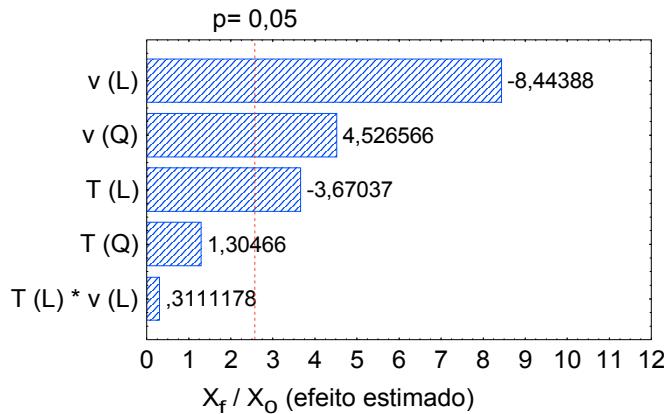


Figura B25: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado (tela 3).

Modelo estatístico codificado (Equação B9):

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0604 - 0,0480 \cdot T - 0,1103 \cdot v + 0,0602 \cdot v^2 \quad (\text{B9})$$

Tabela B25: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,060421 | 0,012556 | 0,004832 | 0,028145 | 0,092697 |
| T (L) | -0,047966 | 0,013069 | 0,014438 | -0,081560 | -0,014373 |
| v (L) | -0,110349 | 0,013069 | 0,000382 | -0,143943 | -0,076756 |
| v (Q) | 0,060206 | 0,013562 | 0,006769 | 0,025344 | 0,095068 |

Tabela B26: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,1427491 | 3 | $4,75 \cdot 10^{-2}$ |
| Resíduos | 0,0124611 | 10 | $1,246 \cdot 10^{-3}$ |
| Falta de ajuste | 0,0056296 | 5 | 0,001126 |
| Erro puro | 0,0068315 | 5 | 0,001366 |
| Total | 0,1552102 | 13 | - |

$R^2 = 0,9112$

Tabela B27: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 3.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 38,18 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,82 | 5,05 |

% de variação explicada: 91,97

% máxima de variação explicável: 95,59

$$F_{\text{calculado}} = 10,29 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

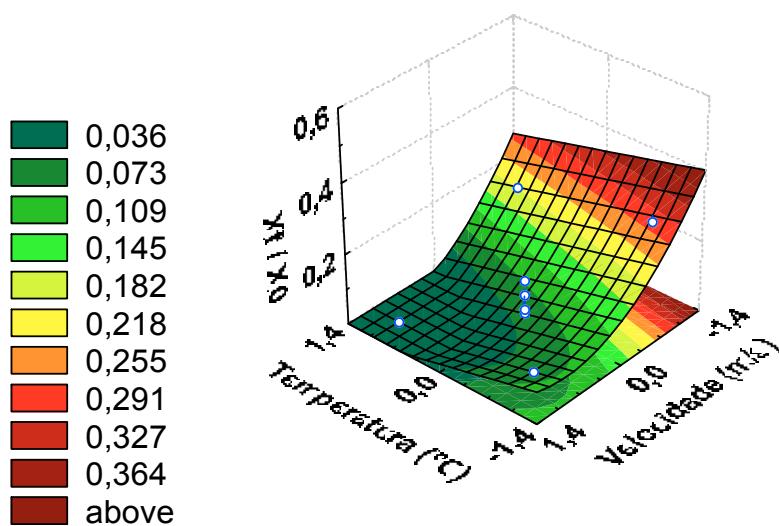


Figura B26: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado (tela 3).

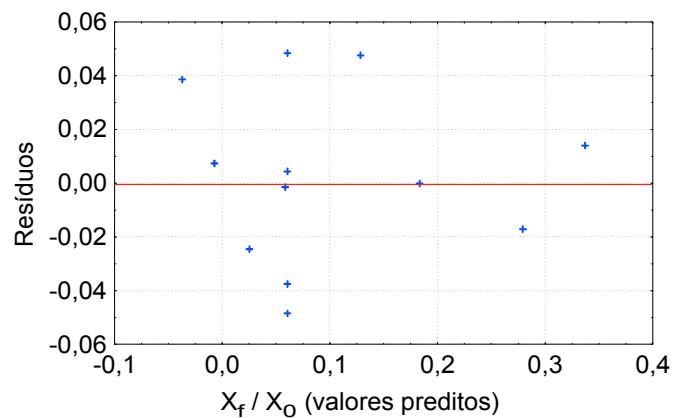
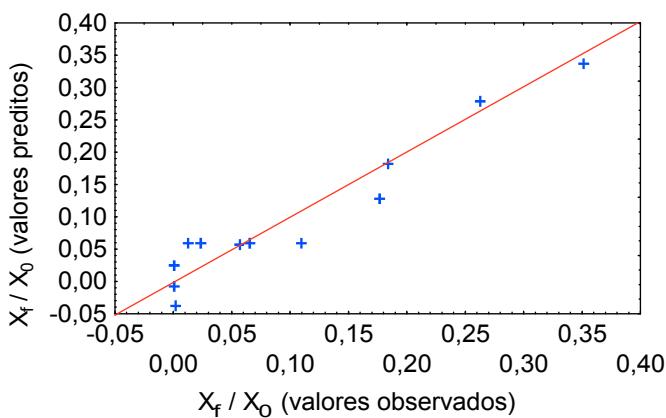


Figura B27: (a) Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado (tela 3).

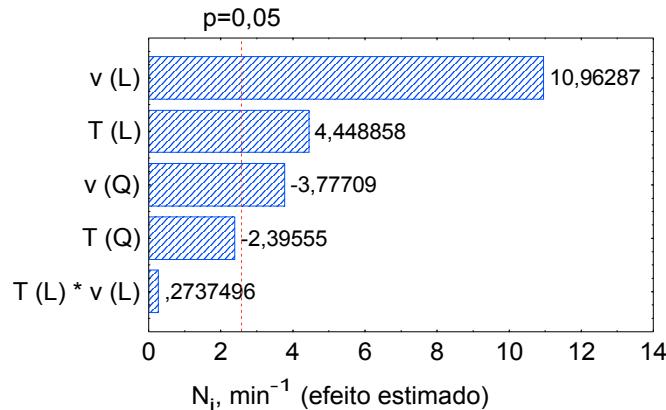
Tela 4**- Taxa de secagem inicial (N_i)**

Figura B28: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial (tela 4).

