Análise da secagem de grãos de soja em secador de leito fixo

Camila Nicola Boeri
Depto de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro
3810-193, Aveiro, Portugal
camilaboeri@hotmail.com

Oleg Khatchatourian
Depto de Física, Estatística e Matemática, DEFEM, UNIJUÍ
98700-000, Ijuí, RS
olegkha@unijui.edu.br

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo obter as curvas de secagem de soja em secador de leito fixo, com as seguintes condições: temperatura do ar entre 45 e 90 °C; teor de umidade inicial entre 0,13 e 0,32 e velocidade do ar de secagem de 0; 0,5; 0,9; 1,5 e 2,5m/s determinando a influência destes parâmetros no processo. Foi realizada uma etapa experimental e também simulações numéricas, onde o modelo matemático utilizado foi o proposto por Khatchatourian et al. (2003), sendo que nesta pesquisa modificou-se a equação que descreve o fluxo de massa, inserindo-se nela os parâmetros velocidade do ar e teor de umidade inicial, obtendo-se uma boa concordância entre os dados experimentais e os simulados. Observou-se que a velocidade do ar de secagem apresenta significativa influência no processo, verificando-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Nota-se que a influência da temperatura do ar na taxa de secagem é maior no princípio do experimento, diminuindo com o tempo de processamento. Conclui-se que a velocidade de secagem depende da temperatura, umidade relativa e fluxo do ar, do tempo de exposição a estas condições, dos teores de água inicial e final e das características dos grãos.*

Palavras-chave: Modelagem Matemática; secagem; soja; simulação.

Introdução

A produção de grãos ou sementes de soja requer que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microrganismos; desta maneira e devido ao teor de umidade elevado por ocasião da colheita, a secagem constitui uma das operações de primordial importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal.

A secagem de produtos agrícolas pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido.

Vários parâmetros têm influência no tempo necessário para reduzir a umidade das sementes ao nível seguro para armazenamento. Os principais fatores a considerar são: temperatura, umidade relativa e vazão do ar, umidade inicial e final e tipo de grão.

De acordo com o exposto, objetivou-se com este trabalho obter as curvas de secagem de soja, em camada fina, com temperaturas do ar de secagem de 45, 60, 70, 80 e 90 °C, para os teores de umidade inicial de 0,13; 0,19; 0,22; 0,28 e 0,32 (base seca) e velocidades do ar de secagem iguais a 0m/s; 0,5m/s; 0,9m/s; 1,5m/s e 2,5m/s; determinar a influência do teor de umidade, da temperatura e da velocidade do ar sobre a secagem de soja através de experimentos e realizar simulações numéricas através do modelo matemático proposto, comparando os resultados simulados com os dados experimentais.

Materiais e Métodos

Determinação do teor de umidade inicial dos grãos

A determinação do teor de umidade dos grãos foi feita através do método direto seguindo-se as normas determinadas pelo Ministério da Agricultura, submetendo-se uma massa de 15g de grãos em uma estufa a uma temperatura de 105 °C, durante 24 horas. As medidas de massa foram feitas usando-se uma balança analítica digital com precisão 10^{-3}g.

Instalação experimental

Para a realização dos experimentos de secagem de soja em camada fina, foi utilizado um protótipo de um secador, que consistiu de um tubo metálico com 0,15m de diâmetro, isolado em toda a sua superfície com lã de vidro e lona.

Este equipamento pode ser divido em dois sistemas: um que gera o fluxo de ar e o outro que realiza a secagem. O primeiro é constituído por um ventilador centrífugo, dutos e uma placa de orifício para medir a vazão do ar. O segundo é composto pelo aquecedor do ar, cilindro de secagem e equipamentos

para medir a temperatura do ar.

