



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Oliveira dos Santos, José Celso; Curty da Motta Lima, Oswaldo; Curvelo Pereira, Nehemias; Costa Dutra Sousa, Luiza Helena

Estudo da cinética e isoterma de secagem de tecido composto por poliéster e algodão

Acta Scientiarum. Technology, vol. 30, núm. 1, 2008, pp. 63-72

Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226520009>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Estudo da cinética e isoterma de secagem de tecido composto por poliéster e algodão

**José Celso Oliveira dos Santos<sup>1\*</sup>, Oswaldo Curty da Motta Lima<sup>2</sup>, Nehemias Curvelo Pereira<sup>2</sup> e Luiza Helena Costa Dutra Sousa<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade Estadual de Maringá, Campus de Goioerê, Av. Prof. Dr. Zeferino Vaz, s/n, 87360-000, Goioerê, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: jcosantos@uem.br

**RESUMO.** Nesta pesquisa foi analisada a secagem de tecido composto por fibras de poliéster e algodão que apresentam, atualmente, o maior consumo no Brasil. O equipamento para a secagem consistiu de uma placa de cobre aquecida por um banho termostático. As condições operacionais variaram entre 40 e 85°C, com 0,5 a 2,5 m s<sup>-1</sup> no ar de secagem. Em cada temperatura foram realizadas testes com amostras com umidades entre 0,7 e 1,0 (b.s.). Partindo-se da massa das amostras obtidas nas pesagens, realizadas a cada minuto, foram obtidas curvas de secagem e de taxa de secagem. As isotermas de equilíbrio foram determinadas pelo método dinâmico, com o equipamento Novasina, e as amostras foram expostas a sais com umidades relativas que variaram de 11 a 98%, nas temperaturas de 20 a 50°C. Os resultados foram ajustados a modelos e correlações disponíveis na literatura, avaliados estatisticamente, determinando-se parâmetros que melhor identificam o modelo de secagem desses tecidos.

**Palavras-chaves:** secagem de tecidos, materiais têxteis, secagem condutiva/convectiva, poliéster, algodão, isoterms.

**ABSTRACT. A study of the kinetic and isothermal characteristics of polyester/cotton fabric drying.** This research analyzed the drying of a fabric blend of polyester and cotton. The equipment consisted of a copper plate, heated by a thermostatic bath. The operating conditions varied between 40 and 85°C, with 0.5 to 2.5 m s<sup>-1</sup> drying air velocity. In each temperature, tests were conducted on samples with humidity between 0.7 and 1.0. Using the mass of the samples obtained in every weighting, the drying curves and drying rate curves were obtained. The equilibrium isotherms were evaluated using the dynamic method, by means of Novasina equipment; samples were exposed to salts with relative humidity varying between 11 and 98%, with temperatures between 50 and 20°C. The results were fitted to mathematical models available in literature, determining parameters that better identify the drying model.

**Key words:** drying fabrics, textile materials, conductive/convective drying, polyester, cotton, isotherms.

## Introdução

A produção de matéria-prima têxtil em grandes escala e a utilização de variadas fibras trouxe, ao homem, liberdade na escolha de suas roupas e flexibilidade de produção. Porém, mesmo com essa liberdade, continuam se destacando o algodão e o poliéster, fibras mais consumidas nos últimos anos no Brasil (IEMI, 2004).

O algodão brasileiro é conhecido por conferir um excelente acabamento, principalmente quando utilizado na fabricação de artigos mais pesados como, por exemplo, calças, blusões de moletom, lonas para cobrir e artigos para capas de sofás. O poliéster é um filamento contínuo, podendo ser transformado em fibras cortadas, muito utilizado

nos processos de fiação cardada. Com este polímero, consegue-se dar um excelente acabamento, destacando-se a lisura e o caiamento e, principalmente, por conseguir a termofixação, que é um processo que trabalha com temperatura mais elevada (entre 120 a 200°C) e com variação do tempo.

## Secagem

Após a fabricação do tecido, este é lavado, purgado, tinto e submetido à secagem. Do ponto de vista físico, a secagem de tecidos pode ser definida como um balanço entre a transferência de calor da corrente de ar para a superfície do tecido, e a transferência de umidade da superfície do tecido para a corrente de ar. No momento da secagem a água se movimenta de zonas de

alta umidade para zonas de baixa umidade, significando que a parte externa deve estar mais seca que a interior (Sousa, 2003). Esse conceito é válido para os processos de secagem por convecção, independente do material a ser seco.

De acordo com Ribeiro (2002), a migração da umidade em meios fibrosos e porosos pode ocorrer sob várias maneiras: pelo movimento em função da capilaridade, por difusão ao longo das fibras devido a gradientes de umidade e temperatura, e pela difusão de vapor devido às variações na pressão de vapor da umidade através da massa fibrosa.

No caso da secagem do papel, por exemplo, haveria uma predominância do escoamento capilar no início da secagem, com o processo difusivo assumindo o controle, ao término desta, em função do teor de umidade do material. Já para o tecido, dependendo da fibra e da estrutura, o escoamento capilar pode não ocorrer, dando lugar apenas ao escoamento por evaporação externa.

Gummel e Schlünder (1980) estudaram a secagem de malhas têxteis e papel, considerados como materiais porosos regulares, compostos por múltiplos feixes fibrosos, evidenciando um comportamento capilar.

O estudo sobre a forma como ocorre a secagem de um sólido pode basear-se no mecanismo interno de escoamento da umidade, no qual exige-se, em geral, uma investigação minuciosa das condições internas, fundamentada em conceitos de transferência de massa e calor ou na influência das condições externas, como temperatura e velocidade do ar de secagem e umidade inicial do produto que é o mecanismo mais utilizado, pois, seus resultados são aplicáveis no projeto e avaliação de equipamentos de secagem, de acordo com Sousa (2003).