Modelo estatístico codificado (Equação B10):

$$N_i = 0,0197 + 0,002 \cdot T + 0,0049 \cdot v - 0,0017 \cdot v^2 \quad (\text{B10})$$

Tabela B28: Coeficientes de regressão para a resposta N_i (R_1) da tela 4.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,019673 | 0,000434 | $9,9 \cdot 10^{-8}$ | 0,018557 | 0,020789 |
| T (L) | 0,002011 | 0,000452 | 0,006709 | 0,000849 | 0,003173 |
| v (L) | 0,004956 | 0,000452 | 0,000110 | 0,003794 | 0,006118 |
| v (Q) | -0,001690 | 0,000469 | 0,015486 | -0,0029 | -0,000480 |

Tabela B29: Análise de variância para a resposta N_i (R_1) da tela 4.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $2,497 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $8,32 \cdot 10^{-5}$ |
| Resíduos | $2,227 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $2,227 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $1,41 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $2,83 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $8,17 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,63 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000272 | 13 | - |

$R^2 = 0,9181$

Tabela B30: Valores para o teste F para a resposta $N_i (R_1)$ da tela 4.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 37,37 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 1,74 | 5,05 |

% de variação explicada: 91,80

% máxima de variação explicável: 96,99

$$F_{\text{calculado}} = 10,07 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

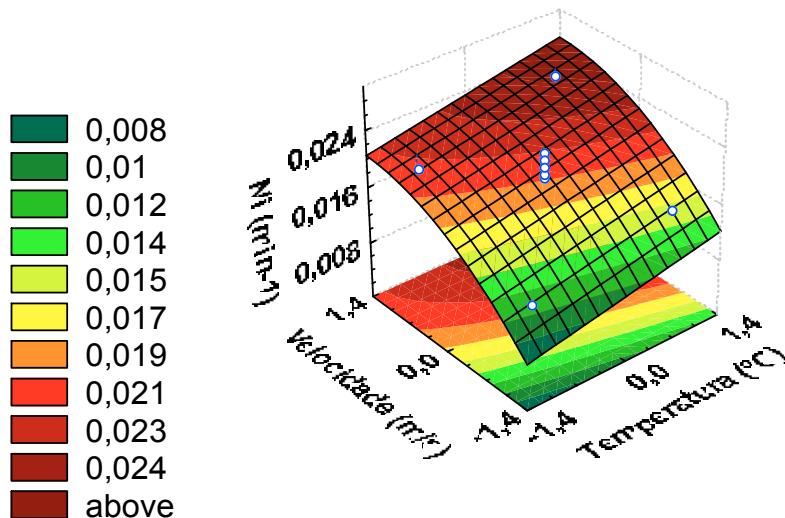


Figura B29: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial (tela 4).

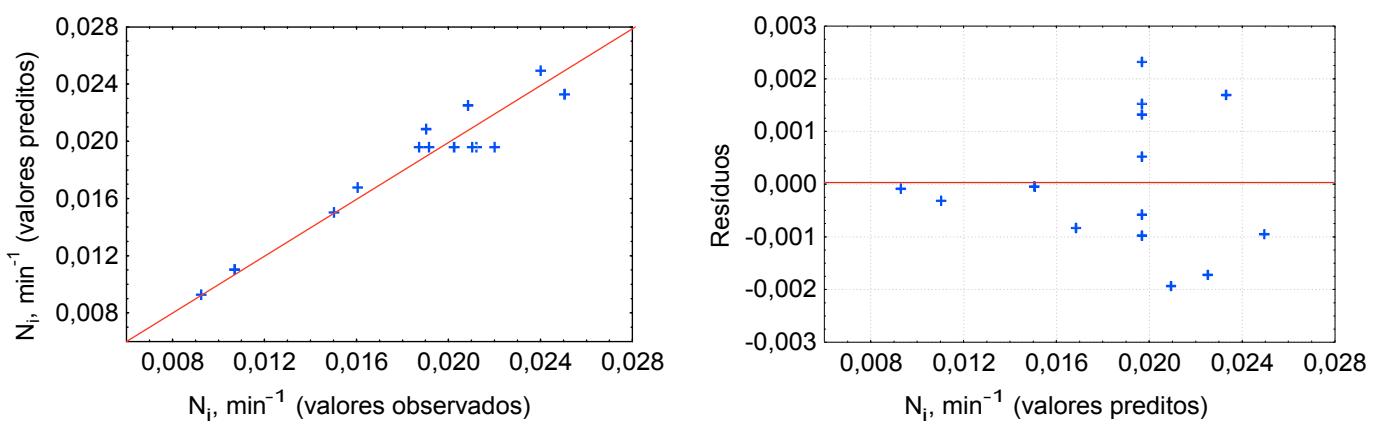


Figura B30: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial (tela 4).

- Taxa de secagem constante (N_c)

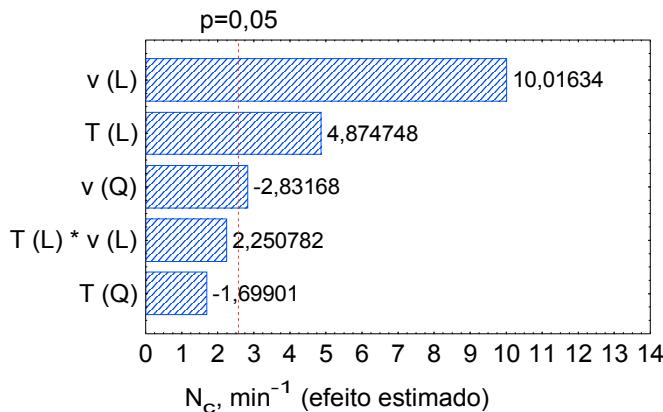


Figura B31: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante (tela 4).

Modelo estatístico codificado (Equação B11):

$$N_c = 0,0186 + 0,0021 \cdot T + 0,0042 \cdot v - 0,0012 \cdot v^2 \quad (\text{B11})$$

Tabela B31: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 4.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,018588 | 0,000407 | $9,56 \cdot 10^{-8}$ | 0,017541 | 0,019636 |
| $T(L)$ | 0,002067 | 0,000424 | 0,004574 | 0,000977 | 0,003158 |
| $v(L)$ | 0,004248 | 0,000424 | 0,000170 | 0,003158 | 0,005338 |
| $v(Q)$ | -0,001190 | 0,000440 | 0,042326 | -0,002320 | $-6,1 \cdot 10^{-5}$ |

Tabela B32: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 4.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $1,887 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $6,29 \cdot 10^{-5}$ |
| Resíduos | $2,229 \cdot 10^{-5}$ | 10 | $2,229 \cdot 10^{-6}$ |
| Falta de ajuste | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 5 | $3,03 \cdot 10^{-6}$ |
| Erro puro | $7,19 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $1,44 \cdot 10^{-6}$ |
| Total | 0,000211 | 13 | - |

$$R^2 = 0,8943$$

Tabela B33: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 4.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 28,22 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 2,10 | 5,05 |

% de variação explicada: 89,43

% máxima de variação explicável: 96,59

$$F_{\text{calculado}} = 7,60 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

