

ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO E CURVAS DE SECAGEM PARA ARROZ EM CASCA EM SILOS DE ARMAZENAGEM

Daniel Neutzling Lehn¹, Luiz Antonio de Almeida Pinto²

RESUMO

O arroz é um cereal de grande consumo mundial e, sendo um produto sazonal, sua conservação e armazenagem são justificadas. O Brasil é o maior produtor da América do Sul, concentrando 50% da produção na região Sul. A secagem de arroz em casca para a manutenção da qualidade, no período de armazenagem, é freqüentemente realizada em secadores de grande capacidade, com uso limitado à época da colheita. Uma alternativa de menor custo para a secagem consiste em realizá-la em silos de armazenagem, utilizando o sistema de aeração e o ar natural como ar de secagem. O objetivo deste trabalho foi analisar as equações clássicas para secagem de grãos, que melhor se ajustassem aos dados experimentais, obtidos na secagem de arroz em casca, em silo de armazenagem. A determinação de isotermas de equilíbrio foi indispensável para a avaliação da interação do sólido com o vapor d'água presente no ar de secagem, uma vez que sua temperatura e umidade relativa não foram constantes. Os parâmetros das equações de isotermas de Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Oswin e Halsey, para grãos, foram determinados por meio da análise de dados de umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio de arroz em casca, obtidos pelo método estático, empregando soluções ácidas, sendo o tratamento dos dados realizado por meio de análise de regressão não-linear, pelo método dos mínimos quadrados. Concluiu-se que a equação de Halsey apresentou o melhor ajuste aos dados de umidade de equilíbrio, nas temperaturas de 10°C, 15°C e 20°C. Foi verificado o ajuste dos dados experimentais obtidos da secagem em silos metálicos com o sistema de aeração, aplicando-se as correlações de Lewis, Page, Brooker, Henderson-Henderson e Overhults.

Palavras-chave: secagem, arroz, silos

ABSTRACT

Equilibrium Isotherms and Drying Curves for Rough Rice in Storage Bins

Rice is a cereal highly consumed throughout the world. It is also a seasonal product and its production and conservation processes are justifiable. Brazil is the largest South American producer, concentrating 50% of this production in the South region. In order to keep the quality during the storage period, the rough rice drying process is often conducted in dryers, which have a high drying capacity at the limited period of the harvest. A cheaper alternative for the drying process would be conducting its performance in a storage bin, using the aeration system and the natural air as the drying air. The goal of this study was to analyze the classical equations for drying cereals that would better adjust the experimental data obtained from drying the rough rice in storage bins. The determination of the isotherm equilibrium variations were paramount to the evaluation of the interaction between the solid matter and water steam, which is present in the air used for the drying process, also taking into account the fact that its temperature and humidity were not constant. The parameters of the isotherm equations of Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Oswin and Halsey for cereals were determined by using the data analysis of the air relative humidity and the equilibrium moisture of the rough rice obtained by statistical method using acid solutions. The treatment of the data was performed by using a non-linear regression analyses based on the minimum square method. The Halsey equation showed the best adjustment for the equilibrium moisture data at 10°C, 15°C and 20°C. The adjustment of the experimental data obtained in the drying metallic bins with aeration system, was verified by applying the correlations Lewis, Page, Brooker, Henderson-Henderson and Overhults.

Keywords: drying, rough rice, storage bins

¹ Aluno de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos - FURG

² Professor do Departamento de Química – Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Rua Eng. Alfredo Huck, 475, CEP 96201-900 – Rio Grande – RS E-mail: dqmpinto@super.furg.br

INTRODUÇÃO

O Brasil, cuja produção de arroz ultrapassa dez milhões de toneladas por safra, é um dos dez maiores produtores mundiais e o maior da América do Sul, sendo que, na região Sul concentram-se mais de 50% da produção nacional (IBGE, 2003). Por ser o arroz um produto sazonal e de consumo constante, a conservação e armazenagem do produto torna-se indispensável (Ness, 1998).

A secagem do arroz em casca é, normalmente, efetuada em secadores intermitentes e, em menor escala, em secadores contínuos. Ambos os sistemas apresentam a necessidade de instalações com grande capacidade de secagem, o que gera um alto custo. Uma alternativa de menor custo é a secagem em silos metálicos (Augusto e Ness, 2001). A qualidade de grãos e sementes de arroz seco em silo de armazenagem foi estudada por Porto (2001) e Ness (1998).

As condições do ar na secagem com ar ambiente não são constantes, o que torna a determinação das isotermas de equilíbrio indispensável à avaliação da interação do sólido com o vapor d'água presente no ar de secagem.

