

# Secagem condutiva/convectiva de celulose fibra longa com ar ambiente em convecção forçada

Oswaldo Curty da Motta Lima<sup>1\*</sup>, Maura Stenzel<sup>2</sup>, Nehemias Curvelo Pereira<sup>1</sup> e Elisabete Scolin Mendes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. \*Author for correspondence. e-mail: oswaldo@deq.uem.br

**RESUMO.** Este trabalho teve como objetivo analisar a secagem condutiva/convectiva de folhas de celulose de fibra longa, na operação com ar ambiente em convecção forçada para diferentes condições operacionais da temperatura de secagem (superfície metálica aquecida) e da velocidade do ar na superfície das amostras. Foram estudados aspectos da cinética de secagem, a partir do levantamento das curvas de secagem, taxa de secagem e perfis de temperatura, sendo seu comportamento avaliado através da abordagem clássica de dois períodos de secagem. Os valores encontrados para as taxas de secagem do período constante foram ajustados através de um balanço térmico para esta fase, ou seja, pela equivalência entre o calor transferido entre a superfície aquecida, as amostras de celulose e o ar, e o calor envolvido no processo de evaporação. Já para o período de taxa decrescente, foi verificada a possibilidade de aplicação de uma redução linear da taxa constante.

**Palavras-chave:** secagem, secagem de papel, taxas de secagem.

**ABSTRACT. Conductive/convective drying of long fiber cellulose.** Research deals with aspects in conductive/convective drying of long fiber cellulose sheets over heated surfaces under forced air conditions provided by an adjustable blower. Its aim is to analyze the influence of drying (heated surface) temperature and air velocity in the behavior of the drying curves, drying rate curves and samples temperature profiles. Influence was analyzed through the classic proposal of two drying rate periods. The constant drying rate dependence upon surface temperature and air condition was studied from a heat transfer point of view. Heat transferred by the heated surface is used partly to evaporate water from solid and partly it is lost into ambient air. For the falling rate period, a linear (proportional) reduction of the constant rate was verified.

**Key words:** drying, paper drying, drying rates.

No processo industrial de fabricação de papel, a etapa de remoção de água é extremamente importante na definição das propriedades e das características finais dos diferentes tipos de papel disponíveis para o mercado consumidor. Nesta fase, o processo de secagem térmica se constitui em etapa primordial, não só pela qualidade final do papel produzido, mas também por ser o principal consumidor de energia de toda a planta (~1/3 do total) (Bell *et al.*, 1994).

Dentro deste contexto, os trabalhos de Bell *et al.* (1994) e Motta Lima (1999) trazem alguns aspectos da modelagem e simulação do processo de secagem nos secadores convencionais de cilindros aquecidos secadores, desde os primeiros trabalhos de Nissan e seus colaboradores - Nissan e Kaye (1955), Nissan e Hansen (1960) e Nissan e George (1961) - até trabalhos mais recentes - Hodges (1982), Videau e Lemaitre (1982), Seyed-Yagoobi *et al.* (1992)

Wilhelmsson *et al.* (1993), Wilhelmsson e Stenström (1994), entre outros -, ficando clara a importância do conhecimento da cinética de secagem do papel a ser processado.

Estes autores trazem também um conjunto de trabalhos - Sherwood (1930), Lee e Hinds (1979, 1982), Hodges (1982), Rueff e Charuel (1986,1989), Asensio *et al.* (1993a/b), Rueff e Laloui (1994), entre outros - onde são estudadas propriedades físicas e de transporte e alguns aspectos da cinética de secagem de celulose e papel.

Reardon *et al.* (1998) desenvolveram um estudo e um módulo experimental para a análise da secagem em máquinas de papel, com o objetivo de verificar a influência do tipo de papel, da velocidade do ar de secagem (simulando a velocidade do filme no secador) e do tipo (permeabilidade) e tensão da tela, na cinética do processo.

Procurando ampliar o conhecimento sobre a cinética de secagem de celulose e papel, este trabalho faz parte de uma das linhas de pesquisa desenvolvidas no Laboratório de Processos de Separação (LPS) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Estado do Paraná, e tem como objetivo a realização de um estudo sobre a secagem condutiva/convectiva em condições de trabalho próximas daquelas encontradas em um secador convencional de papel.

Dentro deste contexto, procurou-se simular o movimento relativo entre a folha de papel, os cilindros secadores e o ar no interior do secador, através da passagem de ar em regime de convecção forçada sobre a superfície de folhas de celulose de fibra longa, em contato com uma placa aquecida.

O modelo esquemático que vem sendo utilizado na análise deste tipo de secagem está representado na Figura 1:

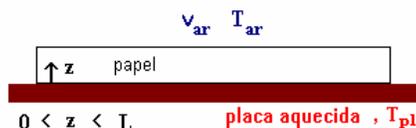


Figura 1. Modelo esquemático da secagem

Desta forma, foram levantadas curvas de secagem, de taxa de secagem e perfis de temperatura em diferentes condições operacionais de temperatura da placa aquecida e velocidade do ar de secagem na superfície das amostras.

O comportamento das taxas de secagem obtidas foi analisado a partir da abordagem clássica de dois períodos de secagem. Os valores encontrados para as taxas de secagem do período constante foram ajustados a partir de um balanço térmico para esta fase, ou seja, pela equivalência entre o calor transferido entre a superfície aquecida, as amostras de celulose e o ar, e o calor envolvido no processo de evaporação.

Já para o período de taxa decrescente, foi verificada a possibilidade de aplicação de uma redução linear da taxa constante, conforme abordagem proposta por Motta Lima *et al.* (2000).

### Material e métodos

A metodologia utilizada na obtenção das curvas de secagem e taxa de secagem e dos perfis de temperatura das amostras de celulose está descrita no trabalho de Motta Lima *et al.* (1999), sendo aqui revisada.

### Matéria-prima

A matéria-prima utilizada nos ensaios foi folhas de celulose do tipo fibra longa, sem adição de carga, cortadas no formato (15 x 10) cm e espessura em torno

de 1 mm. Sua umidade, nas condições ambientes do LPS/DEQ, era da ordem de 6 a 10 % (b.s.).

### Módulo experimental

A secagem das amostras de celulose foi realizada na superfície superior de uma caixa metálica aquecida por meio de um banho termostático, sendo a temperatura da placa acompanhada e ajustada com o auxílio de um termopar de contato digital. O fluxo de ar na superfície da amostra foi mantido constante, a partir da utilização de um soprador ajustável, sendo regulado por um anemômetro digital portátil. A umidade relativa e a temperatura do ar de secagem foram acompanhadas através de um psicrômetro digital portátil. O módulo experimental utilizado neste trabalho está representado na Figura 2.