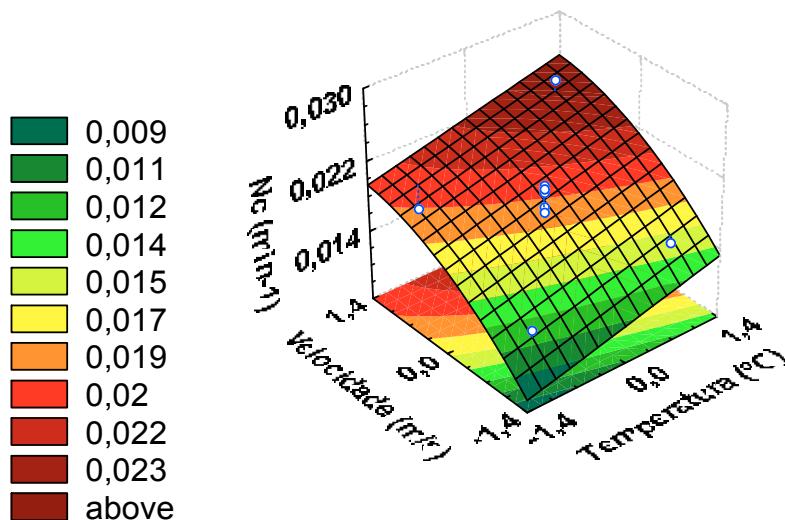
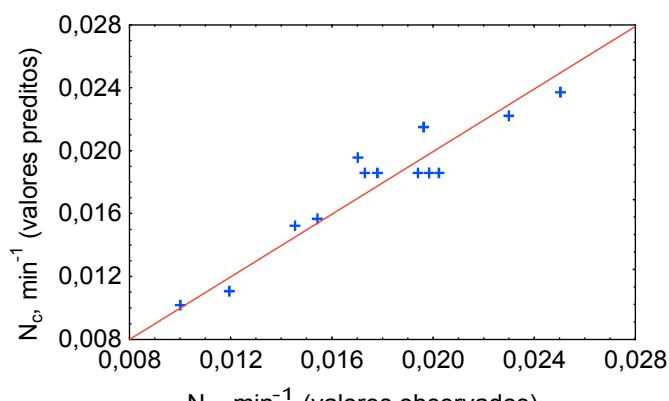
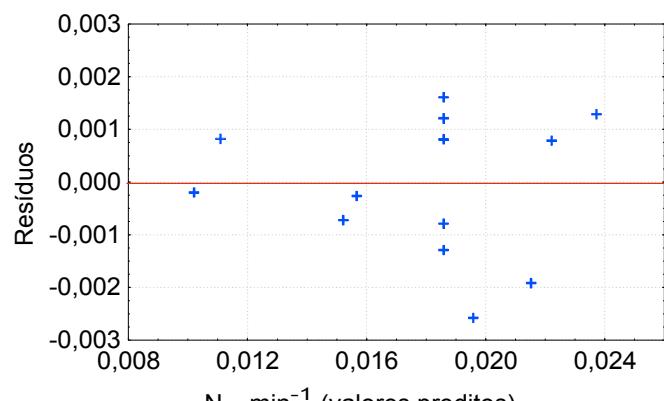


Figura B32: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante (tela 4).



(a)



(b)

Figura B33: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante (tela 4).

- Teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial ($\frac{X_f}{X_0}$)

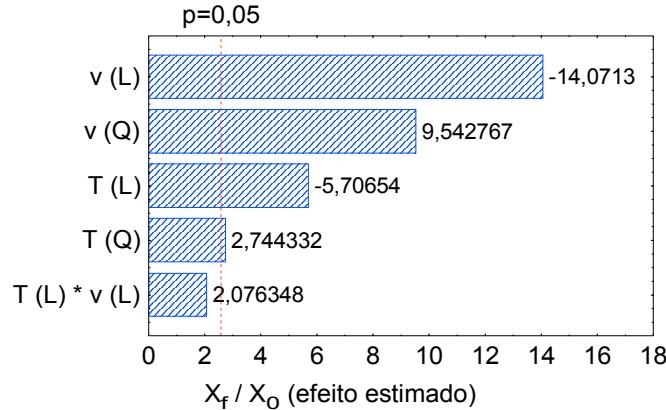


Figura B34: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado (tela 4).

Modelo estatístico codificado (Equação B12):

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0188 - 0,0458 \cdot T + 0,0229 \cdot T^2 - 0,1128 \cdot v + 0,0796 \cdot v^2 \quad (B12)$$

Tabela B34: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 4.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,018833 | 0,009261 | 0,097652 | -0,004972 | 0,042639 |
| T (L) | -0,045767 | 0,008020 | 0,002308 | -0,066383 | -0,025150 |
| T (Q) | 0,022908 | 0,008348 | 0,040583 | 0,001450 | 0,044366 |
| v (L) | -0,112852 | 0,008020 | 0,000033 | -0,133468 | -0,092236 |
| v (Q) | 0,079658 | 0,008348 | 0,000214 | 0,058200 | 0,101116 |

Tabela B35: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 4.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,167592 | 4 | 0,041898 |
| Resíduos | 0,007349 | 9 | $8,16 \cdot 10^{-4}$ |
| Falta de ajuste | 0,004776 | 4 | 0,001194 |
| Erro puro | 0,002573 | 5 | 0,000515 |
| Total | 0,174941 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9580$$

Tabela B36: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 4.

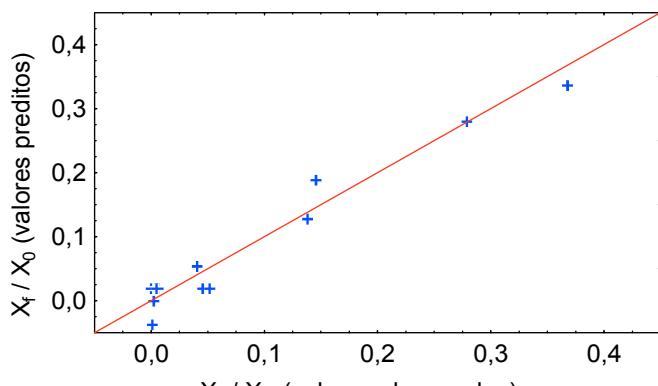
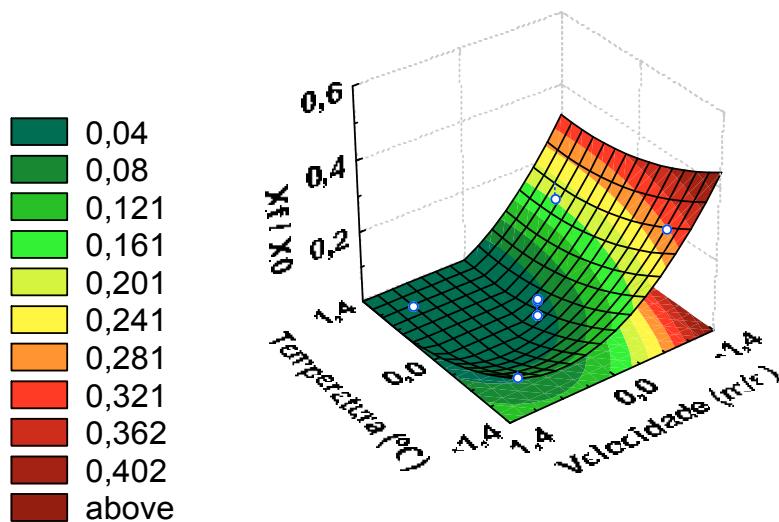
| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 51,34 | 3,63 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 2,32 | 5,19 |

% de variação explicada: 95,79

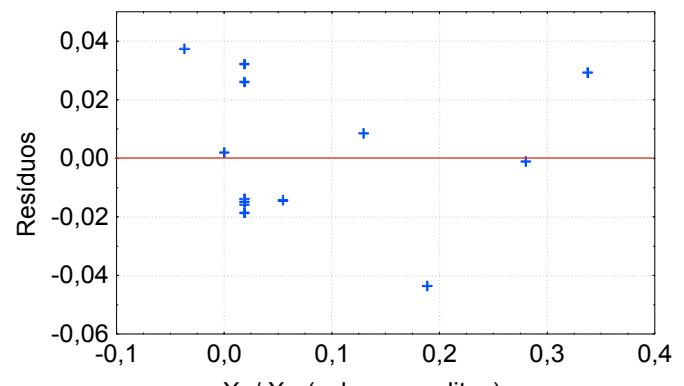
% máxima de variação explicável: 98,53

$$F_{\text{calculado}} = 14,14 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{4,5} (\alpha = 95\%) = 5,19 \text{ (não há falta de ajuste do modelo)}$$



(a)



(b)

Figura B36: (a) Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado (tela 4).