A utilização de equações semi-empíricas, para representar a cinética de secagem de grãos visa buscar uma forma de representar o comportamento da secagem que se ajuste melhor aos dados experimentais (Barrozo et al., 1998).

O objetivo deste trabalho foi analisar as equações clássicas para a secagem de grãos que apresentassem melhor ajuste aos dados experimentais obtidos na secagem de arroz em casca, em silo de armazenagem.

REVISÃO DA LITERATURA

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura, é definida como a umidade deste, correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Esta

variável determinará o mínimo valor de umidade, que o material pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais, sendo seu valor de fundamental importância na modelagem do processo de secagem (Barrozo et al., 1998).

A determinação das isotermas de sorção de um material pode ser efetuada, medindo-se a variação de umidade do material ou do meio em que este se encontra, por meio dos métodos gravimétrico (variação da massa do material) e higrométrico (variação da umidade relativa do ar circundante). Tais métodos podem, ainda, apresentar uma variante quanto à movimentação do ar ambiente, podendo ser: estático, no qual o ar que circunda o material está sob condições estáticas, ou dinâmico, no qual o fluido gasoso está sendo movimentado, mecanicamente (Bonifácio et al., 1993). A vantagem do método estático refere-se à maior facilidade em obter condições termodinâmicas constantes.

Um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas têm sido propostas para estimativa da umidade de equilíbrio de materiais biológicos. As equações teóricas são baseadas nas conhecidas teorias cinéticas de adsorção de Kelvin, Langmuir e BET (Brunauer, Emmett e Teller). Os modelos teóricos não conseguem prever, com precisão, a umidade de equilíbrio em grãos, em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Este fato, motivou o aparecimento de vários modelos empíricos e semi-empíricos, na tentativa de aumentar a precisão na estimativa desta variável (Barrozo et al., 1998).

As principais equações utilizadas na literatura para estimativa da umidade de equilíbrio de cereais encontram-se agrupadas no Quadro 1. Em que X_E é a umidade de equilíbrio do material (base seca), T_s é a temperatura do material, U_R é a umidade relativa do ar e a_i , b_i e c_i são parâmetros de ajuste.

A equação de Chung-Pfost foi utilizada com os valores-padrão da ASAE D245.4 (Asae, 1995) para arroz com casca, no trabalho de Basunia e Abe (2001b).

As equações de Chung-Pfost e Henderson-Thompson foram utilizadas para determinação da umidade de equilíbrio de arroz em casca, no estudo conduzido por Abe e Basunia (1996). A equação de Oswin foi utilizada para arroz em casca no trabalho desenvolvido por Chen e Wu (2001). A equação de Chung-Pfost, com os parâmetros de referência de 1988 (ASAE,1988), foi empregada na simulação realizada por Rumsey e Rovedo (2001) para secagem em escoamento cruzado de arroz. A equação de Henderson-Thompson foi utilizada com os parâmetros determinados por Brooker et al. (1992) no trabalho de Gastón et al. (2002).

A secagem de um material pode ocorrer em dois ou mais períodos distintos. Para materiais com umidade elevada, existe, inicialmente, um período no qual a superfície do sólido apresenta-se coberta com uma película de umidade e a água evapora do material, à mesma temperatura de bulbo úmido do ar. Neste período, a secagem ocorre sob taxa constante de migração de umidade, em que a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor que a resistência externa de remoção do vapor de água da superfície. Após isso, existe um ou mais períodos em que os mecanismos internos de migração de umidade são controladores do processo de secagem, reduzindo, continuamente, a taxa de secagem. Os cereais raramente apresentam o período de secagem sob taxa constante (Fortes e Okos, 1980).

As equações semi-empíricas são utilizadas na análise da secagem a fim de que se possa encontrar uma forma para representar a cinética de secagem de grãos que melhor se ajuste aos dados experimentais. No Quadro 2 estão apresentadas as equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas, na literatura, para grãos, em que X_R é o adimensional de água livre do material $[(X-X_E)/(X_0-X_E)]$, o parâmetro K é conhecido como constante de secagem, t é o tempo, C e n são parâmetros de ajuste.

A equação de Lewis foi proposta, com base analógica à lei de Newton do Resfriamento. As equações de Brooker e Henderson podem ser vistas como simplificações da solução analítica do modelo difusivo, em que, na primeira equação, somente o primeiro termo e, na segunda, apenas os dois primeiros termos da série são considerados. As equações de Page e Overhults foram obtidas a partir de modificações empíricas da equação de Lewis (Barrozo et al., 1998).