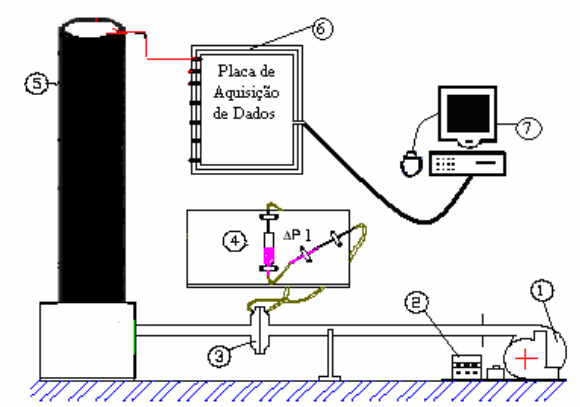

Figura 1: Equipamento Experimental de Secagem

Para aquecer o ar, foram utilizados seis resistores elétricos com potência de 600W. Para controlar a temperatura do ar de secagem, foi instalado um termopar dentro da câmara de secagem que continha a massa de grãos de soja. Esta câmara era metálica e cilíndrica, com diâmetro de 0,15m, acoplada ao sistema de ventilação/aquecimento do ar, e continha uma tela, sobre a qual era disposta a massa de grãos para ser submetida ao fluxo. A espessura da camada fina de grãos era em torno de 7 mm ou dois grãos.

Experimentos de secagem

Após a medida do teor de umidade, a soja foi colocada em embalagens plásticas, fechadas hermeticamente, contendo uma massa de 200g de grãos em cada amostra. O lacre era feito com o auxílio de uma máquina lacradora. Depois de lacradas, as amostras eram postas na geladeira a uma temperatura de 4°C, a fim de se conservar o seu teor de umidade.

Vinte e quatro horas antes de iniciar o processo de secagem, a amostra era retirada da geladeira e deixada em contato com o ar ambiente. Após este tempo, era realizado um pré-aquecimento de cinco minutos na estufa, com a mesma temperatura em que seria realizada a secagem. Ao ser retirada da estufa, a massa de grãos era novamente medida.

Em seguida, a amostra era colocada na câmara de secagem e acionada a contagem do tempo. Passado o tempo de secagem desejado, a massa era novamente medida e recolocada no secador, repetindo-se este procedimento para todos os tempos desejados. Para este procedimento, a massa de grãos ficava em torno de 20s fora do secador, tempo necessário para retirar a amostra, colocá-la na balança, anotar a medida e retorná-la ao secador.

O intervalo de secagem era incrementado de 10 minutos na primeira hora, 20 minutos na segunda hora e a partir da terceira hora, 30 minutos. O experimento era encerrado quando o teor de umidade atingia em torno de 8% (base seca).

O teor de umidade de equilíbrio da soja era calculado para cada condição de umidade relativa do ar e de temperatura de secagem, de acordo com Dalpasquale (1981):

$$X_e = \frac{3{,}962 \cdot UR_S^{\,0{,}4919}}{100 \cdot ln(T_S)} \qquad (1)$$

Onde UR_s é a umidade relativa do ar de secagem (porcentagem) e T_s é a temperatura do ar de secagem (°C).

Tendo-se os teores de umidade inicial, de equilíbrio e os de umidade instantânea da massa de grãos de soja, obteve-se os valores da razão de umidade para cada processo de secagem, dados pela expressão abaixo:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \qquad (2)$$

Em que X é o teor de umidade do produto (base seca), X_e é o teor de umidade de equilíbrio e X_0 é o teor de umidade inicial.

Simulações Numéricas

As simulações numéricas foram feitas utilizando um modelo matemático baseado no proposto por Khatchatourian et al. (2003). Este modelo foi adaptado para descrever o processo de secagem de grãos de soja num secador de leito fixo e é composto por um sistema de quatro equações diferenciais parciais, hiperbólicas, quase-lineares, acopladas, onde estas equações contemplam as trocas de calor e de massa entre o ar e o grão.

Entretanto, apesar de descrever satisfatoriamente as curvas de secagem em relação a influência da temperatura do ar, este modelo não leva em consideração a influência da velocidade do ar e do teor de umidade inicial do grão no processo. Desta forma, a fim de considerar a influência da velocidade do ar de secagem e do teor de umidade inicial dos grãos, será feito um ajuste do coeficiente de transferência de massa durante o processo de secagem, modificando-o em relação ao modelo proposto por Khatchatourian (2003).

Levando-se em conta as considerações feitas na formulação do problema de secagem de soja num secador de leito fixo, o modelo matemático composto pelo sistema de equações diferenciais parciais (EDP) obtido dos balanços de energia e massa, é formado pelas seguintes equações: Equação de conservação da massa de água em relação ao ar, Equação de conservação de energia em relação ao ar, Equação de conservação da massa de água em relação ao grão e Equação de conservação de energia em relação ao grão. Possui ainda as seguintes equações: Teor de umidade do grão (base seca), Umidade do ar que passa por entre os grãos, Densidade do fluxo de massa e Densidade do fluxo de calor.