Tela 5

- Taxa de secagem inicial (N_i)

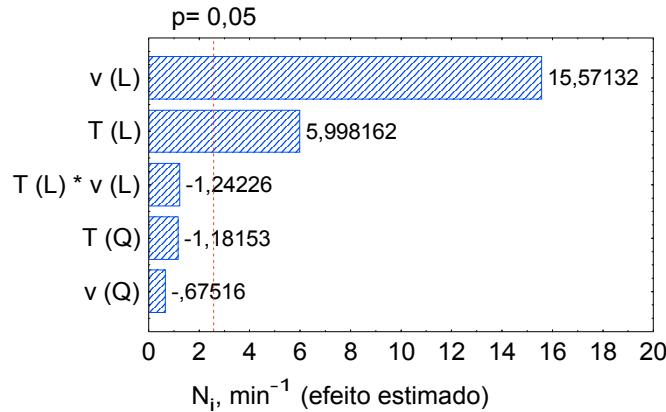


Figura B37: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem inicial (tela 5).

Modelo estatístico codificado (Equação B13):

$$N_i = 0,014 + 0,0017 \cdot T + 0,0044 \cdot v \quad (\text{B13})$$

Tabela B37: Coeficientes de regressão para a resposta N_i (R_1) da tela 5.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,014086 | 0,000215 | $1,57 \cdot 10^{-8}$ | 0,013533 | 0,014639 |
| T (L) | 0,001707 | 0,000285 | 0,001849 | 0,000976 | 0,002439 |
| v (L) | 0,004432 | 0,000285 | $1,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,0037 | 0,005163 |

Tabela B38: Análise de variância para a resposta N_i (R_1) da tela 5.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $1,807 \cdot 10^{-4}$ | 2 | $9,037 \cdot 10^{-5}$ |
| Resíduos | $6,25 \cdot 10^{-6}$ | 11 | $5,68 \cdot 10^{-7}$ |
| Falta de ajuste | $3,01 \cdot 10^{-6}$ | 6 | $5,01 \cdot 10^{-7}$ |
| Erro puro | $3,24 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $6,48 \cdot 10^{-7}$ |
| Total | 0,000187 | 13 | - |

$R^2 = 0,9665$

Tabela B39: Valores para o teste F para a resposta N_i (R_1) da tela 5.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 159,10 | 3,98 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,77 | 4,95 |

% de variação explicada: 96,63

% máxima de variação explicável: 98,27

$$F_{\text{calculado}} = 39,97 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{6,5} (\alpha = 95\%) = 4,95$ (não há falta de ajuste do modelo)

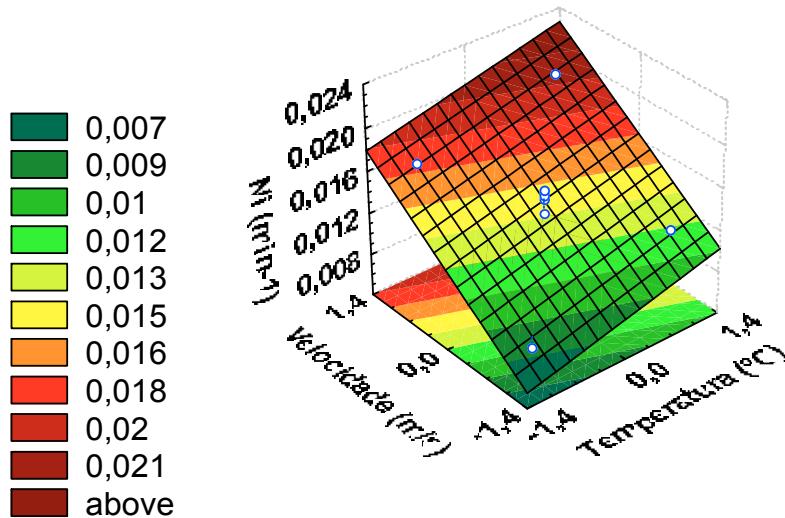


Figura B38: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem inicial (tela 5).

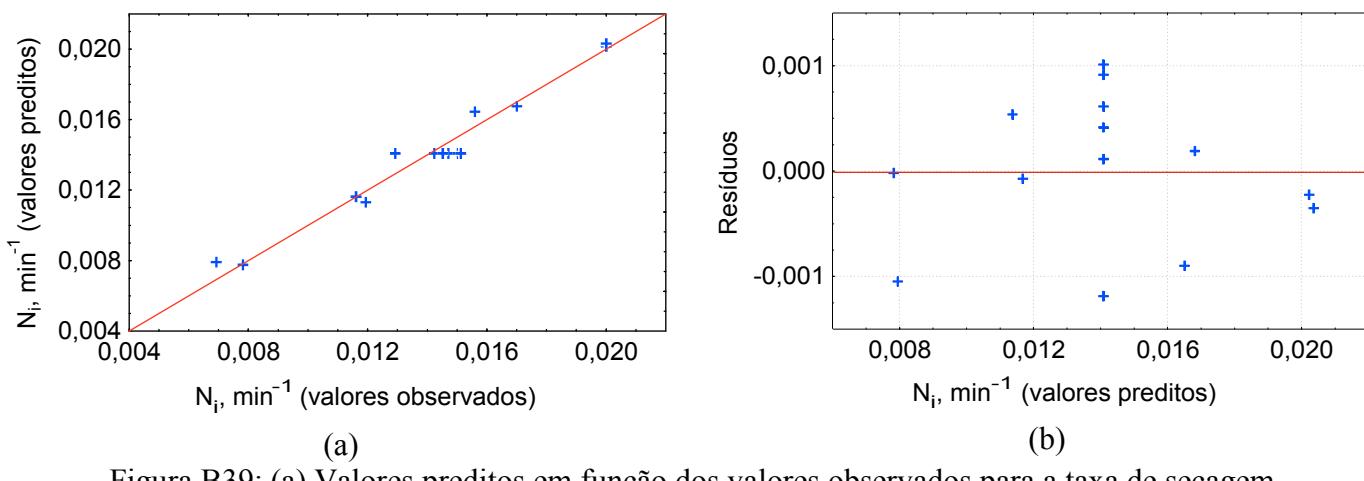


Figura B39: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem inicial; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem inicial (tela 5).