A equação de Page foi utilizada no trabalho de Basunia e Abe (2001b), para descrever as características da secagem por convecção natural de arroz em casca. As equações de Lewis, Page e Brooker foram empregadas, no estudo de Chen e Wu (2001), na secagem em camada delgada de arroz em casca com alto teor de umidade.

Quadro 1. Equações de isotermas para determinação da umidade de equilíbrio

Nome	Equação
Henderson-Thompson (1968)	$X_E = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a_1(Ts + c_1)} \right]^{1/b_1}$
Oswin (1946)	$X_E = (a_2 + b_2Ts) \left[\frac{1-UR}{UR} \right]^{-1/c_2}$
Chung-Pfost (1976)	$X_E = -\frac{1}{b_3} \ln \left[\frac{(Ts + c_3)\ln(UR)}{-a_3} \right]$
Halsey (1976)	$X_E = \exp(a_4 + b_4Ts) [-\ln(UR)]^{1/c_4}$

Fonte: Basunia e Abe (2001a).

Quadro 2. Equações semi-empíricas para secagem de grãos

Nome	Equação
Lewis(1921)	$XR = \exp(-Kt)$
Brooker (1974)	$XR = C \exp(-Kt)$
Henderson e Henderson (1968)	$XR = C \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$
Page (1949)	$XR = \exp(-Kt^n)$
Overhults(1973)	$XR = \exp[-(Kt)^n]$

Fonte: Barrozo, et al. (1998).

MATERIAL E MÉTODOS

Matéria-prima

Para determinação das isotermas de equilíbrio, foram utilizados grãos de arroz em casca da variedade “El Passo 144”(L-144), no ano de 2002, provenientes da região Sul do Rio Grande do Sul.

Na operação de secagem, realizada em silos de armazenagem, foram utilizados grãos de arroz em casca, longo fino, irrigado, variedade “El passo 144” (L-144), no ano de 1998, e sementes de arroz em casca das variedades “El Passo 144”(L-144) e BR IRGA-410, no ano de 2000, ambas procedentes da região Sul do Rio Grande do Sul. A caracterização das amostras foi realizada segundo as normas da AOAC

(1995): umidade, proteína, cinzas, lipídios e carboidratos.

As amostras foram coletadas na Indústria Efegê Armazenamento e Administração de Bens Ltda, em Pelotas – RS, após a pré-limpeza. Foram selecionados grãos inteiros, íntegros e com casca. Para realização dos experimentos, foram utilizados potes de vidro com 7 cm de altura e 6 cm de diâmetro, hermeticamente fechados, garantindo uma atmosfera constante. No interior dos potes, além de suportes plásticos para colocação das amostras, havia soluções de ácido sulfúrico, em concentrações diferentes para cada pote, garantindo a variação da umidade relativa do ar na faixa de 4 a 80%, para as três temperaturas estudadas, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Valores de umidade relativa do ar para as concentrações de H₂SO₄ em função das temperaturas utilizadas

Concentrações de H ₂ SO ₄	10°C	15°C	20°C
25%	0,810	0,812	0,815
30%	0,750	0,751	0,752
35%	0,672	0,674	0,676
40%	0,566	0,566	0,567
45%	0,454	0,458	0,461
50%	0,346	0,350	0,353
55%	0,245	0,247	0,252
60%	0,158	0,160	0,163
65%	0,086	0,089	0,091
70%	0,054	0,0452	0,041

Fonte: Perry e Chilton (1983).

O aparato permaneceu em estufa incubadora, por 14 dias, sob temperatura controlada, tempo suficiente para atingir massa constante. Foi utilizada uma massa inicial de 3 g e, ao longo do tempo, foram realizadas pesagens sucessivas no sétimo, décimo e décimo quarto dia, em uma balança com precisão 0,001 g. Alcançadas as condições de equilíbrio, a umidade inicial do material foi determinada pelo método de estufa a 105°C, por 24 horas. Os experimentos foram realizados para três temperaturas diferentes (10°C, 15°C e 20°C), sendo a reprodutibilidade dos dados verificada por meio de tréPLICAS.

As amostras foram secas em silos de armazenagem metálicos com capacidade de 270 kg cada, com taxa de aeração de 3,54m³/min por m³ de grão, na Indústria Efegê Armazenamento e Administração de Bens Ltda, em Pelotas – RS, por Ness (1998), para grãos, e por Porto (2001), para sementes. As condições do ar de secagem foram controladas e monitoradas utilizando-se os sistemas Dryco (Sistema de Controle Operacional para Aeração de Cereais) e Gisma (Gerenciamento Inteligente do Sistema de Manutenção da Qualidade da Massa de Grãos), ambos desenvolvidos pela Dryeration Ltda, Porto Alegre-RS.