### Curvas generalizadas de secagem

Neste trabalho, foram avaliados os modelos da literatura mais comumente utilizados para o tratamento dos dados das curvas generalizadas da cinética de secagem: Page (1949), Equação 1 e Overhultz *et al.* (1973), Equação 2 e Motta Lima *et al.* (2002), Equação 3.

$$Y = \exp[-k \cdot t_{ad}^n] \quad (1)$$

$$Y = \exp[-k_1 \cdot t_{ad}]^{n_1} \quad (2)$$

$$Y = \exp(-kt_{ad}^{(a \cdot t_{ad} + b)}) + 0,01 \quad (3)$$

$$\text{sendo } Y = X/X_0 \text{ e } t_{ad} = N_{tc}/X_0 \quad (4)$$

As curvas de taxa de secagem foram generalizadas de duas formas: adimensionalizando a taxa de secagem ( $N/N_{max}^{-1}$ ), conforme proposta por Hodges (1982) e denominada de TSN (taxa de secagem normalizada), e ainda conforme estudos de Motta Lima (1999), ( $N/N_{tc}^{-1}$ ), denominada de TSG (taxa de secagem generalizada).

Hodges (1982) propôs a Equação 5 e, a partir dela, Toffoli (2005), propôs a variação do expoente, de forma linear com a umidade, chegando às Equações 6, 7 e 8, as quais foram utilizadas nos ajustes das curvas generalizadas:

$$TSN = (N/N_{max}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{X}{a_1} \right)^{b_1} \right] \quad (5)$$

sendo TSN a taxa normalizada, X a umidade da amostra, e as constantes do modelo  $a_1$  e  $b_1$  determinadas a partir do ajuste dos dados experimentais.

Motta Lima (1999), partindo da equação de Hodges (1982), optou por utilizar uma relação de taxas (TSN) substituindo a taxa de secagem máxima ( $N_{max}$ ) pela taxa de secagem média obtida pelo coeficiente angular ( $N_{tc}$ ) da reta descrita no período de taxa constante de secagem, para cada situação estudada, conforme Equação 7.

$$TSN = (N/N_{max}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{X}{a_2} \right)^{(b_2 \cdot X + c_2)} \right] \quad (6)$$

$$TSG = (N/N_{tc}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{X}{a_1} \right)^{b_1} \right] \quad (7)$$

$$TSG = (N/N_{tc}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{X}{a_2} \right)^{(b_2 \cdot X + c_2)} \right] \quad (8)$$

onde TSG representa a taxa de secagem generalizada, X é a umidade da amostra, e as constantes do modelo  $a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$  foram determinadas a partir do ajuste dos dados experimentais.

O ajuste das equações aos dados experimentais foi realizado por regressão não linear, cujos parâmetros foram estimados por um software estatístico.

### Isotermas

Labuzza (1985) apresentou duas maneiras de se obter isotermas de secagem. A primeira é a de

adsorção que é obtida colocando-se um material completamente seco em contato com várias atmosferas de umidades relativas crescentes e medindo-se o ganho de massa depois de atingido o equilíbrio. A segunda é a isotermia de dessorção, conseguida colocando-se um material inicialmente úmido sob umidades relativas decrescentes, e neste caso medindo-se a perda de massa após o equilíbrio. Salienta-se que os materiais em estudo ao apresentarem diferenças observadas entre o processo de adsorção e o processo de dessorção têm-se o fenômeno de histerese, conforme Figura 1.

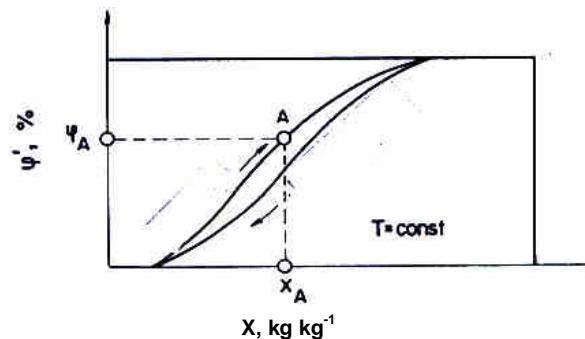


Figura 1. Histerese – Strumillo e Kudra (1986).

sendo  $X$  a umidade de equilíbrio;  $X_A$  a umidade de equilíbrio no ponto A;  $\phi$ , a umidade relativa;  $\phi_A$  umidade relativa no ponto A e  $T$  temperatura.

Na Tabela 1 são apresentados alguns modelos matemáticos encontrados na literatura que foram utilizados no ajuste de dados experimentais de vários materiais.

Tabela 1. Modelos matemáticos de isotermas de equilíbrio.

Equação	Referências
$X_e = \left( \frac{\ln[1-UR]}{-(aT+b)} \right)^c$ (9)	Henderson Thompson <i>et al.</i> (1968) <i>apud</i> Sousa <i>et al.</i> (2004)
$X_e = \left( \frac{-\ln[1-UR]}{aT \cdot \exp(-b/T)} \right)^c$ (10)	Henderson modificada (Neuman <i>et al.</i> , 1986)
$X_e = \left( \frac{C \ln(1-UR)}{At+B} \right)^c$ (11)	Motta Lima <i>et al.</i> (2002) <i>apud</i> Smith (1947)
$X_e = (A+Bt) \left( \frac{UR}{1-UR} \right)^c$ (12)	Oswin modificada (Moura <i>et al.</i> , 2004)
$X_e = \frac{\ln[1-(RH)]^n}{At+B}$ (13)	Motta Lima <i>et al.</i> (2003) <i>apud</i> Smith (1947)

## Material e métodos

### Cinética de secagem

As amostras utilizadas eram de tecido produzido em tear plano, com estrutura em tela, largura acabada de 1,43 m, sem adição de carga de cor e

previamente preparada para tingir, com textura 224,20 g m<sup>-2</sup>. Neste tecido foram utilizados fios de urdume, que representam o sentido horizontal do tecido (comprimento) em poliéster texturizado 167/48 Dtex AE SO Unifi, com 93,51 g m<sup>-1</sup>.

Para o fio de trama, utilizado na vertical do tecido (largura), utilizou-se a composição em algodão, com título em Ne 8/2 de fiação *Open-end*.

A composição do material em estudo foi de 70% de fios em fibras de algodão e de 30% em fibras de poliésteres.

No estudo da secagem por condução e convecção, as amostras foram cortadas nas dimensões de 100 x 100 (mm).