- Taxa de secagem constante (N_c)

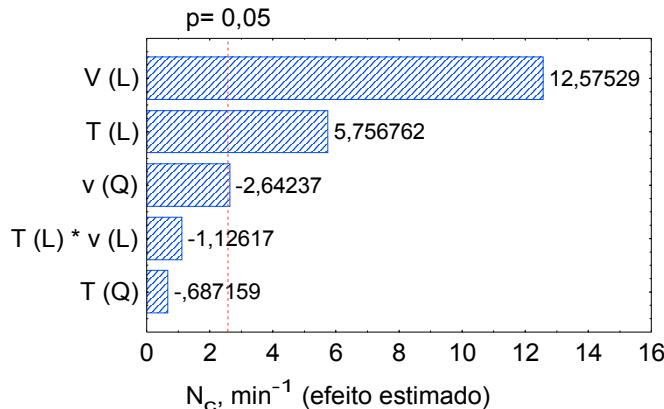


Figura B40: Diagrama de Pareto para a taxa de secagem constante (tela 5).

Modelo estatístico codificado (Equação B14):

$$N_c = 0,0143 + 0,0016 \cdot T + 0,0035 \cdot v - 0,0008 \cdot v^2 \quad (\text{B14})$$

Tabela B40: Coeficientes de regressão para a resposta N_c (R_2) da tela 5.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,014342 | 0,000271 | 0,000000 | 0,013644 | 0,015040 |
| T (L) | 0,001627 | 0,000283 | 0,002220 | 0,000900 | 0,002353 |
| v (L) | 0,003553 | 0,000283 | 0,000056 | 0,002827 | 0,004279 |
| v (Q) | -0,000762 | 0,000293 | 0,048412 | -0,001515 | -0,000008 |

Tabela B41: Análise de variância para a resposta N_c (R_2) da tela 5.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | $1,264 \cdot 10^{-4}$ | 3 | $4,21 \cdot 10^{-5}$ |
| Resíduos | $4,578 \cdot 10^{-6}$ | 10 | $4,578 \cdot 10^{-7}$ |
| Falta de ajuste | $1,385 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $2,77 \cdot 10^{-7}$ |
| Erro puro | $3,193 \cdot 10^{-6}$ | 5 | $6,387 \cdot 10^{-7}$ |
| Total | 0,000131 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9651$$

Tabela B42: Valores para o teste F para a resposta N_c (R_2) da tela 5.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 92,05 | 3,71 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,43 | 5,05 |

% de variação explicada: 96,49

% máxima de variação explicável: 97,56

$$F_{\text{calculado}} = 24,81 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{5,5} (\alpha = 95\%) = 5,05$ (não há falta de ajuste do modelo)

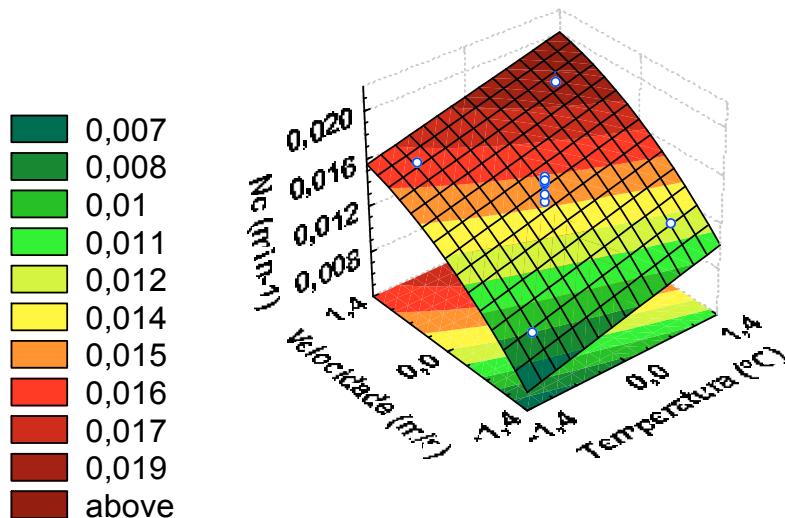


Figura B41: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente à taxa de secagem constante (tela 5).

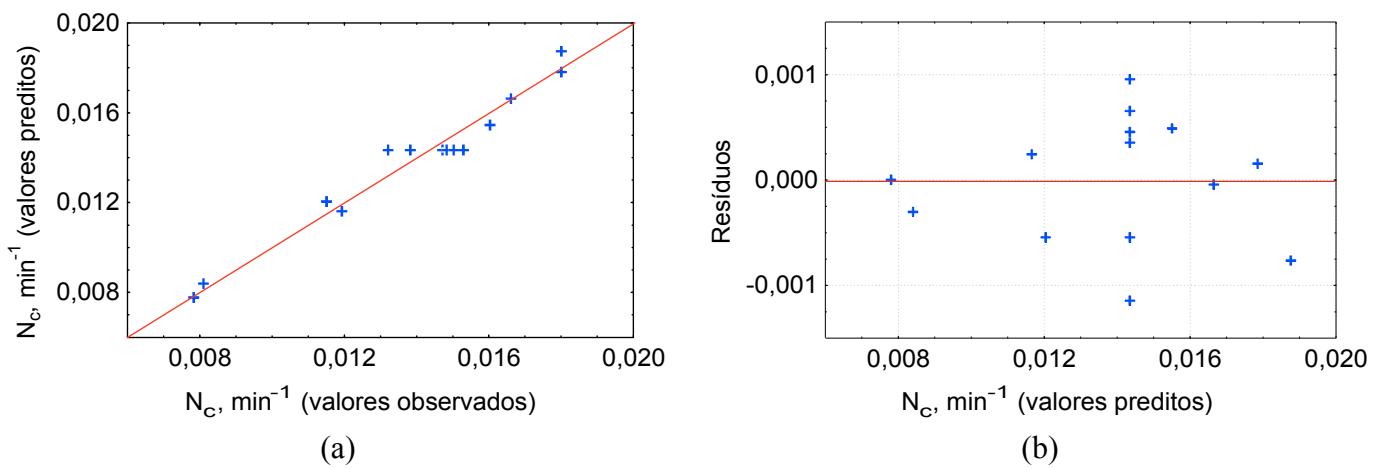


Figura B42: (a) Valores preditos em função dos valores observados para a taxa de secagem constante; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para a taxa de secagem constante (tela 5).

- Teor de umidade final parametrizado em relação ao teor de umidade inicial ($\frac{X_f}{X_0}$)

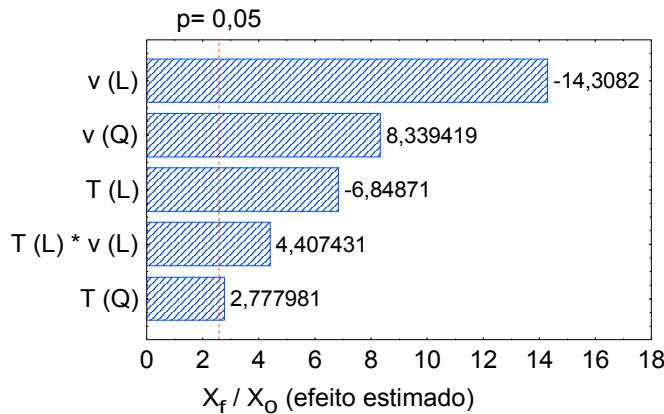


Figura B43: Diagrama de Pareto para o teor de umidade final parametrizado (tela 5).