No sistema Dryco, foram utilizados os seguintes parâmetros para controle da secagem: temperatura e umidade relativa do ar ambiente (estação meteorológica) e temperatura e umidade relativa do ar no interior do silo (entrada e centro).

Os dados de condição climática para o sistema Dryco foram obtidos em uma estação meteorológica, onde foi medido: temperatura do ar, umidade relativa do ar, bem como situações de chuva, nevoeiro e orvalho, transmitindo-as, continuamente, ao sistema. Esses dados serviram de base para as operações de todo o sistema.

O gerenciador Dryco possui um controlador com ciclos operacionais automáticos que promovem a secagem e resfriamento dos grãos e sementes com ar ambiente até que a temperatura seja a mais baixa possível, condicionada pelo clima local. Os monitoramentos com o sistema Gisma foram efetuados por meio de sensores colocados no interior dos silos que, a cada intervalo de quinze minutos, armazenaram dados de temperatura e umidade relativa do ar intersticial.

Na Figura 1 está apresentado um esquema do silo utilizado nos experimentos de secagem. O período total de secagem e armazenamento para os experimentos foi de 366 dias para grãos e de 186 dias para sementes.

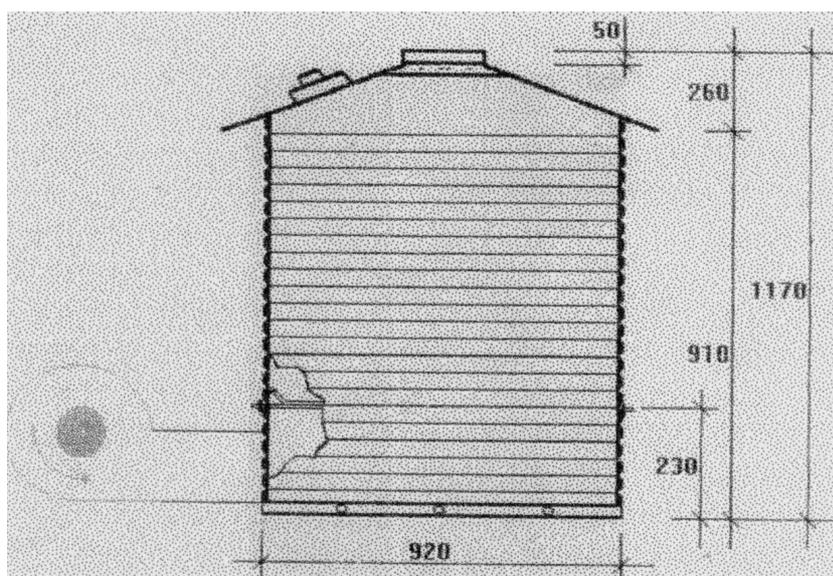


Figura 1. Dimensões (em mm) do silo secador. Fonte: Ness (1998)

A qualidade de grãos e de sementes de arroz em casca secos, armazenados em silos metálicos, foi determinada nos trabalhos de Porto (2001) e Ness (1998).

Quadro 4, podendo-se observar o alto valor da umidade pós-colheita, tornando o arroz impróprio para armazenagem por longo período.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição proximal

A composição proximal para o arroz integral (sem casca) está apresentada no

Isotermas de equilíbrio

Os dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para a temperatura de 20°C, estão apresentados na Figura 2.

Quadro 4. Composição proximal do arroz integral

Componente	Composição
Umidade	18,1 ± 0,2%
Proteína	8,3 ± 0,2%
Lipídios	2,6 ± 0,1%
Cinzas	1,3 ± 0,1%
Carboidratos	69,6 ± 0,5%