Inicialmente, todas as amostras foram pesadas em balança Scientech (precisão: 0,0001 g) e colocadas em uma estufa de esterilização e secagem, modelo Scientific, 220 volts ( $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , 24 horas), para a determinação da massa seca ( $m_{as}$ ). A partir destes valores, foi possível determinar a massa úmida ( $m_a$ ) das amostras conforme a Equação 14, para as umidades iniciais pré-determinadas variando de 0,7 a 1,0 (b.s.).

$$\text{Umidade} = \frac{m_a - m_{as}}{m_{as}} \quad (14)$$

As amostras permaneceram submersas em água destilada, por pelo menos uma hora, para garantir que a umidade fosse uniforme. Para se obter a umidade inicial desejada as amostras foram colocadas sobre uma toalha absorvente dando-se, em seguida, início aos experimentos. No caso das amostras não estarem úmidas o suficiente, para atingir a umidade desejada, estas foram reumidificadas até atingir o peso úmido desejado.

O módulo experimental utilizado na secagem do tecido e apresentado na Figura 2 consiste de uma placa de cobre aquecida por meio de um banho termostático com temperatura controlada, a qual variou de 40 a 85°C.

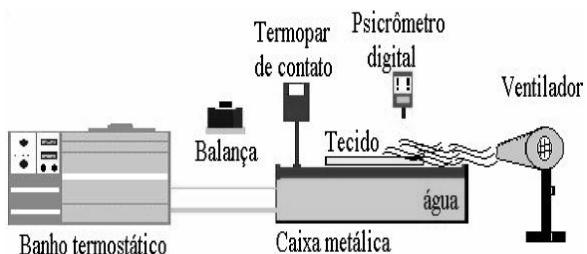


Figura 2. Módulo experimental DEQ/UEM (Sousa, 2003).

A velocidade do ar de secagem, distribuída de forma homogênea sobre o tecido, variou de 0,5 a 2,5 m s<sup>-1</sup>, monitorada com o auxílio de um anemômetro digital portátil (Modelo HH-F10 – precisão de 0,1 m s<sup>-1</sup>). Para a obtenção das curvas de secagem foram realizadas medições de massa a cada minuto (com tempo de leitura em torno de 5 segundos), em balança digital (Gehaka Linha BG 4000 - precisão: 0,01 g), as quais foram finalizadas quando o material atingiu peso constante.

### Isotermas

Para as isotermas de adsorção, as amostras com massas iniciais variando entre 0,1346 a 0,1431g foram preparadas nas condições ambientes do Laboratório de Processos de Separação I do DEQ e, posteriormente colocadas individualmente em um cesto de inox, no equipamento Novasina AW Sprint® apresentado na Figura 3, iniciando-se o ensaio, até o equilíbrio ser atingido. O equilíbrio foi encontrado após o equipamento fazer variadas leituras da umidade de cada amostra em relação à atmosfera padrão, sob a influência da temperatura e a umidade ambiente favorecida pelo sal.



**Figura 3.** Equipamento para determinação das isotermas - Novasina AW Sprint®.

Após o equilíbrio, a amostra era retirada do mesmo e sua massa úmida era aferida em balança analítica da marca (Tecnal Scientech SA 210). Com o valor encontrado, calculou-se a umidade de equilíbrio (X<sub>e</sub>), pela Equação 15.

$$X_e = \frac{m_a - m_{as}}{m_{as}} \quad (15)$$

Para a determinação das isotermas trabalhou-se com 6 (seis) tipos de sais, que representaram as umidades relativas compreendidas entre 11 e 98%,

para variações das temperaturas entre 20 e 50°C. Na Tabela 2 tem-se a relação das umidades dos sais.

**Tabela 2.** Relação das umidades dos sais com diversas temperaturas.

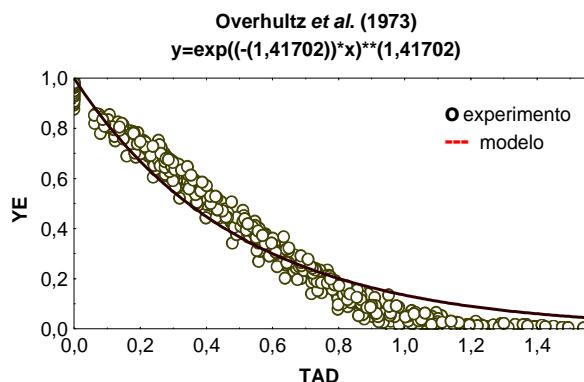
Temp. (°C)	Sal/Umidade relativa em função da temperatura					
	LiCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	NaCl	BaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
15	11,3	33,3	55,9	75,6	90,9	-
20	11,3	33,1	54,4	75,4	90,5	98,2
25	11,6	32,8	52,9	75,3	90,1	98,0
30	11,6	32,4	51,4	75,1	89,9	98,0

Fonte: Robinson e Stokes (1959).

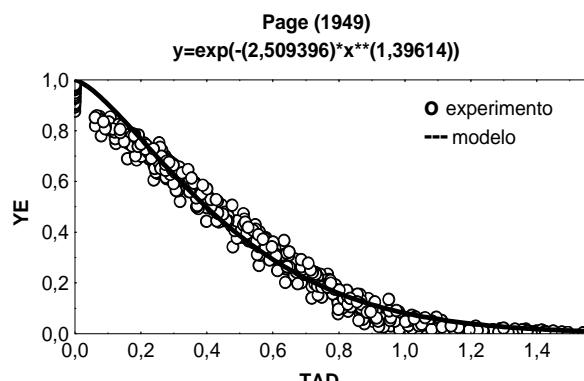
### Resultados e discussão

#### Modelagem das curvas de secagem

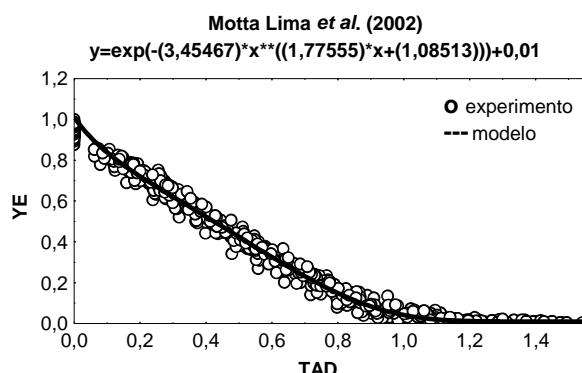
A partir dos dados experimentais sobre a influência da velocidade do ar de secagem, da temperatura da placa de contato e da umidade inicial das amostras, foi possível construir as curvas generalizadas de secagem, utilizando-se os modelos propostos por Overhultz *et al.* (1973) e Page (1949) e Motta Lima *et al.* (2002), conforme Figuras 4, 5 e 6.