Modelo estatístico codificado (Equação B15):

$$\frac{X_f}{X_0} = 0,0338 - 0,0701 \cdot T + 0,0296 \cdot T^2 - 0,1464 \cdot v + 0,0888 \cdot v^2 + 0,0638 \cdot T \cdot v \quad (B15)$$

Tabela B43: Coeficientes de regressão para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 5.

| Variáveis independentes significativas | Coeficientes de regressão | Desvio padrão | p | Limite de confiança (-95%) | Limite de confiança (+95%) |
|--|---------------------------|---------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Média | 0,033833 | 0,011819 | 0,035300 | 0,003451 | 0,064216 |
| T (L) | -0,070102 | 0,010236 | 0,001014 | -0,096414 | -0,043790 |
| T (Q) | 0,029596 | 0,010654 | 0,038995 | 0,002210 | 0,056982 |
| v (L) | -0,146455 | 0,010236 | 0,000030 | -0,172767 | -0,120143 |
| v (Q) | 0,088846 | 0,010654 | 0,000405 | 0,061460 | 0,116232 |
| T^*v | 0,063800 | 0,014476 | 0,006973 | 0,026589 | 0,101011 |

Tabela B44: Análise de variância para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 5.

| Fonte de variação | Soma quadrática (SQ) | Nº de graus de liberdade | Média quadrática (MQ) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Regressão | 0,289328 | 5 | 0,057866 |
| Resíduos | 0,005313 | 8 | $6,64 \cdot 10^{-4}$ |
| Falta de ajuste | 0,001122 | 3 | 0,000374 |
| Erro puro | 0,004191 | 5 | 0,000838 |
| Total | 0,294641 | 13 | - |

$$R^2 = 0,9820$$

Tabela B45: Valores para o teste F para a resposta X_f/X_0 (R_3) da tela 5.

| | $F_{\text{calculado}}$ | F_{tabelado} |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| MQ_R/MQ_r | 87,15 | 3,69 |
| MQ_{faj}/MQ_{ep} | 0,44 | 5,41 |

% de variação explicada: 98,19

% máxima de variação explicável: 98,57

$$F_{\text{calculado}} = 23,61 \cdot F_{\text{tabelado}}$$

$MQ_{faj}/MQ_{ep} < F_{3,5} (\alpha = 95\%) = 5,41$ (não há falta de ajuste do modelo)

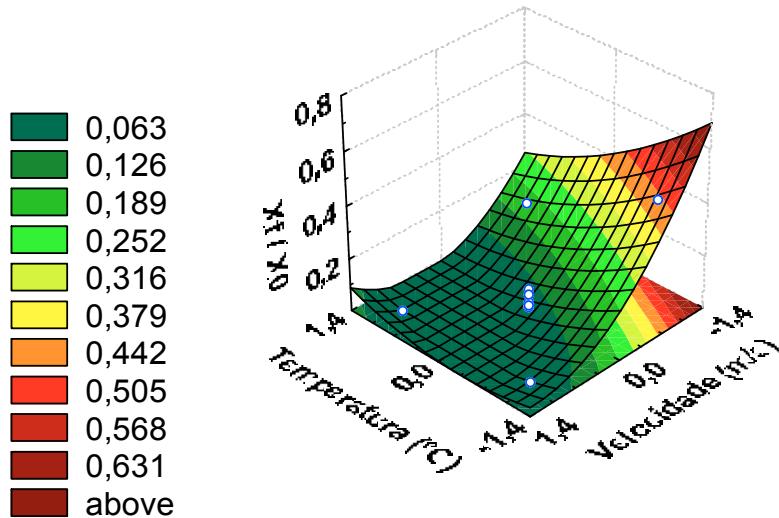
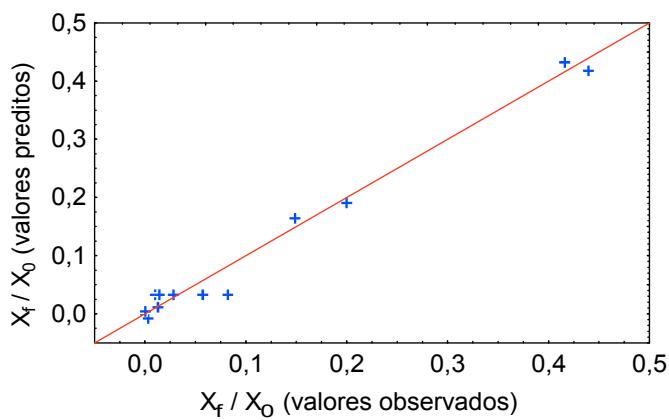
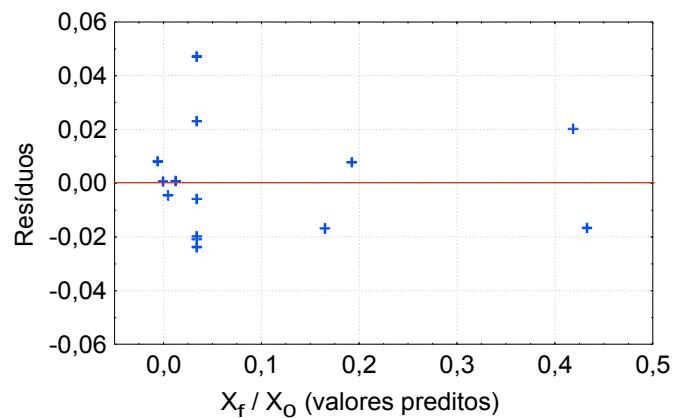


Figura B44: Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro, correspondente ao teor de umidade final parametrizado (tela 5).



(a)



(b)

Figura B45: (a) Valores preditos em função dos valores observados para o teor de umidade final parametrizado; (b) Distribuição dos resíduos em função do modelo para o teor de umidade final parametrizado (tela 5).

ANEXO C

Análise da Qualidade

Gramatura média (g/m^2)