Equação de conservação da massa de água no ar: Esta equação determina a variação do teor de umidade do ar em diferentes pontos internos do secador.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{a_{sv}\Phi_m(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a} \quad (3)$$

Onde Y é o teor de umidade do ar, v_a é velocidade do ar, a_{sv} é a razão entre a área da superfície e o volume do grão, ε é a porosidade, ρ_a é a massa específica do ar e Φ_m é a densidade do fluxo de massa.

Equação de conservação de energia para o ar: Esta equação determina a energia transferida pelo ar para os grãos.

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a_{sv}(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (C_{pa} + Y C_{pv})} \left[\Phi_m C_{pv}(T_g - T_a) + \Phi_h\right] \quad (4)$$

Onde T_a é a temperatura do ar, C_{pa} é o calor específico do ar à pressão constante, C_{pv} é o calor específico do vapor de água à pressão constante, T_g é a temperatura do grão e Φ_h é a densidade do fluxo de calor.

Equação de conservação da massa de água no grão: Esta equação determina a variação do teor de umidade dentro do grão.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{a_{sv}\Phi_m}{\rho_g} \quad (5)$$

Equação de conservação de energia no grão: Esta equação determina a energia para aquecer o grão e fazer evaporar a sua água.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{a_{sv}\{\Phi_h + \Phi_m[H_v + T_g(C_{pv} - C_{pw})]\}}{\rho_g(C_{pg} + X C_{pw})} \quad (6)$$

Onde T_g é a temperatura do grão, H_v é o calor latente de vaporização, C_{pw} é o calor específico da água à pressão constante e C_{pg} é o calor específico do grão.

Teor de Umidade do grão (base seca): Supondo o esquema de um grão de soja, onde é possível separar a massa de água da massa de matéria seca, o teor de umidade é determinado pela razão entre elas:

$$X = \frac{m_w}{m_{gs}} \quad (7)$$

Onde m_w é massa de água no grão e m_{gs} é massa de matéria seca do grão.

Umidade do ar que passa por entre os grãos. Considerando o esquema de um determinado volume de ar, a umidade do ar que passa por entre os grãos (umidade do ar existente nos espaços intersticiais) num determinado período de tempo de secagem ou mesmo antes de iniciá-la, pode ser expressa por:

$$Y = \frac{m_{aw}}{m_{as}} \quad (8)$$

Onde Y é umidade do ar, m_{aw} é massa de água no ar e m_{as} é massa de ar seco.

Densidade do fluxo de massa. Com o aquecimento do grão, e o conseqüente aumento da pressão no seu interior, ele rompe o equilíbrio higroscópico e a água, em forma de vapor, tende a sair. A quantidade de massa de água em forma de vapor, que atravessa a superfície do grão por unidade de área e por unidade de tempo é o que determina a densidade do fluxo de massa. Khatchatourian (2003), usando as relações de Chilton-Colburn (SISSON, 1988), ajustou a equação do fluxo de massa, levando em consideração a influência da velocidade do ar de secagem, obtendo a seguinte relação:

$$\Phi_m = \sqrt{\frac{v_a}{v_0}} M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T) + M_3(T) \cdot \ln(X - X_e)}} \quad (9)$$

onde:

Φ_m é a densidade do fluxo de massa e

$M_1(T) = K_1(X_0 - X_e)$

$M_2(T) = K_2 - K3.ln\ (X_0 - X_e)$

$M_3(T) = K_3$ em que K_1, K_2 e K_3 são funções temperatura.

Densidade do fluxo de calor. É a quantidade de calor que passa na superfície do grão por unidade de tempo e por unidade de área. A transferência de calor no processo de secagem ocorre, predominantemente, por convecção forçada entre o ar de secagem e a superfície dos grãos. Segundo a lei de Newton-Richmann para transferência de calor convectiva, o fluxo de calor é proporcional à diferença de temperatura entre o ar e o grão, dada por:

$$\Phi_h = h(T_g - T_a) \quad (10)$$

Onde Φ_h é a densidade do fluxo de calor, h é o coeficiente de transmissão de calor, T_g é a temperatura do grão e T_a é a temperatura do ar.