**Figura 4.** Modelo Overhultz *et al.* (1973).



**Figura 5.** Modelo Page (1949).

Figura 6. Modelo Motta Lima *et al.* (2002).

Comparando-se os três modelos, percebe-se que o Motta Lima *et al.* (2002) é o que melhor representa os dados experimentais.

Nas Figuras 7, 8 e 9, são representados respectivamente a distribuição aleatória de resíduos em torno do zero, que proporcionaram um melhor resultado, segundo os modelos matemáticos de Page (1949), Overhultz *et al.* (1973) e Motta Lima *et al.* (2002). Com base nos resultados do Teste F, pode-se determinar qual dos modelos utilizados apresenta uma melhor predição do comportamento do processo de secagem.

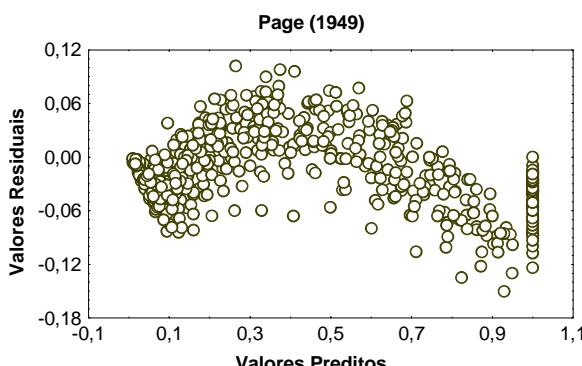
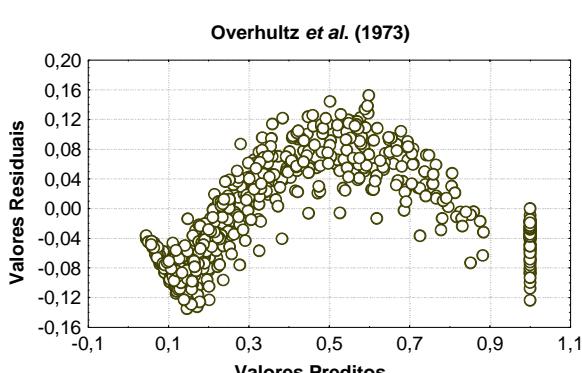
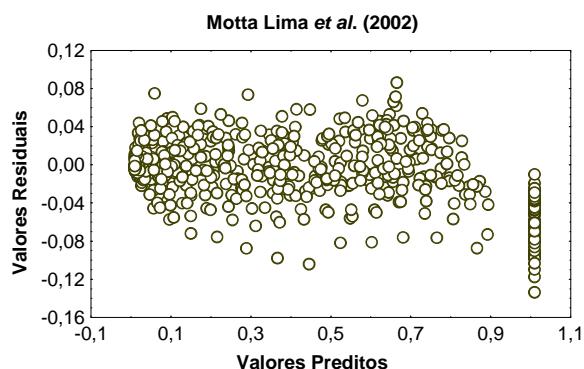


Figura 7. Resíduos – Page (1949).

Figura 8. Resíduos – Overhultz *et al.* (1973).Figura 9. Resíduos – Motta Lima *et al.* (2002).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do Teste F calculados pelo somatório dos quadrados dos valores preditos, dividido pelo somatório dos quadrados dos valores residuais da estimativa nos três modelos.

Tabela 3. Resultados dos ajustes das curvas generalizadas de secagem.

Modelo	R <sup>2</sup>	Teste F	Constantes
Page (1949)	0,9820	146,74	A = 1,3961 K = 2,5094
Overhultz <i>et al.</i> (1973)	0,95672	55,60	A = 1,4170 K = 1,4170
Motta Lima <i>et al.</i> (2002)	0,98918	240,80	A = 1,7755 C = 1,0851 K = 3,4546

Verificando-se os valores da Tabela 3, conclui-se que o melhor ajuste se dá pelo modelo Motta Lima *et al.* (2002), para a faixa de dados experimentais utilizados nesta pesquisa, principalmente pelo teste F, muito superior aos demais.

#### Modelagem das curvas de taxa de secagem

Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas as curvas de taxa de secagem normalizadas (TSN) ajustadas pelos modelos de Hodges (1982) e Toffoli (2005), respectivamente.

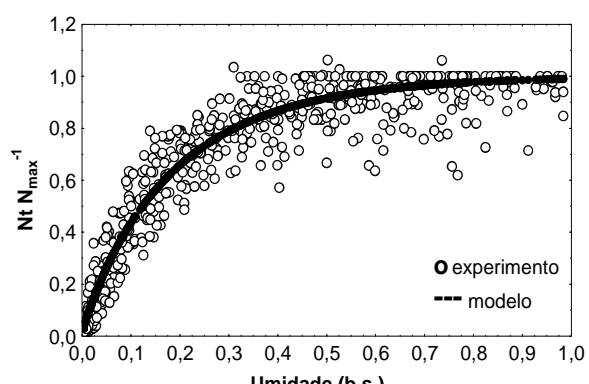


Figura 10. Ajuste da curva de TSN – Hodges (1982).

Verifica-se que o modelo da Figura 10 descreve de maneira satisfatória tanto o comportamento da taxa constante como o da taxa decrescente, considerando que a taxa constante se inicia mais efetivamente bem próximo ao ponto com umidade 1,0 em base seca.

De certa forma, percebe-se uma pequena variação dos pontos experimentais mais acentuados no início, quando existe um período de acomodação da taxa constante, em função da evaporação da água contida no material.

O modelo descrito na Figura 11 apresenta uma taxa constante mais uniforme próxima ao ponto inicial, ou seja, perto da umidade 1,0 (b.s.).