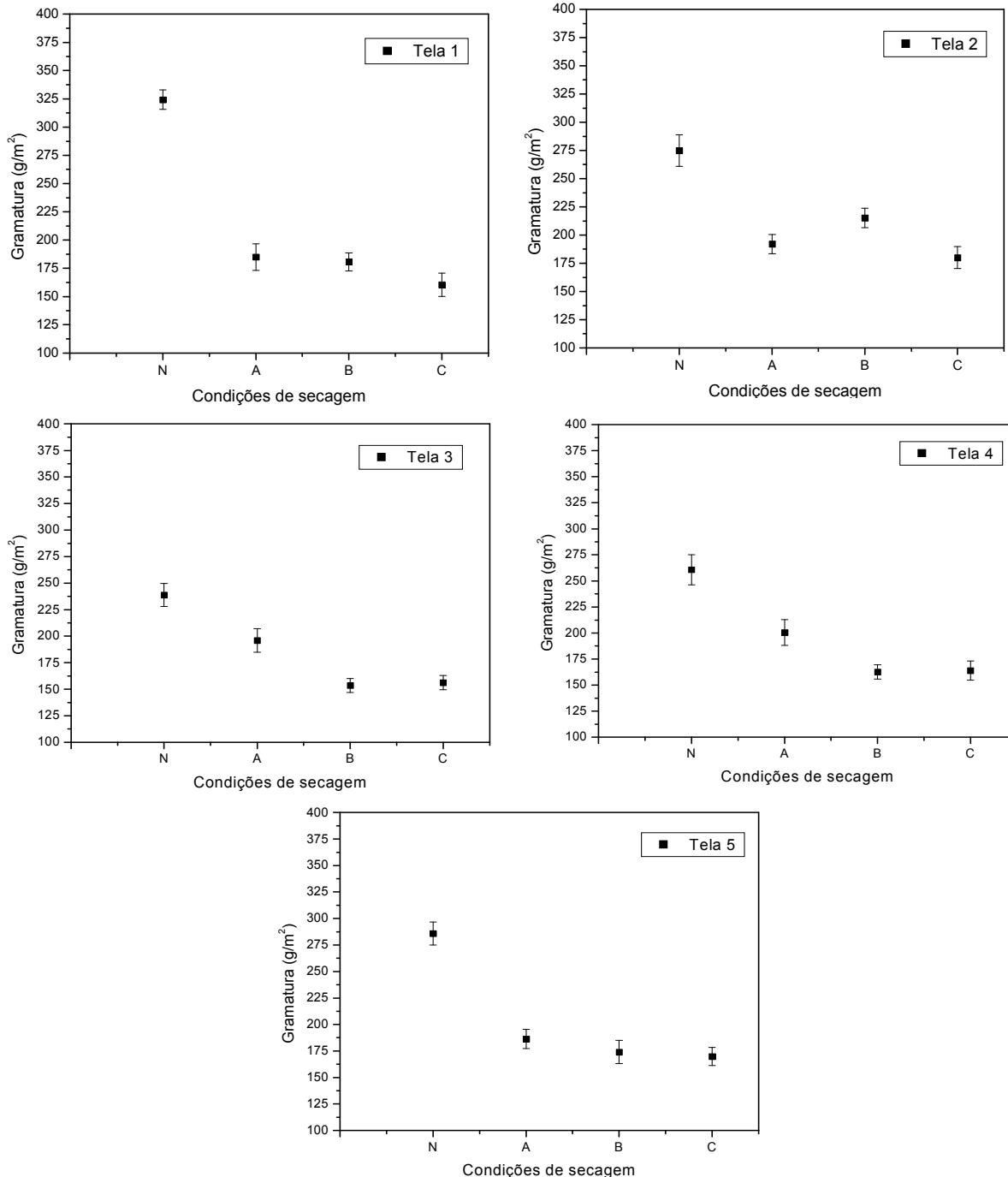


Figura C1: Influência das condições de secagem na gramatura média das folhas de papel para as 5 telas. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Espessura Média (mm)

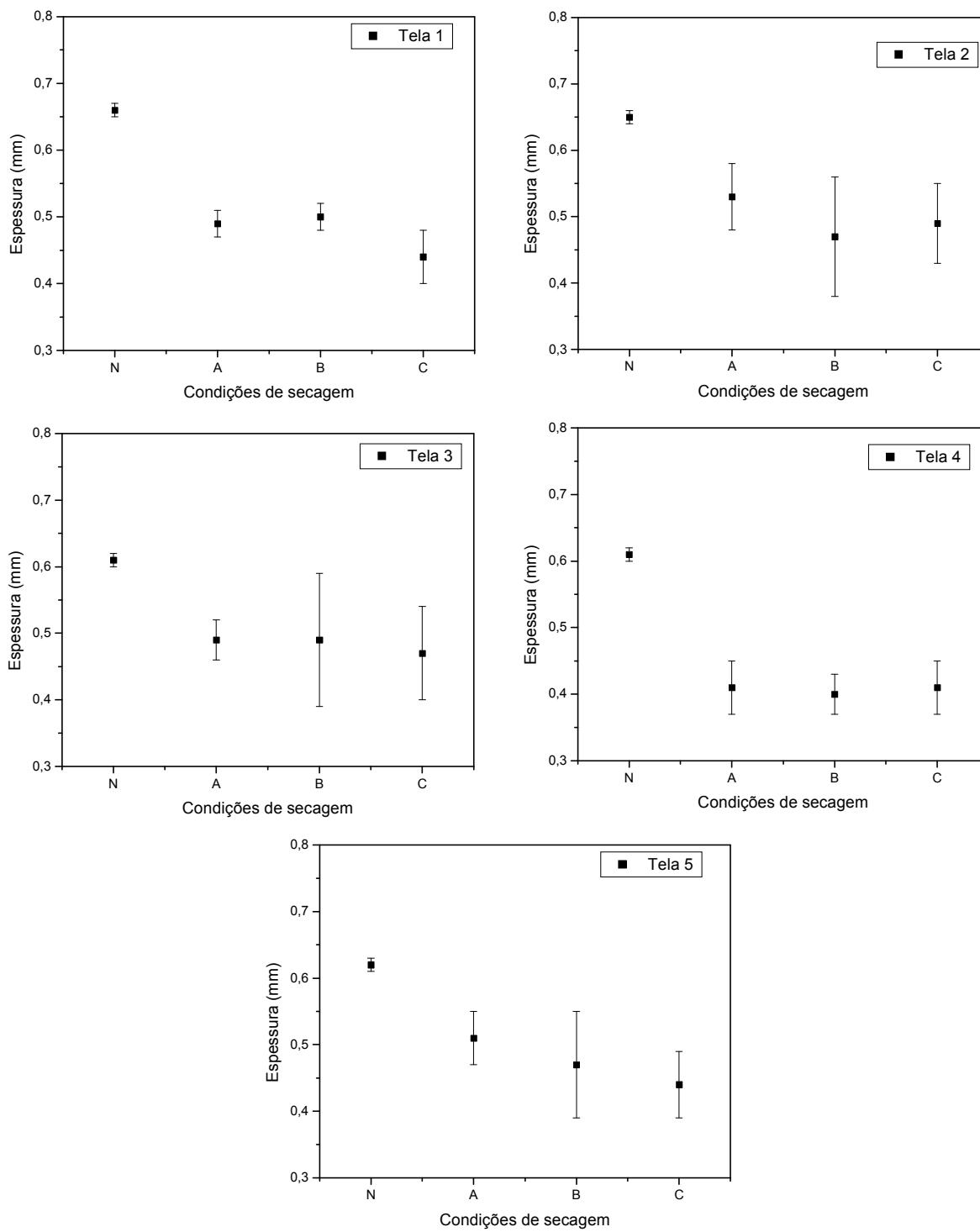


Figura C2: Influência das condições de secagem na espessura média das folhas de papel para as 5 telas. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Densidade aparente