Khatchatourian (2003) a partir do coeficiente de transferência de calor proposto por Loncin, utilizado por Courtois e Lasseran (1993) e usando a mesma analogia feita para a transferência de massa, encontrou a seguinte equação para o valor de h:

$$h = \sqrt{\frac{v_a}{v_0}}(-19{,}718 + 0{,}2576 T_g + 379{,}41 Y) \quad (11)$$

Modificação do Modelo. O modelo acima descrito foi modificado a fim de ajustar a influência da velocidade do ar de secagem e do teor de umidade inicial dos grãos. A modificação deu-se na equação referente ao fluxo de massa dada pela Eq. (9). Assim, o fluxo de massa passa a ser descrito por:

$$\Phi_{me} = (a \cdot v + b) \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^c \cdot \left(M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T)+M_3(T)\cdot \ln(X-X_e)}}\right) \quad (12)$$

Onde os coeficientes a, b e c foram obtidos através do método de mínimos quadrados utilizando-se os dados experimentais na minimização do funcional.

Dessa forma, a equação pode ser escrita como:

$$\Phi_{me} = (0{,}85 \cdot v + 0{,}15) \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{0{,}856} \cdot \left(M_1(T) \cdot e^{-\sqrt{M_2(T)+M_3(T)\cdot \ln(X-X_e)}}\right) \quad (12)$$

Resultados e Discussão

Influência da velocidade do ar no processo de secagem.

Nas Fig. 2 e 3 estão apresentadas as curvas de secagem em função da velocidade do ar, mantida a temperatura constante em 45°C para diversos teores de umidade, onde as curvas discretas representam os dados experimentais e as contínuas são os resultados simulados. Observa-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Conforme Hall (1980), após as primeiras horas, a secagem apresentou velocidade decrescente, devido ao transporte interno da água ser menor do que a taxa de evaporação; assim, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e, portanto, há aumento da temperatura do produto.

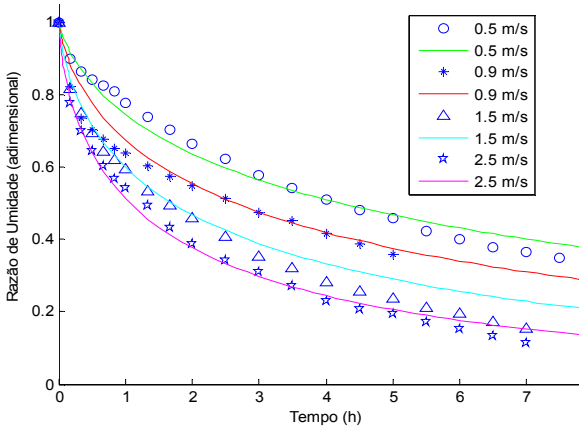

Figura 2: Influência da velocidade do ar. TS = 45°C, X0 = 0,28

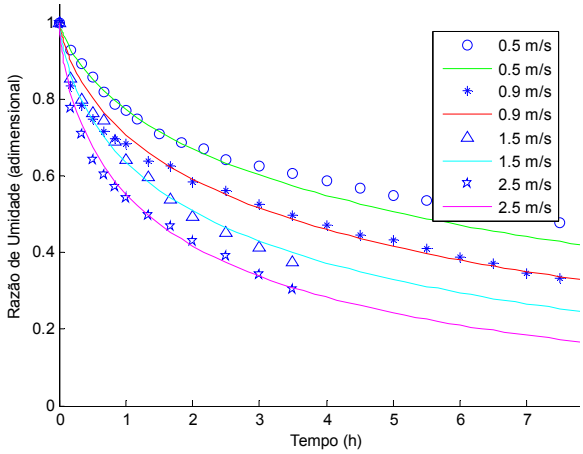

Figura 3: Influência da velocidade do ar. T_S = 45°C, X_0 = 0,22

As Fig. 4 a 7 apresentam as demais curvas de secagem em função da velocidade do ar para os restantes níveis de temperaturas avaliados – 60°C, 70°C, 80°C e 90°C –, onde pode ser observado um comportamento semelhante em todos os casos, conforme descrito anteriormente.