Não se mostrou necessário o isolamento da caixa metálica, mas apenas das mangueiras de recirculação da água, já que o banho termostático se mostrou capaz de manter as temperaturas desejadas.

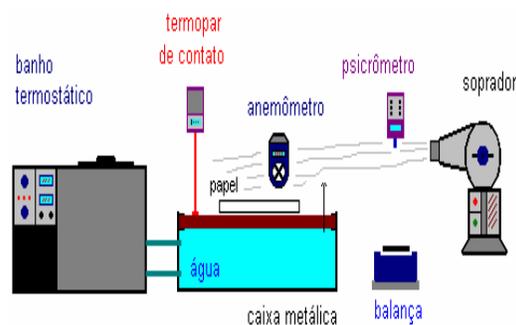


Figura 2. Esquema experimental para obtenção das curvas de secagem - Convecção forçada

### Curvas de secagem e de taxa de secagem

No levantamento das curvas de secagem, foram utilizadas amostras com umidade inicial em torno de 150 % (b.s.), temperaturas da placa aquecida de 60 a 90 °C (intervalos de 5 °C), velocidade do ar de 2, 4 e 6 m/s, e umidade relativa na faixa de 40 a 50%.

A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem não foram avaliadas em função de o módulo experimental só permitir a operação com o ar nas condições ambientes do LPS-DEQ/UEM e este não ser climatizado; e de se procurar trabalhar de acordo com a operação dos secadores convencionais, onde não há controle sobre estas condições.

As curvas de taxa de secagem foram obtidas a partir da derivação das respectivas curvas de secagem pelo método de diferenças ( $\Delta X/\Delta t$ ), ajustado para se obter os valores da taxa nos pontos originalmente utilizados na construção das curvas de secagem, i. e.:

- taxa no ponto  $i$  ?
- calcular  $(\Delta X/\Delta t)_{i-}$  entre  $i-1$  e  $i$
- calcular  $(\Delta X/\Delta t)_{i+}$  entre  $i$  e  $i+1$
- $(\Delta X/\Delta t)_i = [(\Delta X/\Delta t)_{i-} + (\Delta X/\Delta t)_{i+}] / 2$
- em  $X_0$  :  $(\Delta X/\Delta t)_{0+}$  ou  $(\Delta X/\Delta t)_{1-}$
- em  $X_e$  :  $(\Delta X/\Delta t)_{X_e-}$

**Perfis de temperatura**

O acompanhamento da temperatura das amostras foi feito simultaneamente com a obtenção das curvas de secagem, utilizando-se o termopar de contato diretamente na superfície do material.

As temperaturas no interior do material foram consideradas iguais às medidas na sua superfície, em função da dificuldade de sua medição, haja vista a reduzida espessura das amostras de celulose consideradas. Esta simplificação mostra-se de acordo com o proposto em alguns dos trabalhos sobre a modelagem e simulação do secador convencional de papel, citados anteriormente

**Resultados e discussão**

**Curvas de secagem e taxa de secagem**

As curvas de secagem e de taxa de secagem das amostras de celulose de fibra longa foram levantadas para velocidades do ar de secagem de 2, 4 e 6 m/s e temperaturas da placa aquecida de 60, 65, 70, 75, 80, 85 e 90°C, sendo mostradas nas Figuras 3 a 9 e Figuras 10 a 16, respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentados alguns dos resultados obtidos a partir destas curvas.