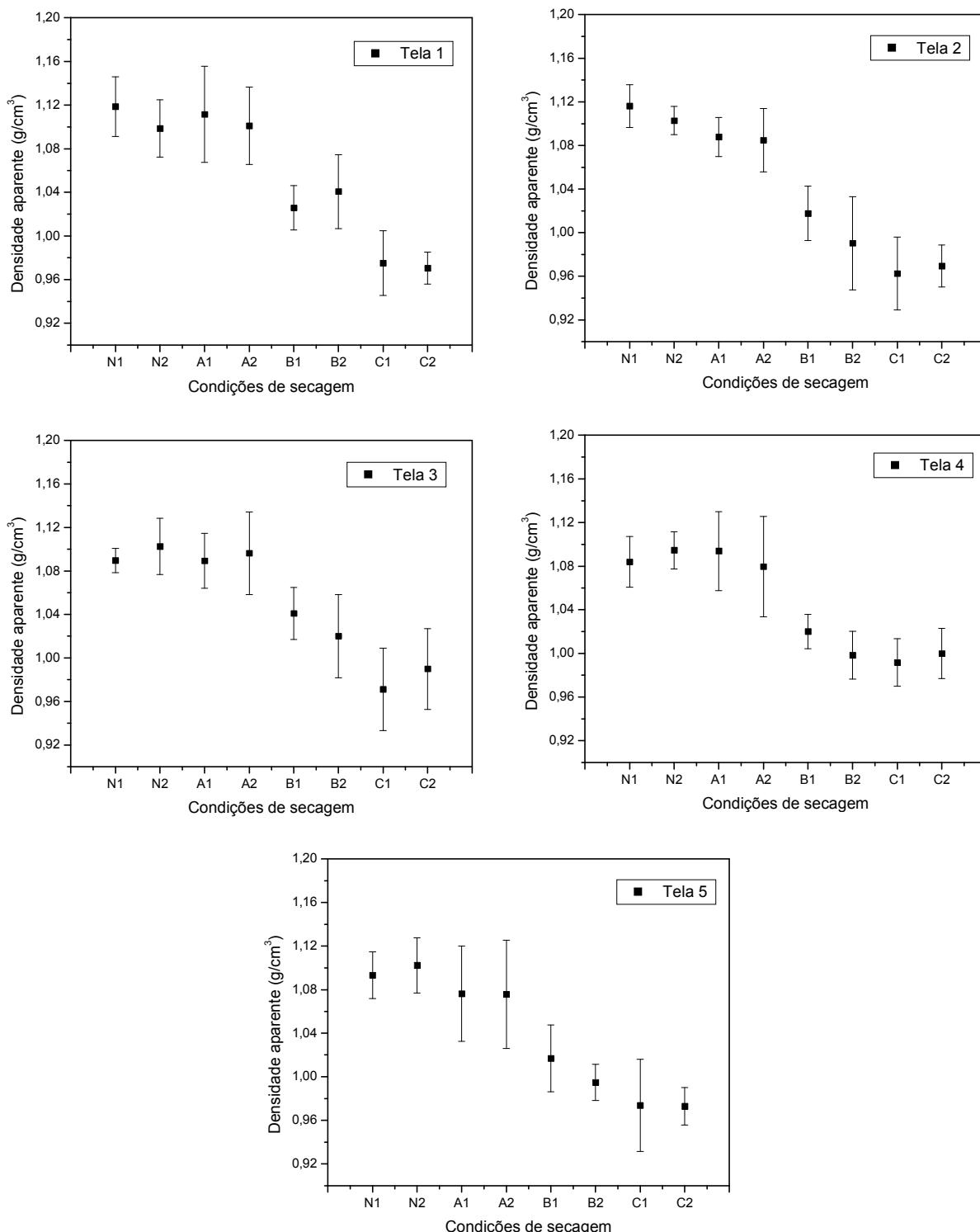


Figura C3: Influência das condições de secagem na densidade aparente das folhas de papel para as 5 telas. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).

Porosidade

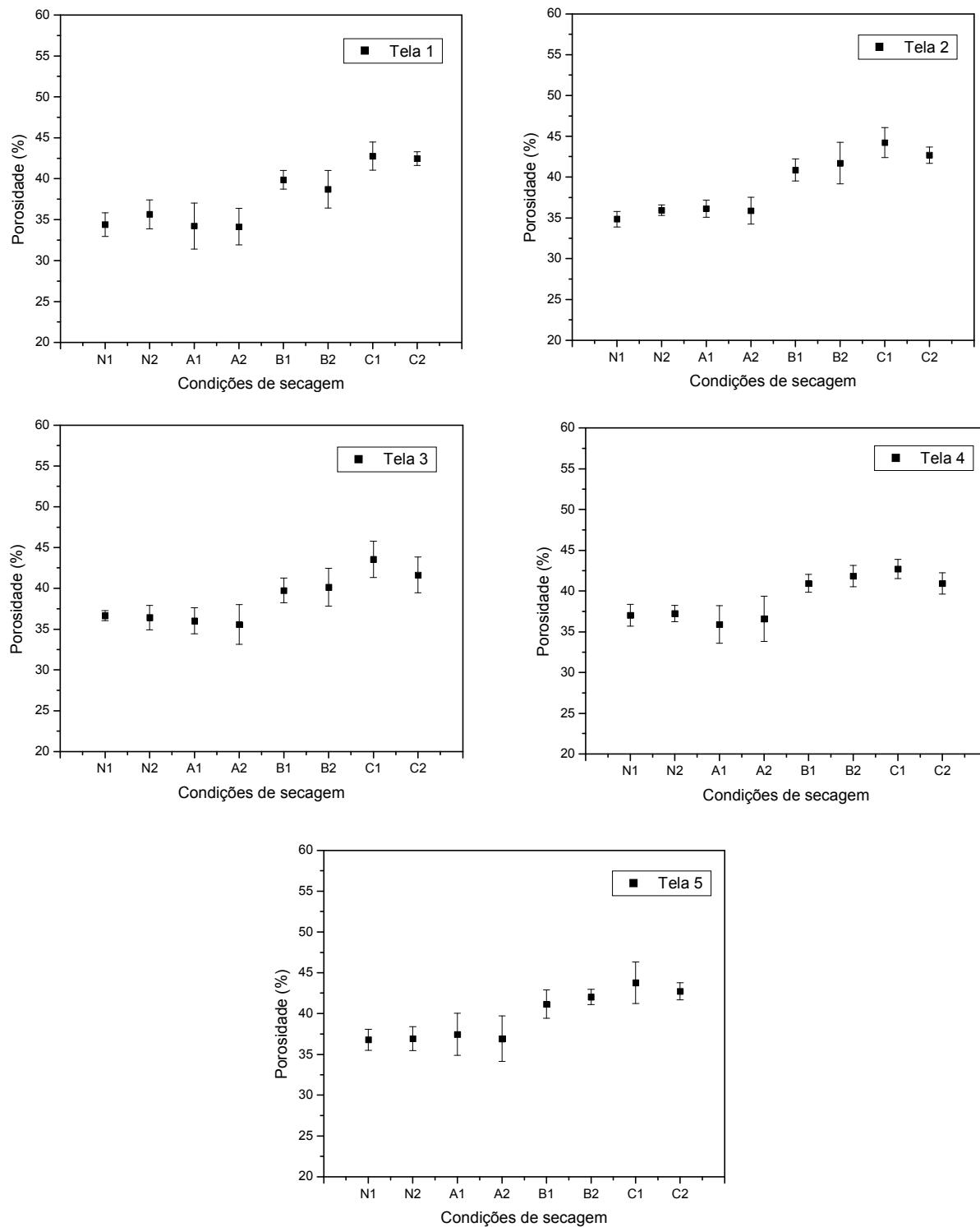


Figura C4: Influência das condições de secagem na porosidade das folhas de papel para as 5 telas. Legenda: N: secagem natural; A: (-1,4;-1,4); B: (0;0); C: (+1,4;+1,4).