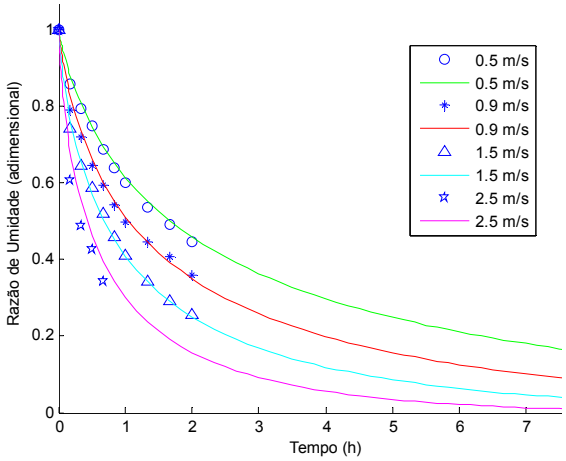

Figura 4: Influência da velocidade do ar. T_S = 90°C, X_0 = 0,19

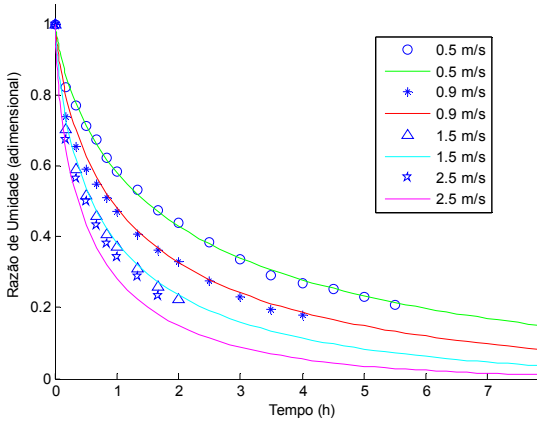

Figura 5: Influência da velocidade do ar. T_S = 80°C, X_0 = 0,28

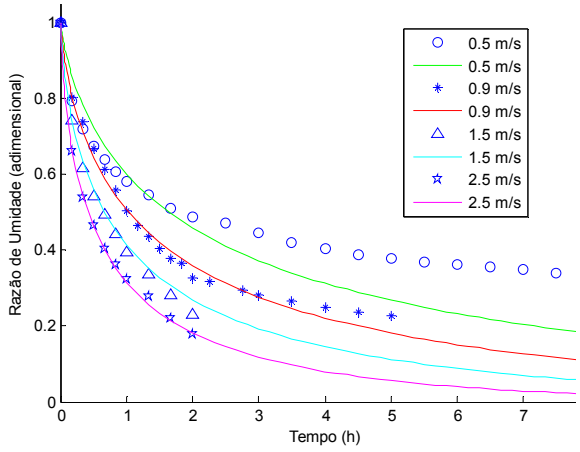

Figura 6: Influência da velocidade do ar. $T_S = 70°C$, $X_0 = 0,32$

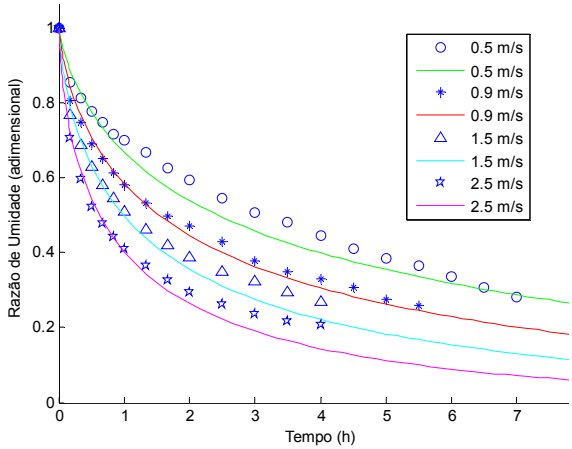

Figura 7: Influência da velocidade do ar. $T_S = 60°C$, $X_0 = 0,28$

Na análise dos gráficos acima, fica evidenciada a influência que a velocidade do ar possui no processo de secagem, onde observa-se que este ocorre mais rapidamente para velocidades mais elevadas, comportamento observado para todos os teores de umidade iniciais e temperaturas do ar. Outro fator importante em relação ao fluxo de ar é que quanto maior a quantidade de ar forçado que passar pela massa de grãos, mais rapidamente à frente de secagem se desloca, diminuindo o tempo de secagem e tornando o processo mais seguro (Queiroz et al., 1985). Isso ocorre pelo aumento do coeficiente de transferência de massa, ou seja, a elevação da velocidade do ar acelera o processo de transferência de massa entre a superfície do grão e o ambiente.