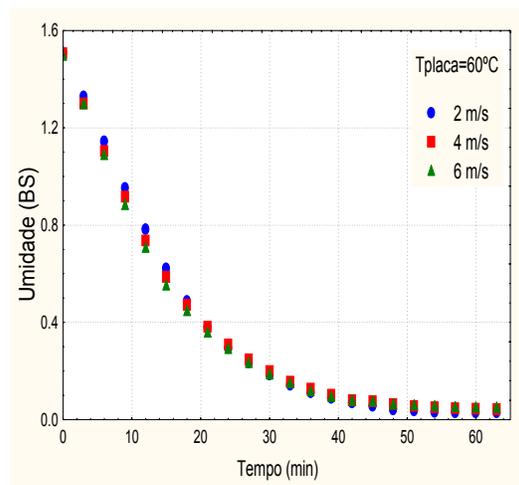


Figura 3. Curvas de secagem - 60 °C

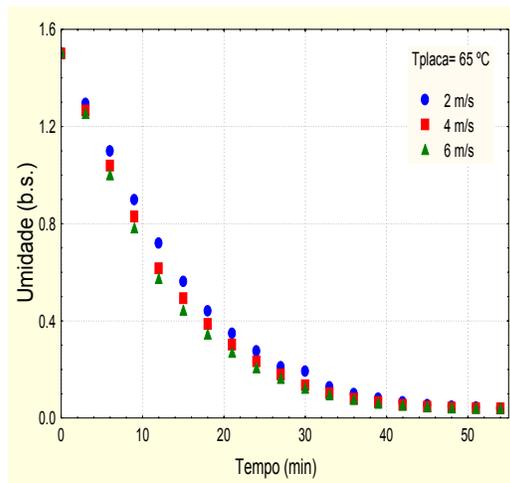


Figura 4. Curvas de secagem - 65 °C

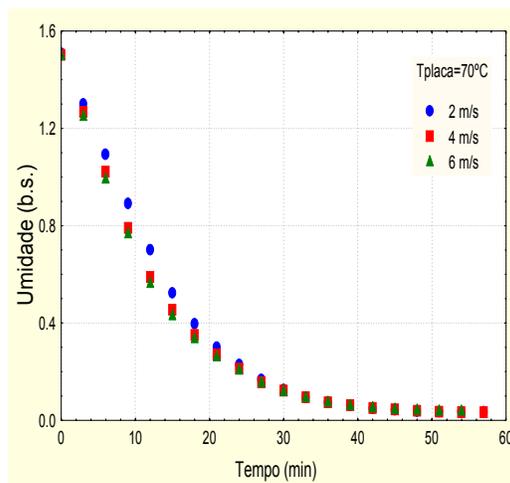


Figura 5. Curvas de secagem - 70 °C

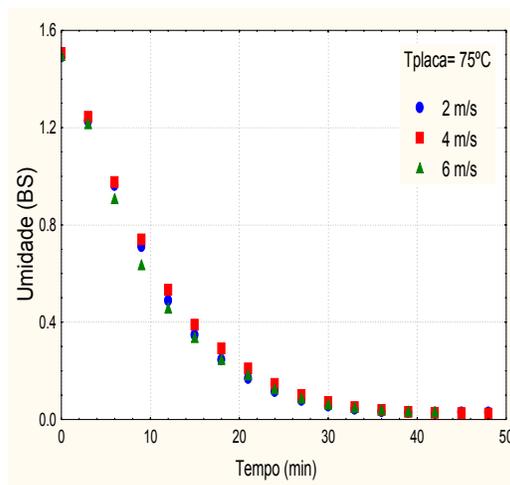


Figura 6. Curvas de secagem - 75 °C

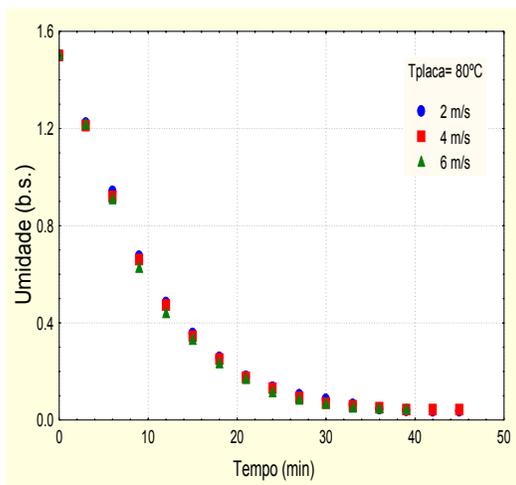


Figura 7. Curvas de secagem - 80 °C

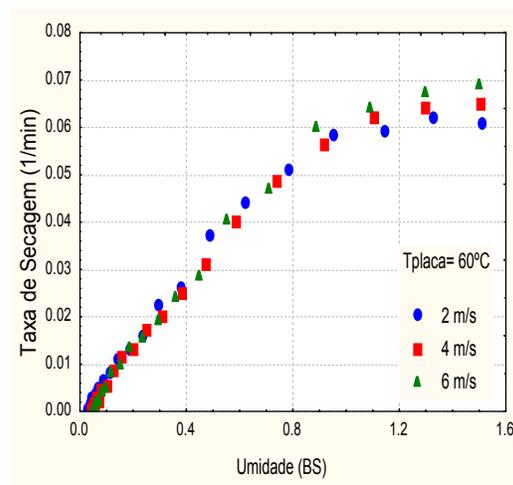


Figura 10. Curvas de taxa de secagem - 60 °C

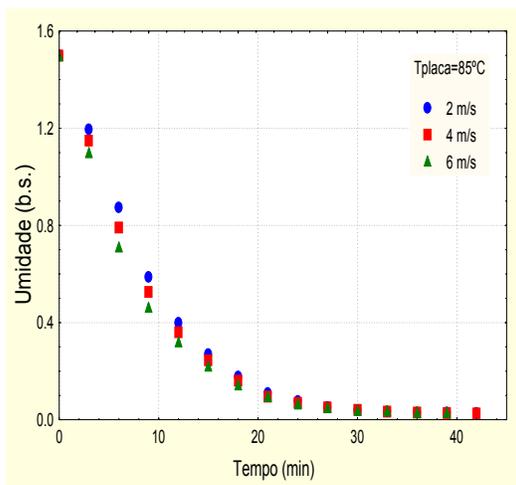


Figura 8. Curvas de secagem - 85 °C

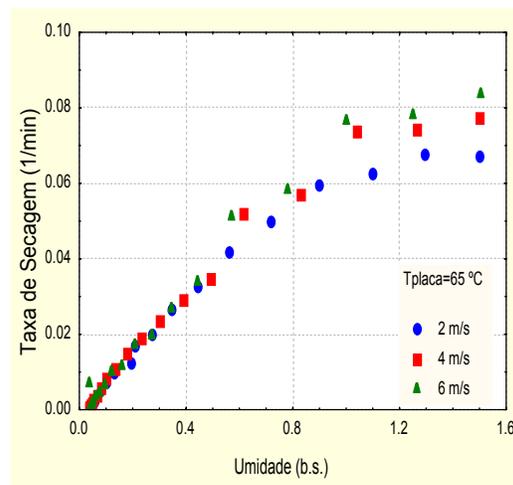


Figura 11. Curvas de taxa de secagem - 65 °C

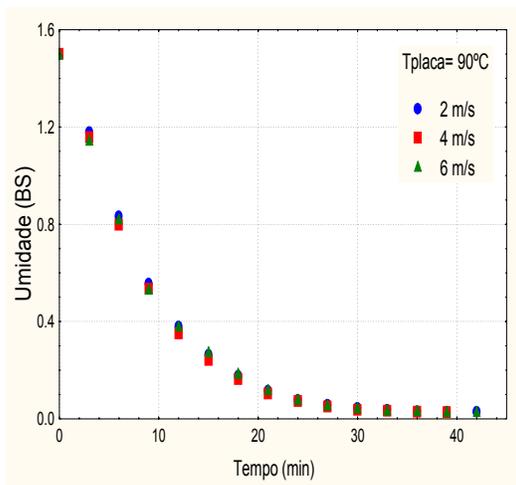


Figura 9. Curvas de secagem - 90 °C

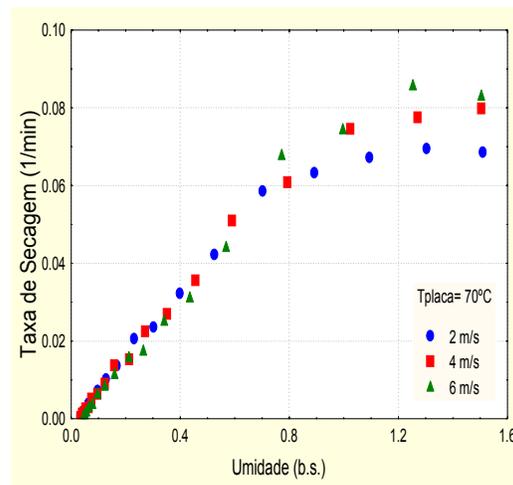


Figura 12. Curvas de taxa de secagem - 70 °C

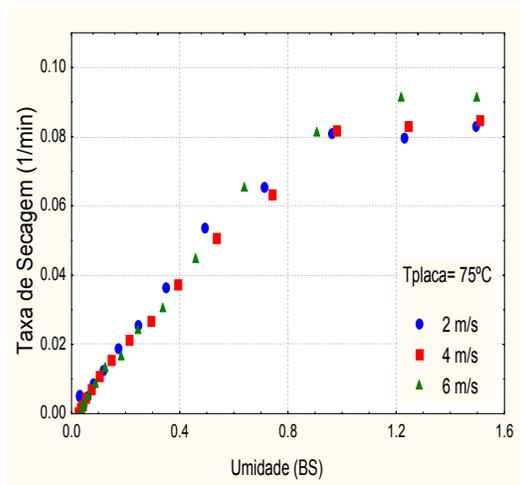


Figura 13. Curvas de taxa de secagem - 75 °C

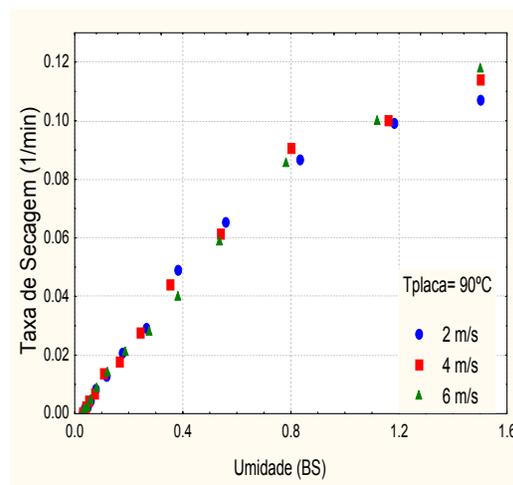


Figura 16. Curvas de taxa de secagem - 90 °C

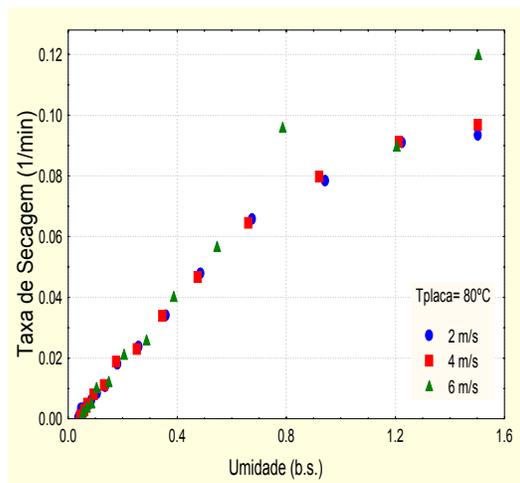


Figura 14. Curvas de taxa de secagem - 80 °C

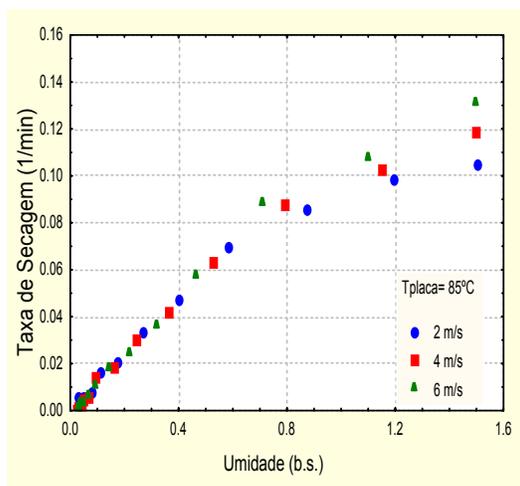


Figura 15. Curvas de taxa de secagem - 85 °C

As curvas de secagem e, principalmente, as de taxa de secagem mostram que, no intervalo estudado, a influência da velocidade do ar só se faz notar ao longo do período de taxa constante, não tendo efeito significativo no de taxa decrescente. Este fato também foi observado por Motta Lima *et al.* (2000) na secagem de celulose do tipo fibra curta.

Esta constatação está plenamente de acordo com a predominância da atuação de mecanismos de transferência de umidade externos e internos ao material, respectivamente.

As discrepâncias observadas no comportamento das curvas no período de taxa constante, para algumas temperaturas e velocidades, podem estar relacionadas a alguma influência da umidade do ar de secagem, já que esta variável não pôde ser devidamente avaliada durante os experimentos.

### Perfis de temperatura

Os perfis de temperatura obtidos para as amostras de celulose fibra longa, nas condições operacionais estudadas, são mostrados nas Figuras 17 a 23.

Os perfis apresentam um patamar de temperatura aproximadamente constante para umidades mais altas, relacionado com a evaporação de água livre. Esta região é seguida por um período onde a temperatura diminui com a umidade, devido ao efeito isolante do papel, até atingir sua condição de equilíbrio com o ar ambiente que escoou sobre sua superfície, justificando as oscilações observadas quando  $X \rightarrow X_e$ .

Na Tabela 1 são apresentados os valores das temperaturas iniciais das amostras (consideradas iguais a do ar ambiente utilizado em cada experimento), das temperaturas de vaporização (obtidas a partir do patamar inicial - período de taxa constante) e das temperaturas de equilíbrio ao final de cada ensaio.