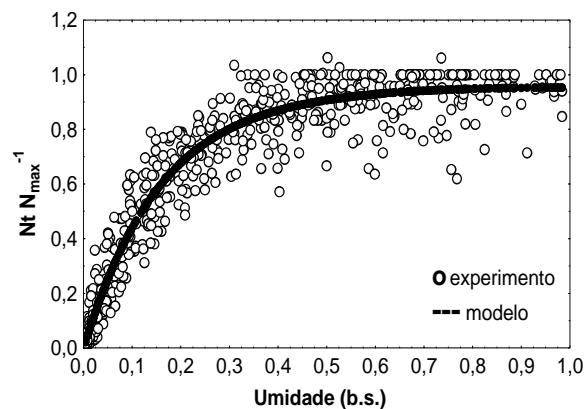


Figura 11. Ajuste da curva de TSN – Toffoli (2005).

Os modelos dispostos nas Figuras 12 e 13 representam as curvas de taxa de secagem generalizadas (TSG) ajustadas pelos modelos de Motta Lima (1999) e Toffoli (2005) respectivamente, que utilizam nas equações dos modelos, a relação da taxa instantânea com a taxa máxima (TSN), pela relação da taxa instantânea com taxa constante (TSG).

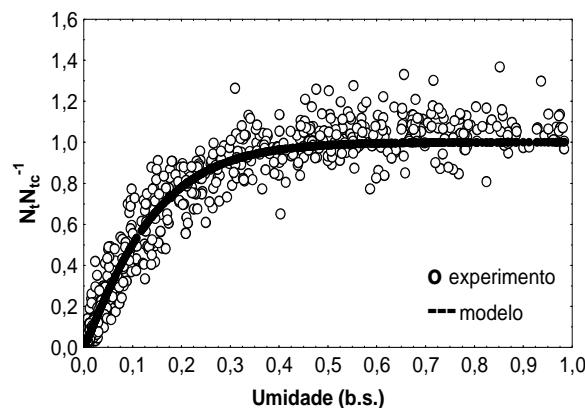


Figura 12. Ajuste da curva de TSG – Motta Lima (1999).

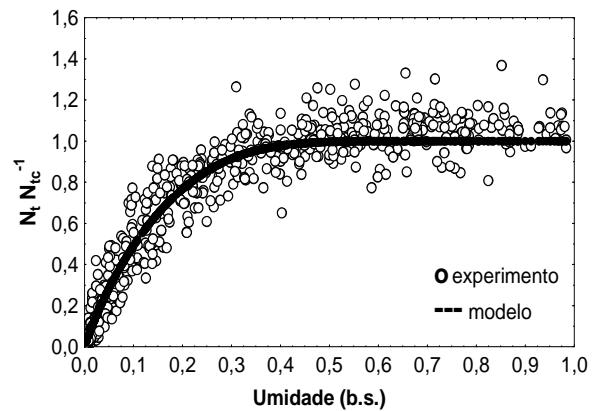


Figura 13. Ajuste da curva de TSG – Toffoli (2005).

#### Distribuição de resíduos da taxa de secagem

A comprovação de qual dos modelos de taxa de secagem melhor se ajustou aos dados foi evidenciada pela distribuição aleatória dos valores residuais e dos valores preditos, conforme Figuras 14, 15, 16 e 17.

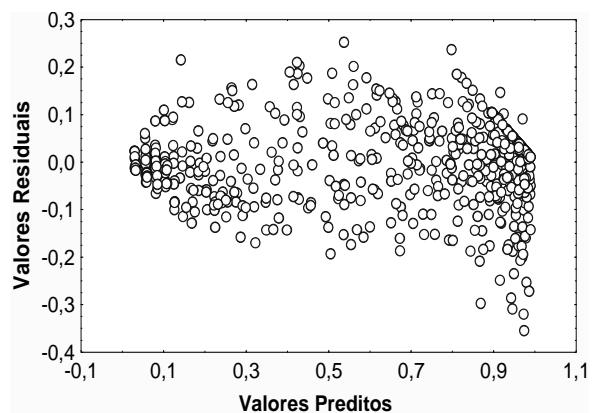


Figura 14. Distribuição de resíduos – Equação 5.

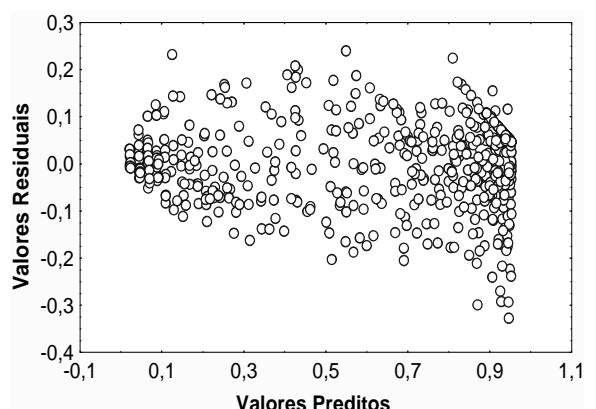


Figura 15. Distribuição de resíduos – Equação 6.

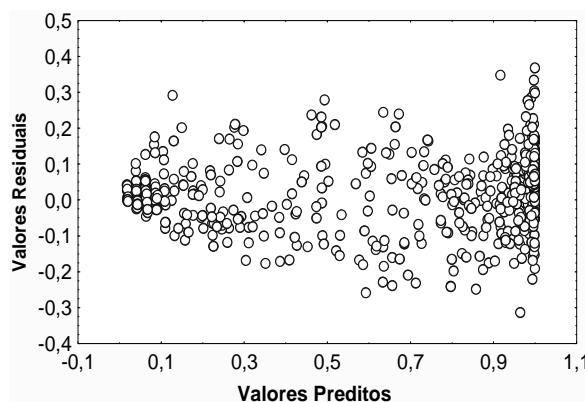


Figura 16. Distribuição de resíduos – Equação 7.