Influência da temperatura do ar de secagem

As Fig. 8 e 9 apresentam as curvas de secagem com a influência da temperatura do ar. Observa-se que a velocidade de secagem aumentou com a elevação da temperatura, ou seja, foi necessário um menor tempo de exposição dos grãos de soja ao ar aquecido para atingir o teor de umidade desejado, devido a maior disponibilidade de energia para a vaporização da água. Isso acontece porque a elevação da temperatura aumenta o coeficiente de difusão de massa. Nota-se também que, no início da secagem, a evaporação de água é mais pronunciada, diminuindo ao longo do tempo, tornando-se nula ao final desta. Neste momento, os efeitos de transferência de massa tornam-se desprezíveis, quando os grãos tendem a alcançar os teores de umidade de equilíbrio.

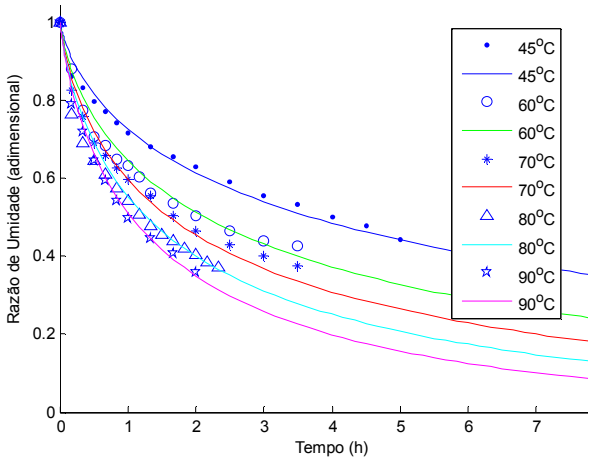

Figura 8: Influência da temperatura do ar. v = 0,9 m/s, $X_0 = 0,19$

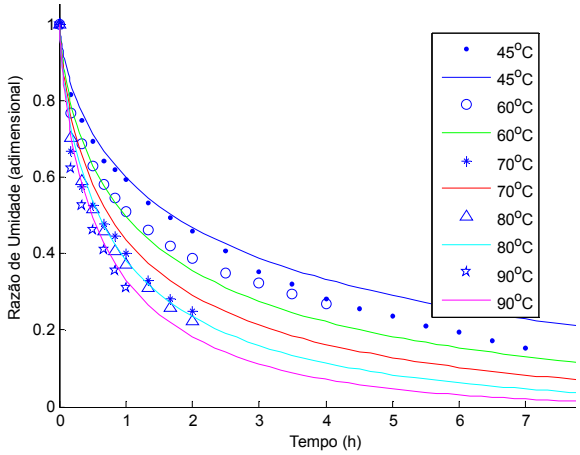

Figura 9: Influência da temperatura do ar. v = 1,5 m/s, $X_0 = 0,28$

Observou-se que o maior tempo de secagem ocorreu a 45°C, e o menor a 90°C, havendo efeito decrescente no tempo de secagem à medida que ocorre o aumento na temperatura do ar. Isso é ocasionado devido ao aumento do potencial de secagem decorrente do aumento da temperatura do ar, o que faz com que haja diminuição da umidade relativa do ar de secagem.

Influência do teor de umidade inicial dos grãos

As curvas de secagem a seguir indicam uma variação de umidade mais rápida para teores de umidade mais elevados e secagem mais lenta para teores de umidade mais baixos, já que nos teores maiores existe um maior gradiente de umidade entre o grão e o ar. Outro fator é que, quando o grão possui um alto teor de umidade, grande parte dessa água se concentra nos poros dos grãos, sendo mais fácil sua liberação. Já com baixos teores de umidade, a concentração de água nos poros é menor, sobrando a água que faz parte da composição das moléculas dos grãos, que é mais difícil de ser liberada.