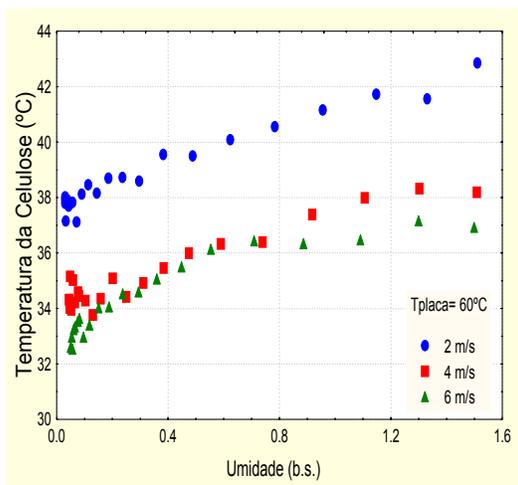


Figura 17. Temperatura das amostras - 60 °C

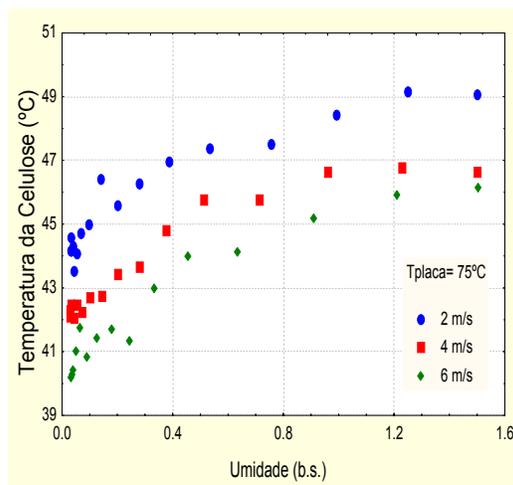


Figura 20. Temperatura das amostras - 75 °C

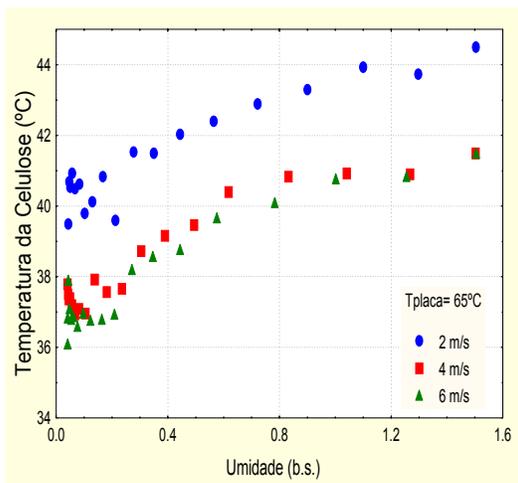


Figura 18. Temperatura das amostras - 65 °C

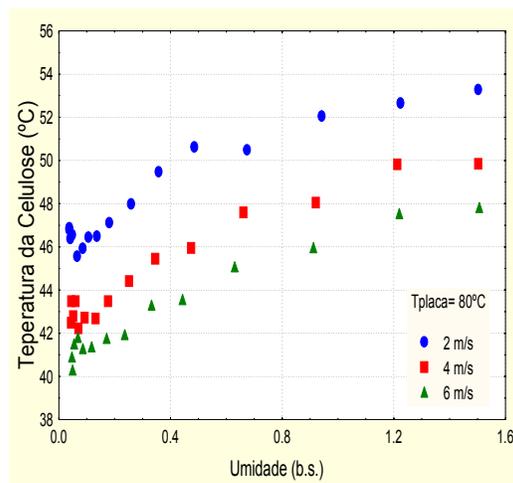


Figura 21. Temperatura das amostras - 80 °C

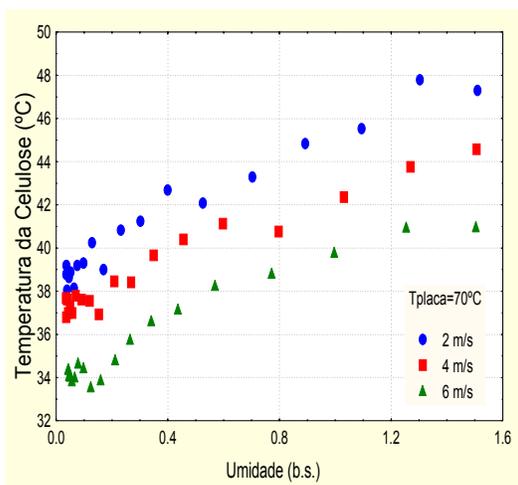


Figura 19. Temperatura das amostras - 70 °C

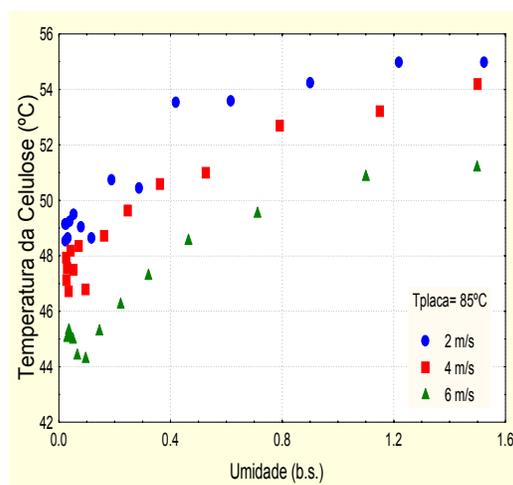


Figura 22. Temperatura das amostras - 85 °C

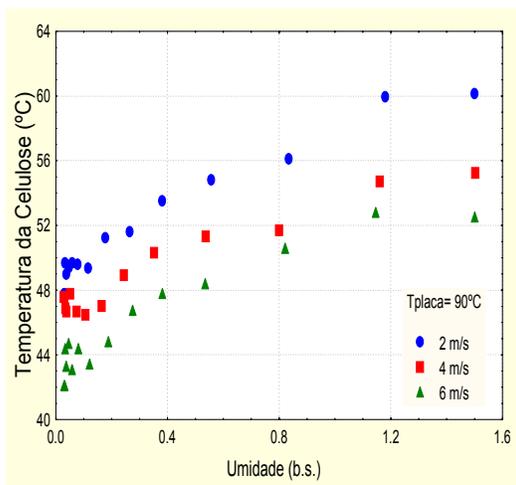


Figura 23. Temperatura das amostras - 90 °C

**Ajuste das taxas de secagem**

As curvas de taxa de secagem foram ajustadas tendo em vista a proposta clássica de dois períodos de secagem, conforme aplicada por Motta Lima *et al.* (2000) para celulose do tipo fibra curta.

**Período de taxa constante.** O período de taxa constante de secagem foi ajustado a partir de um balanço térmico no sólido, onde o calor fornecido pela placa aquecida seria parte utilizado na evaporação da umidade e parte perdido para o ar de secagem, ficando o balanço de energia com a seguinte forma:

$$\frac{Q_s}{A_s} = \alpha (T_{pl} - T_{s0}) = h_{CF} (T_{SL} - T_{ar}) + \lambda N'_C \quad (1)$$

onde  $(Q_s/A_s)$  é fluxo de calor (energia) fornecido pela placa. Rearranjando esta equação, pode-se explicitá-la para a taxa de secagem, ou seja:

$$N'_C = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{pl} - T_{s0}) - \frac{h_{CF}}{\lambda} (T_{SL} - T_{ar}) \quad (2)$$

Esta equação permite, a partir dos valores experimentais da taxa constante ( $N_C$ ), estimar o

coeficiente de contato  $\alpha$ , além de uma análise do coeficiente de transferência de calor externo  $h_{CF}$ , que pode ser inferido através da literatura específica ou também estimado, sendo normalmente calculado da seguinte forma:

$$Nu = (C1) (Re)^{C2} (Pr)^{1/3} \quad ; \quad (3)$$

ou, para propriedades físicas do ar constantes:

$$h_{CF} = (H1) (v_{ar})^{H2} \quad (4)$$

No entanto, a utilização da Equação 2 fica sujeita à possibilidade de se medir as temperaturas  $T_{s0}$  na interface placa/folha. Para solucionar este problema, desprezou-se o gradiente de temperatura no interior do material, tendo em vista a reduzida espessura das folhas de celulose. Isto corresponde a não se considerar, na equação geral da transferência de calor do sistema placa/folha/ar (Equação 5), a resistência devido à condução de calor, através do sólido úmido, frente àquelas devido ao contato placa/folha e à superfície folha/ar.

$$\frac{Q_s}{A_s} = U (T_{pl} - T_{ar}) = \frac{(T_{pl} - T_{ar})}{\left( \frac{L}{k_{ef}} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{h_c} \right)} \quad (5)$$

Com esta simplificação, pode-se então substituir  $T_{s0}$  e  $T_{SL}$  por  $T_{vap}$  (temperatura de equilíbrio para o período de taxa constante). Considerando também uma dependência linear do coeficiente de contato  $\alpha$  com a temperatura da placa ( $T_{pl}$ ), conforme proposto por Motta Lima *et al.* (2000), a Equação 2 se torna:

$$N'_C = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 T_{pl})}{\lambda} (T_{pl} - T_{vap}) - \dots - \frac{(H1)(v_{ar})^{H2}}{\lambda} (T_{vap} - T_{ar}) \quad , \quad (6)$$

com  $h_{CF}$  estimado a partir da Equação 4.