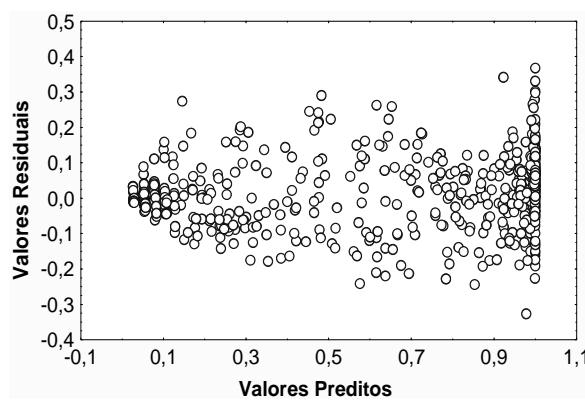


Figura 17. Distribuição de resíduos – Equação 8.

Na Tabela 4 podem ser visualizados os valores de  $R^2$ , Teste F e os coeficientes das equações de cada modelo.

Tabela 4. Resultados dos ajustes das taxas de secagem.

Equação	$R^2$	Teste F	Constantes
5	0,934	67,5083	A = 0,1850 B = 0,9090
	0,936	68,8196	A = 0,1759 B = -0,3644 C = 1,0094
6	0,928	57,4116	A = 0,1381 B = 1,1255
	0,931	58,7969	A = 0,1445 B = 0,7534 C = 1,0013

Considerando que o resultado do Teste F foi obtido a partir do somatório dos quadrados dos valores preditos, pelo somatório dos quadrados dos valores residuais da estimativa dos modelos propostos pelos três autores; considerando os resultados dos  $R^2$  e do Teste F, verifica-se um melhor ajuste pelo modelo de Toffoli (2005), em que utilizou a taxa de secagem normalizada, na qual fez uma variação no expoente, de forma linear com a umidade. As equações acima aumentaram o número de parâmetros a serem estimados e, com mais parâmetros, tendem a

representar melhor os dados experimentais. Mas, como os resultados, ainda que muito próximos, melhoraram as exigências de dados de melhor qualidade pelo esforço computacional, reforçam a justificativas propostas pelo modelo de Toffoli (2005).

#### Estudo das isotermas

Para a determinação das isotermas foram utilizados os sais descritos na Tabela 2, que representaram as umidades relativas de 11 a 98%, conjugadas com a variação das temperaturas estabelecidas entre 20 e 50°C.

Nesta análise, verificou-se um comportamento das isotermas semelhante ao apresentado por Strumillo e Kudra (1986), descrito na Figura 1.

#### Modelagem dos dados de adsorção

Foram avaliados os modelos que descrevem a influência da temperatura. Para tanto, foi utilizada a faixa de temperaturas entre 20 e 50°C. A seguir são apresentados os resultados que melhor descreveram os modelos apresentados na Tabela 1, juntamente com as figuras da superfície de resposta, relacionando o quadrado dos valores preditos com o quadrado dos valores residuais. Nas Figuras 18 e 19, são apresentadas as superfícies de resposta, os valores residuais e os valores preditos, do modelo Henderson e Thompson (1968) *apud* Sousa *et al.* (2004).

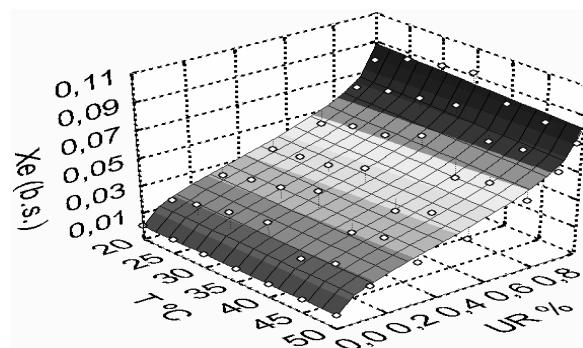


Figura 18. Modelo de Henderson e Thompson (1968) *apud* Sousa *et al.* (2004).

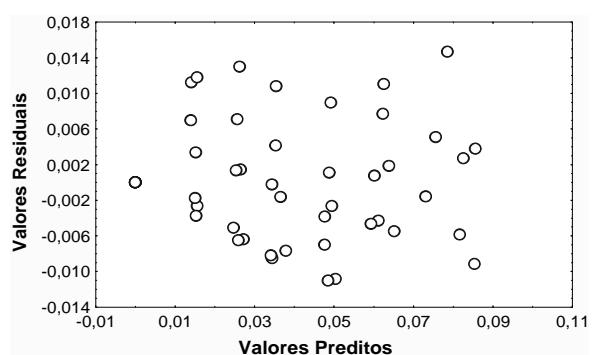


Figura 19. Distribuição de resíduos – Modelo Henderson e Thompson (1968), *apud* Sousa *et al.* (2004).

Pode-se verificar, pela análise da superfície de resposta, que existe uma distribuição satisfatória em torno do zero, bem como um perfil adequado de curva isotérmica.

As Figuras 20 e 21 representam o modelo de Henderson modificado conforme descrito por Neuman *et al.* (1986).

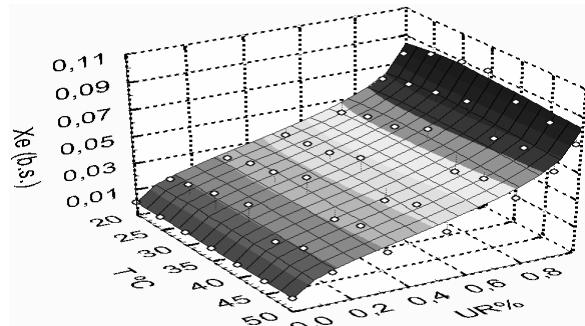


Figura 20. Modelo de Henderson modificado (Neuman *et al.*, 1986).

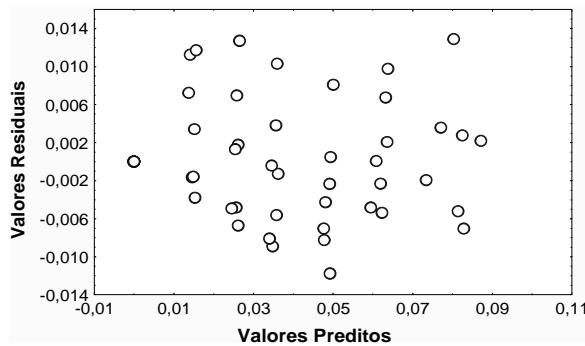


Figura 21. Distribuição de resíduos – Modelo Henderson modificado (Neuman *et al.*, 1986).