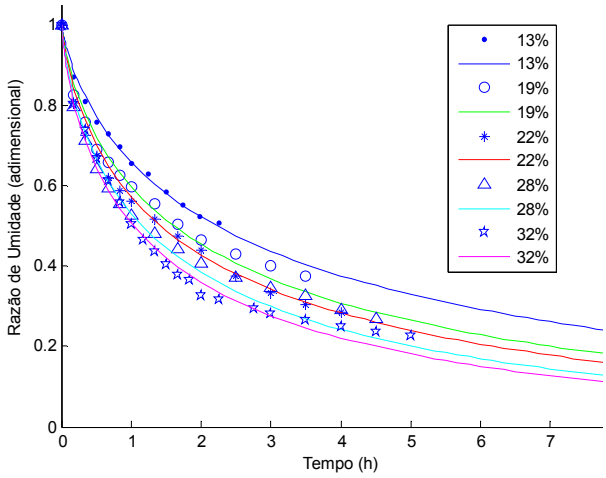

Figura 10: Influência do teor de umidade inicial do grão. v = 0,9 m/s, T_S = 70°C

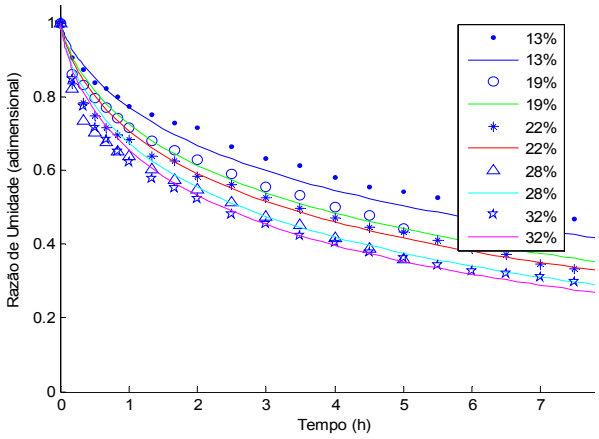

Figura 11: Influência do teor de umidade inicial do grão. v = 0,9 m/s, T_S = 45°C

Conclusões

A metodologia experimental empregada mostrou-se adequada para atingir os objetivos da pesquisa. Com este estudo, verifica-se que a secagem é significativamente afetada pelos parâmetros velocidade e temperatura do ar de secagem e teor de umidade inicial dos grãos de soja.

Pode-se observar que a velocidade do ar de secagem apresenta relevante influência no processo, notando-se uma maior retirada de água durante as primeiras horas de secagem. Percebe-se que a dinâmica de secagem dos grãos de soja mostra uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar, característica presente na maioria dos produtos agrícolas. Nota-se que a influência da temperatura do ar na taxa de secagem é maior no princípio do experimento, diminuindo com o tempo de processamento.

Quanto ao modelo matemático utilizado nesta pesquisa, a alteração proposta mostrou-se adequada visto que verificou-se que a velocidade do ar de secagem é um parâmetro muito importante e que se faz indispensável dentro do modelo matemático, conforme mostraram as análises realizadas.

Referências

[1] D.B. Brooker, F.W. Bakker-Arkema, and C.W. Hall, Drying cereal grains, *The Avi Publishing Company*, Westport, 1974.

[2] F. Courtois, J.C. Lasseran, A CAD Software to improve the heat energy efficiency of mixed-flow maize dryers, CESA/FAO, *Latin American Technical Meeting of Grain Drying a Storage,* 1993, 18-22.

[3] V.A. Dalpasquale, "Drying of soybeans in continuous-flow dryers and fixed-bed drying systems", Tese (Ph.D), Michigan State University, Michigan, 1981.

[4] C.W. Hall, Drying and storage of agricultural crops. *AVI Publishing Company*, Westport, 1980.

[5] O. Khatchatourian, P.A.P. Borges and H.A. Vielmo, Simulation of Soy Grains Drying Dynamics in Camera of Fixed Bed, XVII *COBEM, International Congress of Mechanical Engineering*, Anais. CD/ROM, 2003.

[6] Ministério da Agricultura e Reforma Agrária do Brasil, "Regras para análise de sementes". Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992, 365 p.

[7] D.M. Queiroz et al. "Modelos Matemáticos de Simulação de Secagem de Grãos". Viçosa: Centreinar, 1985.