Tabela 1. Resultados da secagem de celulose de fibra longa

$v_{AR}$ (m/s)	Temperatura da Placa (°C)						
	60	65	70	75	80	85	90
$X_0$ (b.s.)	1,510	1,512	1,150	1,493	1,500	1,503	1,503
$X_c$ (b.s.)	0,032	0,037	0,040	0,028	0,030	0,030	0,030
$X_c$ (b.s.)	0,871	0,840	0,803	0,891	0,915	0,801	0,902
$T_{vap}$ (°C)	42,0	44,0	47,0	49,0	52,5	56,0	60,0
$T_{ar}$ (°C)	21,9	25,1	20,0	28,2	22,1	29,4	23,6
$T_c$ (°C)	38,0	40,5	39,0	44,5	46,5	49,0	49,5
$N'_C \times 10^3$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0,899	1,121	1,010	1,256	1,346	1,492	1,526
$N_{c,s} \times 10^3$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0,826	1,017	1,063	1,332	1,335	1,515	1,491

**Tabela 1.** Resultados da secagem de celulose de fibra longa (Continuação)

4	X <sub>0</sub> (b.s.)	1,508	1,505	1,510	1,508	1,495	1,497	1,495
	X <sub>c</sub> (b.s.)	0,051	0,030	0,032	0,032	0,037	0,025	0,037
	X <sub>c</sub> (b.s.)	1,005	0,929	0,858	0,917	0,973	0,825	0,985
	T <sub>vap</sub> (°C)	38,0	41,0	43,5	46,5	49,5	53,5	55,0
	T <sub>ar</sub> (°C)	21,1	25,7	19,8	27,7	23,4	29,0	23,9
	T <sub>c</sub> (°C)	34,5	37,5	37,0	43,0	43,0	47,5	48,0
	N <sub>c</sub> ' x 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)	0,958	1,213	1,072	1,290	1,410	1,606	1,664
	N <sub>c,s</sub> ' x 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)	0,977	1,128	1,161	1,376	1,435	1,541	1,678
6	v <sub>AR</sub> (m/s)	Temperatura da Placa (°C)						
		60	65	70	75	80	85	90
	X <sub>0</sub> (b.s.)	1,499	1,513	1,503	1,496	1,504	1,499	1,504
	X <sub>c</sub> (b.s.)	0,051	0,035	0,042	0,033	0,030	0,035	0,031
	X <sub>c</sub> (b.s.)	1,020	0,933	0,935	0,936	1,030	0,872	1,020
	T <sub>vap</sub> (°C)	36,7	39,6	40,6	45,1	47,1	50,6	52,7
	T <sub>ar</sub> (°C)	21,1	23,6	19,4	28,0	29,4	28,8	23,7
	T <sub>c</sub> (°C)	32,5	37,0	34,5	40,0	41,5	45,0	45,5
	N <sub>c</sub> ' x 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)	0,995	1,217	1,195	1,403	1,444	1,825	1,708
	N <sub>c,s</sub> ' x 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>2</sup> s)	0,987	1,120	1,271	1,409	1,592	1,645	1,712

Os resultados do ajuste (R = 0,953 ; F = 302,5 ; p-valores: P < 0,05 ; erro médio da ordem de 4,8 %) são apresentados também na Tabela 1, e na Equação 7, abaixo.

$$N'_{C,S} = \left( [4,423 + (0,0189)T_{pl}] (T_{pl} - T_{vap}) - \dots - (0,585)(v_{ar})^{0,69} (T_{vap} - T_{ar}) \right) \times 10^{-5} \quad (7)$$

A análise destes resultados indica que a abordagem proposta pode ser usada para a estimativa das taxas de secagem durante o período de taxa constante. As variações observadas para alguns valores (maiores erros na faixa de 9 a 10 %) não são suficientes para invalidar a utilização da Equação 7.

**Período de taxa decrescente.** Estendeu-se o ajuste por escoamento capilar a todo período de taxa decrescente, conforme proposto em Motta Lima *et al.* (2000), através da utilização da Equação 8. Esta proposta mostra-se de acordo com as apresentadas por Nissan e Kaye (1955), papel, e Ratna Prabhu *et al.* (1980), tecidos, onde os autores adotam uma redução linear para a taxa, no período decrescente.

$$N'_D = N'_C \frac{(X - X_e)}{(X_c - X_e)} \quad (8)$$

#### Curvas de taxa de secagem ajustadas

As Figuras 24 a 30 trazem os resultados do ajuste das curvas de taxa de secagem, obtidos a partir dos procedimentos descritos anteriormente (Equações 7 e 8).

Apesar das variações encontradas para a região de taxa constante (acima), pode-se observar o bom desempenho desta metodologia na secagem de celulose de fibra longa, principalmente no período de taxa decrescente.

#### Conclusão

As principais conclusões deste trabalho são relacionadas a seguir.

O ajuste do período de taxa constante de secagem, pelo balanço térmico no sólido (Equação 8), mostrou-se adequado para a celulose de fibra longa.

A escolha da abordagem capilar (redução linear da taxa de secagem como função das umidades crítica e de equilíbrio) mostrou-se acertada, possibilitando o ajuste das taxas de secagem para todo o período de taxa decrescente.

A metodologia proposta, Equações 7 e 8, tem condições de suprir a necessidade de um modelo para a taxa de secagem presente em diferentes propostas de modelagem de secadores convencionais de papel, conforme pode ser visto no trabalho pioneiro de Nissan e Kaye (1955), bem como em outros que dele se derivaram.

De modo geral, as taxas de secagem para a celulose do tipo fibra longa foram menores que as respectivas para fibra curta obtidas por Motta Lima *et al.* (2000).