No modelo de Henderson modificado (Neuman *et al.*, 1986), percebe-se que a curva descreve uns perfis uniformes, característicos do comportamento isotérmico. Este mesmo perfil pode ser observado pelo modelo de Motta Lima *et al.* (2002), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006), conforme as Figuras 22 e 23.

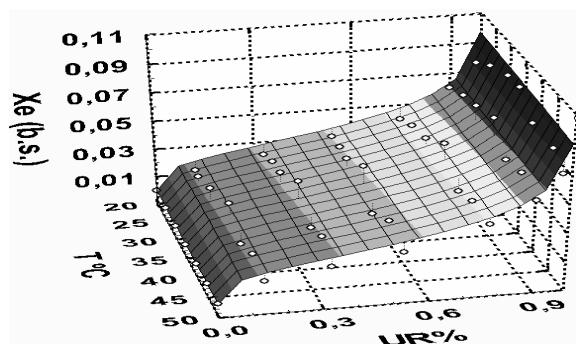


Figura 22. Modelo de Motta Lima *et al.* (2002), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006).

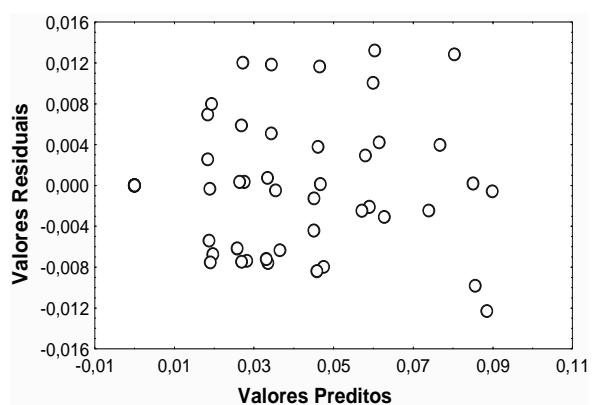


Figura 23. Distribuição de resíduos – Modelo Motta Lima *et al.* (2002), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006).

As Figuras 24 e 25 representam o modelo de Oswin modificado. Neste modelo, verifica-se que a superfície de resposta não possui um comportamento característico ideal isotérmico, quando comparados com os demais modelos, até aqui apresentados.

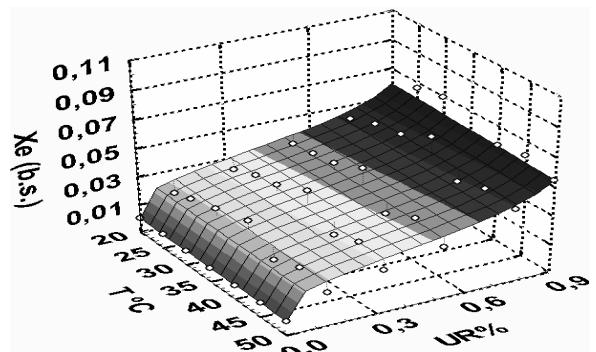


Figura 24. Modelo de Oswin modificado (Moura *et al.*, 2004).

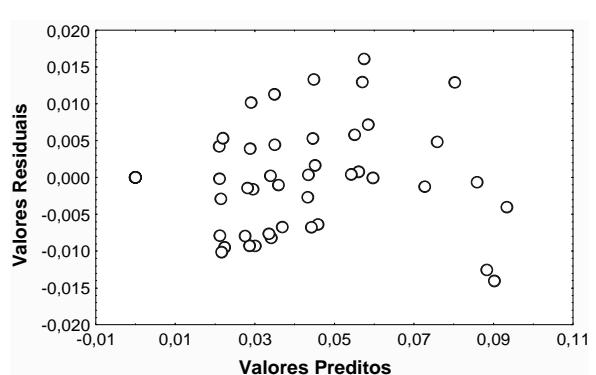


Figura 25. Distribuição de resíduos – Modelo de Oswin modificado (Moura *et al.*, 2004).

Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas a superfície de resposta e a distribuição aleatória dos valores residuais e dos valores preditos do modelo de Motta Lima *et al.* (2003), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006).

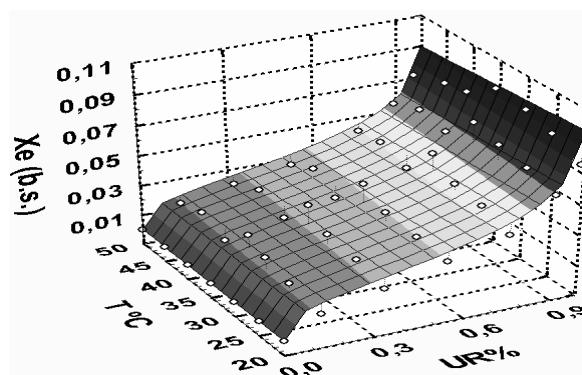


Figura 26. Modelo de Motta Lima *et al.* (2003), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006).

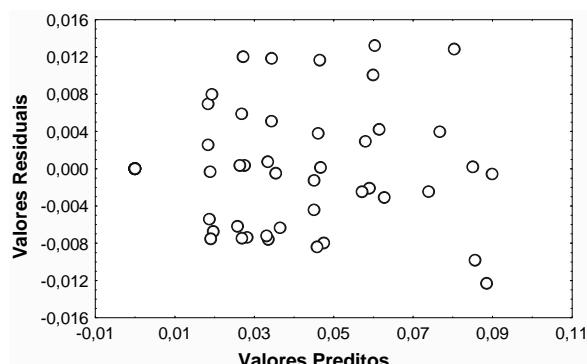


Figura 27. Modelo de Motta Lima *et al.* (2003), a partir de Smith (1947) *apud* Corrêa *et al.* (2006).

Na Tabela 3 estão os resultados do ajuste dos modelos que alcançaram um melhor desempenho de acordo com os resultados de  $R^2$ , Teste F, conforme  $X_e$  [b.s.], UR [%], T [°C].

Tabela 3. Estimação dos parâmetros de adsorção.

Equação	$R^2$	Teste F	Parâmetros
9	0,939	50,8419	A = 3,25849 B = 502,750 C = 0,49702
10	0,947	58,8252	A = 6,96899 B = -28,8277 C = 0,50215
11	0,942	53,2228	A = 0,00402 B = 1,43940 C = -0,02276 n = 0,14930
12	0,929	43,8633	A = 0,03728 B = -0,00009 C = 0,23335 n = 0,14930
13	0,942	53,2229	A = -0,17667 B = -63,2493 n = 0,14929

Considerando o melhor resultado do  $R^2$  e do teste F, verificou-se que o modelo de Henderson modificado (Neuman *et al.*, 1986) descrito pela Equação 10, melhor representa, neste trabalho, o comportamento das isotermas de adsorção.

## Nomenclatura

A	Constante das equações
B	Constante das equações
b.s	Base seca
b.u	Base úmida
c	Constante das equações
CO	Símbolo da fibra de algodão
Dtex	Sistema utilizado para filamentos sintéticos que expressa a massa em gramas de 1.000 metros de fio
F	Estatística F, é razão entre o quadro médio de valores preditos e o quadro médio dos resíduos da estimativa.
k	Constante de secagem
$m_u$	Massa úmida
$m_s$	Massa seca
n	Constante das equações
OE	Processo de fiação Open-End
PES	Símbolo do filamento de poliéster
PT	Tecido pronto para tingir
$R^2$	Coeficiente de correlação da equação ajustada
t	Tempo em minutos
T	Temperatura em °C
UR	Umidade relativa %
$X_e$	Umidade de equilíbrio no ponto A
$X_e$	Umidade de equilíbrio, em % (b.s.)

## Conclusão

Considerando os objetivos propostos, bem como os resultados obtidos e as condições operacionais estudadas, podem-se apresentar as seguintes conclusões:

durante a realização dos ensaios de cinética de secagem, os intervalos para leituras das umidades a cada minuto, com a retirada da amostra do secador, não interferiram no processo de secagem;

o limite máximo de secagem ficou estabelecido pelas condições operacionais do equipamento;

não houve interferência significativa no comportamento de secagem, pela não climatização do local da realização do experimento, tanto para cinética de secagem, quanto para os ensaios de isotermas de sorção;

o modelo de Motta Lima *et al.* (2002) melhor representou os dados experimentais de secagem;

o tempo de secagem sofreu a influência da velocidade do ar, não importando a umidade inicial em base seca, mas fica evidente que o aumento da temperatura foi a principal ocorrência da secagem neste trabalho;

o modelo de Toffoli (2005) melhor representou os dados experimentais da taxa de secagem.

Para a análise do modelo que melhor descreve o processo estudado, adotou-se como critério de escolha, tanto para a cinética de secagem, quanto para as isotermas de adsorção, um  $R^2$  acima de 0,93 e complementarmente a análise do Teste F. Podendo-se afirmar, ainda, que os modelos que melhor caracterizam as isotermas individuais dos materiais têxteis especificados nesta pesquisa, são os de Henderson modificado (Neumann *et al.*, 1986), e de Motta Lima *et al.* (2003).

Os resultados são válidos para tecidos constituídos de fios com 70% de algodão e 30% de poliéster, respectivamente, trama (largura) e de urdume (comprimento), fabricados por uma tecelagem de Joinville, Estado de Santa Catarina, em teares planos, estrutura tela, largura acabada em tear de 1,43 m, sem adição de carga de cor, destinados para o preparo do tingimento, conhecidos tecnicamente como PT (Preparados para Tingir).

## Referências

- CORRÊA, P.C. et al. Equilíbrio Higroscópico de milheto, alpiste e painço: Obtenção e Modelagem. *Rev. Bras. de Eng. Agr. e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 162-167, 2006.
- GUMMEL, P.; SCHLUNDER, E.U. Through air drying of textiles and paper. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'80*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. v. 1, p. 357-366.
- IEMI-Instituto de Estudos e Marketing Industrial. *Relatório setorial da cadeia têxtil brasileira*. São Paulo: IEMI, 2004.
- HODGES, C.R. Laboratory drying study and applications for paper machine drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'82*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1982. p. 99-105.
- MOTTA LIMA, O.C. *Estudo sobre a secagem de folhas de celulose*. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- MOTTA LIMA, O.C. et al. Isotermas de equilíbrio para celulose do tipo fibra longas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 14., 2002, Natal. *Anais...* Natal: ABEQ, 2002. CD-ROM.
- MOTTA LIMA, O.C. et al. Moisture equilibrium isotherms for a commercial liquid package paper. *Drying Technol.*, New York, v. 21, n. 10, p. 1909-1922, 2003.
- MOURA, R.S.F. et al. Modelagem matemática para isotermas em polpa de caju. *Rev. Biol. Cienc. Terra*, João Pessoa, v. 4, n. 2, 2004.
- NEUMAN, R. et al. Water sorption properties of a polysaccharide adsorbent. *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, Washington, D.C., v. 25, n. 3, p. 422-425, 1986.
- OVERHULTZ, D.G. et al. Drying soybeans with heated air. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v. 16, p. 112-113, 1973.
- PAGE, G.E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. 1949. Thesis (Master of Science)–Purdue University, 1949.
- RIBEIRO, J. F. *Modelagem teórico-experimental de sistemas suspensos de secagem doméstica de vestuário*. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2002.
- ROBINSON, R.A.; STOKES, R.H. *Electrolyte solutions*. London: Butterworths, 1959.
- SOUSA, L.H.C.D. *Secagem de materiais têxteis*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.
- SOUSA, L.H.C.D. et al. Isotermas de equilíbrio para tecidos de algodão: adsorção e dessorção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15., 2004, Curitiba. *Anais...* Curitiba: UFPR, 2004.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- TOFFOLI, C.M. *Análise da influência das variáveis do processo de secagem no coeficiente de contato térmico entre o papel e cilindro*. 2005. Dissertação (Mestrado Eng. Química Eng. Química)–Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

Received on December 12, 2006.

Accepted on August 08, 2007.