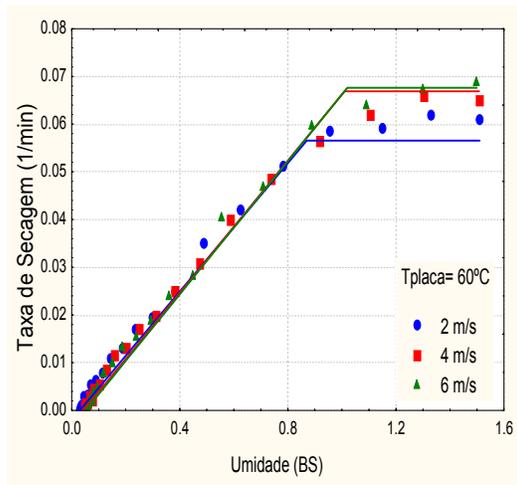


Figura 24. Taxas de secagem ajustadas - 60 °C

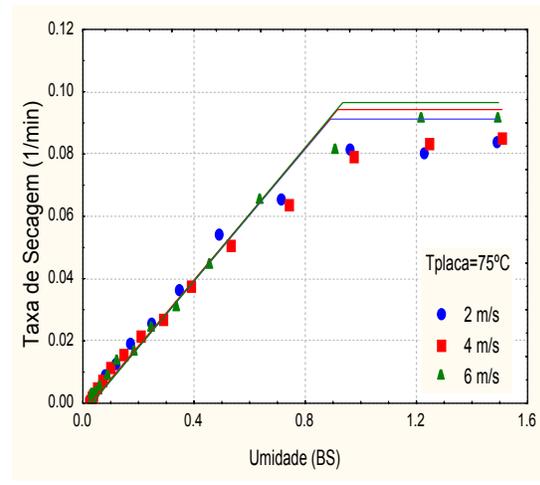


Figura 27. Taxas de secagem ajustadas - 75 °C

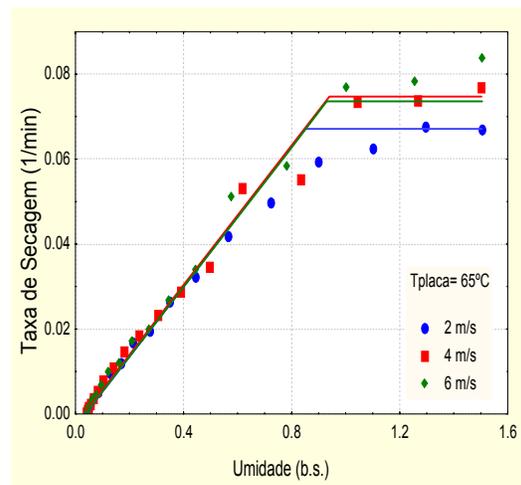


Figura 25. Taxas de secagem ajustadas - 65 °C

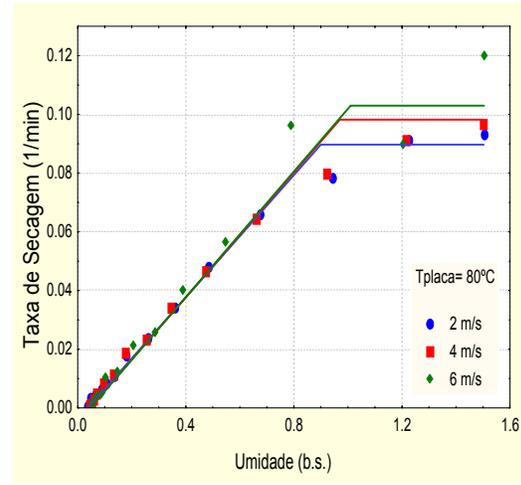


Figura 28. Taxas de secagem ajustadas - 80 °C

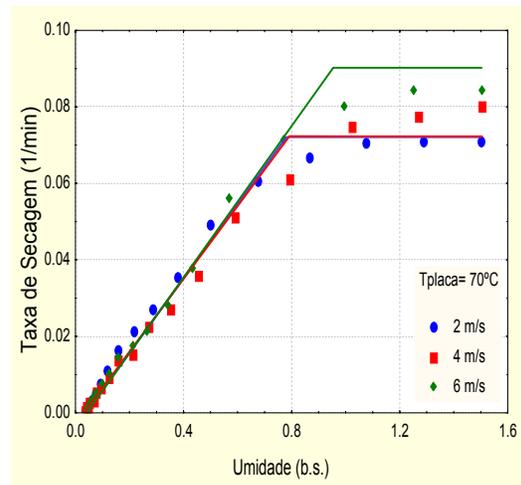


Figura 26. Taxas de secagem ajustadas - 70 °C

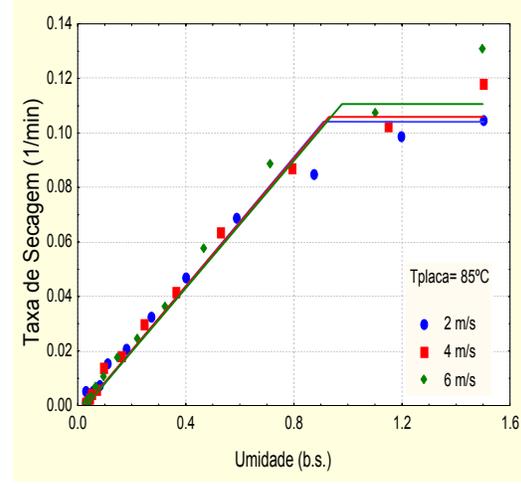


Figura 29. Taxas de secagem ajustadas - 85 °C

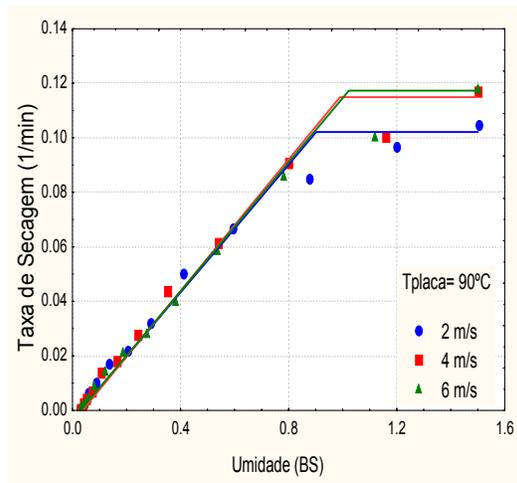


Figura 30. Taxas de secagem ajustadas - 90 °C

### Nomenclatura

- $A_S$  - área/superfície das amostras,  $[L^2]$   
 b.s. - base seca  
 b.u. - base úmida  
 $C_1$  - parâmetro da Equação 3, [-]  
 $C_2$  - parâmetro da Equação 3, [-]  
 $F$  - estatística F,  $\equiv$  razão entre o quadrado médio dos valores preditos e o quadrado médio dos resíduos da estimação (maior F, melhor a estimação e o ajuste da equação), [-]  
 $h_{CF}$  - coeficiente de transferência de calor por convecção,  $[M/\theta T^3]$   
 $H_1$  - parâmetro das Equações 4 e 6 [conforme Equações]  
 $H_2$  - parâmetro das Equações 4 e 6 [conforme Equações]  
 $k_{ef}$  - condutividade térmica,  $[ML/\theta T^3]$   
 $L$  - espessura da amostra,  $[L]$   
 $M_{SS}$  - gramatura das amostras de celulose,  $[M/L^2]$   
 $N_C$  - taxa constante de secagem,  $[1/T]$   
 $N_C'$  - taxa constante de secagem,  $\equiv (N_C)(M_{SS})$ ,  $[M/L^2 T]$   
 $N_{C,S}'$  - taxa constante de secagem simulada,  $[M/L^2 T]$   
 $N_D'$  - taxa decrescente de secagem,  $[M/L^2 T]$   
 $P$  - p-valor,  $\equiv$  nível de significância dos parâmetros (deve ser  $< 0,05$ ), [-]  
 $Pr$  - número de Prandtl, [-]  
 $Q_S$  - calor transferido para o sólido,  $[ML^2/T^2]$   
 $Re$  - número de Reynolds, [-]  
 $R^2$  - coeficiente de correlação da equação ajustada, [-]

- $t$  - tempo de secagem,  $[T]$   
 $T$  - temperatura das amostras,  $[\theta]$   
 $T_{ar}$  - temperatura do ar de secagem,  $[\theta]$   
 $T_e$  - temperatura de equilíbrio com o ar ambiente (final da secagem),  $[\theta]$   
 $T_{pl}$  - temperatura da placa,  $[\theta]$   
 $T_{SL}$  - temperatura na interface amostra / ar,  $[\theta]$   
 $T_{S0}$  - temperatura na interface placa/amostra,  $[\theta]$   
 $T_{vap}$  - temperatura de vaporização,  $[\theta]$   
 $T_0$  - temperatura inicial da amostra,  $[\theta]$   
 $U$  - coeficiente de global de transferência de calor,  $[M/\theta T^3]$   
 $v_{ar}$  - velocidade do ar de secagem,  $[L/T]$   
 $X$  - umidade (b.s.), [-]  
 $X_0$  - umidade inicial (b.s.), [-]  
 $X_C$  - umidade crítica (b.s.), [-]  
 $X_e$  - umidade de equilíbrio (b.s.), [-]  
 $z$  - variável espacial,  $[L]$   
 $\alpha$  - coeficiente de transferência de calor entre a placa e a amostra,  $[M/\theta T^3]$   
 $\alpha_1$  - parâmetro da Equação 6,  $[M/\theta T^3]$   
 $\alpha_2$  - parâmetro da Equação 6,  $[M/\theta^2 T^3]$   
 $\lambda$  - calor latente de vaporização,  $[L^2/T^2]$

### Referências

- ASENSIO, M.C. et al. Thermal contact conductance of a moist paper/metal interface for paper drying applications. *J. Heat Transfer - Transactions of the ASME*, Fairfield, v. 115, n. 6, p. 1051-1053, 1993a.  
 ASENSIO, M.C. et al. Measurements of thermal contact conductance for a paper/metal interface and effective conductivity of machine samples. *Drying Technol.*, New York, v. 11, n. 6, p. 1371-1384, 1993b.  
 BELL, D.O. et al. Recent developments in paper drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Advances in Drying*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1994, v. 5, cap. 6.  
 HODGES, C.R. Laboratory drying study and applications for paper machine drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'82*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1982. p. 99-105.  
 LEE, P.F.; HINDS, J.A. Analysis of heat and mass transfer within a sheet of papermaking fibers during drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'82*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1982. p. 74-82.  
 MOTTA LIMA, O.C. Estudo sobre a secagem de folhas de celulose. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 1999.  
 MOTTA LIMA, O.C. et al. Estudo sobre a secagem de papel VI: secagem condutiva/convectiva com ar ambiente

- em convecção forçada. In: COBRASP, 26, 1998, Teresópolis-RJ. *Proceedings...* Teresópolis: DTQ/IT-UFRJ, 1999, v. 2, p.429-436
- MOTTA LIMA, O.C. *et al.* Taxas de secagem na secagem condutiva/convectiva de papel com ar ambiente em convecção forçada. In: COBRASP, 27, 1999, Campos de Jordão-SP. *Proceedings...* Campos de Jordão: DEQ-EPUSP, 2000. p.525-532.
- NISSAN, A.H.; HANSEN, D. Heat and mass transfer transients in cylinder drying: Part I. unfelted cylinders. *AIChE Journal*, New York, v. 6, n. 4, p. 606-611, 1960.
- NISSAN, A.H.; GEORGE Jr., H.H. Heat and mass transfer transients in cylinder drying: Part II. felted cylinders. *AIChE Journal*, New York, v. 7, n. 4, p. 635-641, 1961.
- RATNA PRABHU, M. *et al.* Thermal characteristics of contact drying through computer simulation. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'80*. Washington, D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1980, v. 1, p. 403-412.
- REARDON, S.A. *et al.* Friction, heat and mass transfer for paper drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Kidlington, v. 41, n. 10, p. 1313-1325, 1998.
- RUEFF, M.; CHARUEL, R. Drying of paper: measurement of moisture content. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'86*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1986. v. 1, p. 358-362.
- RUEFF, M.; CHARUEL, R. Drying of paper: measurement of local moisture content. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'89*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1989. p. 157-161.
- RUEFF, M.; LALOUI, F. Influence of sheet structure and process conditions on paper drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'94*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1994. p. 1221-1228.
- SEYED-YAGOOBI, J. *et al.* Heat and mass transfer in a paper sheet during drying. *J. Heat Transfer - Trans. ASME*, Fairfield, v. 114, n. 2, p. 538-541, 1992.
- SHERWOOD, T.K. The drying of solids - III: mechanism of the drying of pulp and paper. *Ind. Eng. Chem.*, Washington, D.C.: v. 22, n. 2, p. 132-136, 1930.
- VIDEAU, J.L.; LEMAITRE, A. An improved model of a paper machine multicylinder drying section. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'82*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1982. p. 129-138.
- WILHELMSSON, B. *et al.* Simulation models of multicylinder paper drying. *Drying Technol.*, New York, v. 11, n. 6, p. 1177-1203, 1993.
- WILHELMSSON, B.; STENSTRÖM, S. Heat and mass transfer coefficients in computer simulation of paper drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.). *Drying'94*. Washington D.C.: Hemisphere Publ. Corp., 1994. p. 1195-1204.

Received on August 23, 2001.

Accepted on November 26, 2001.