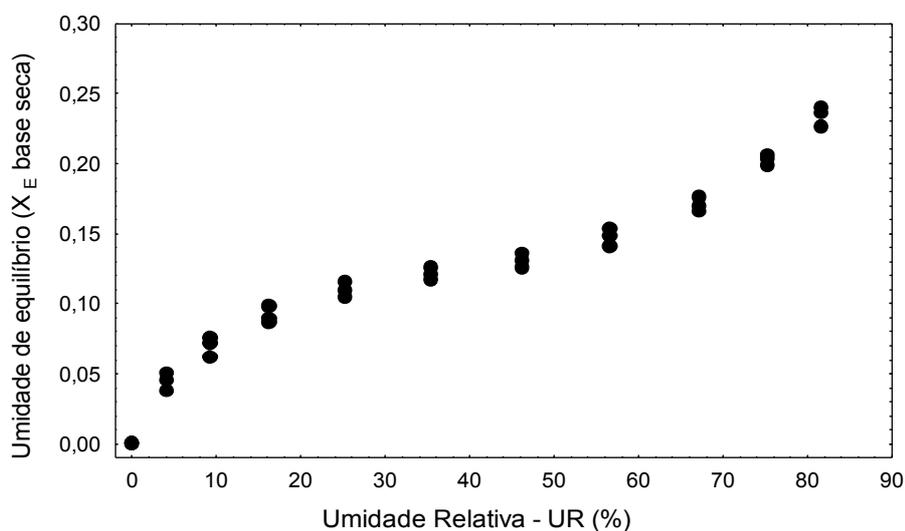


Figura 2. Isoterma de equilíbrio para triplicadas de amostras de arroz em casca L-144, utilizando soluções ácidas, sob temperatura de 20°C.

Com os valores obtidos da umidade de equilíbrio (X_E) e umidade relativa (UR) do arroz, para as três temperaturas, construíram-se as curvas X_E versus UR, conforme apresentado na Figura 3. Pode ser observado, nesta figura, o comportamento sigmoidal característico de isotermas de alimentos para as três temperaturas.

No Quadro 5 estão apresentados os resultados da análise de regressão não-linear, pelo método dos mínimos quadrados (para X_E como decimal em base seca, T_s em °C e UR em decimal), com os respectivos valores de R^2 para cada

equação, além do teste-t de Student. Com exceção da equação de Henderson, todas as equações em análise apresentaram parâmetros em nível de 99% ($p < 0,01$) de significância.

Todas as equações mostradas no Quadro 4 apresentaram altos coeficientes de determinação ($R^2 > 97\%$). Avaliando-se os resultados do teste-t de Student, que relaciona o parâmetro estimado com seu desvio-padrão, nota-se que, nas equações de Halsey e Oswin, os parâmetros estimados apresentam melhor qualidade.

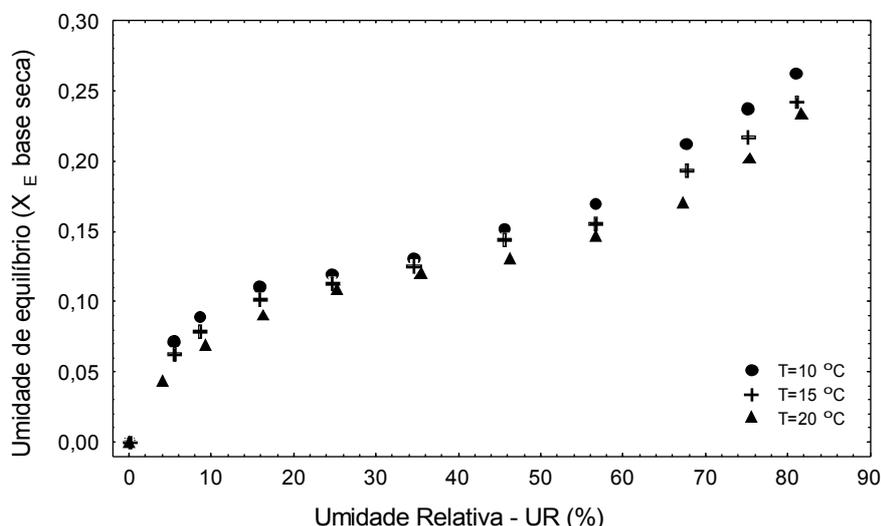


Figura 3. Isotermas de equilíbrio do arroz em casca L-144, sob temperaturas de 10, 15 e 20°C.

Quadro 5. Mínimos quadrados e parâmetros ajustados para cada equação de equilíbrio

Equações/parâmetros	a	b	C
Henderson ($R^2=97,06\%$)			
Valor estimado	2,21	2,43	112,06
Teste-t	3,34	23,89	2,26
Significância	0,002	<0,001	0,03
Halsey ($R^2=98,30\%$)			
Valor estimado	-1,86	-0,015	2,18
Teste-t	-51,30	-6,47	37,64
Oswin ($R^2=98,89\%$)			
Valor estimado	0,18	-0,00217	3,27
Teste-t	41,30	-7,51	42,10
Chung-Pfost ($R^2=98,27\%$)			
Valor estimado	212,17	15,19	13,64
Teste-t	6,33	38,64	3,09

Observando os resultados dos resíduos das equações de Halsey e Oswin, apresentados nas Figuras 4 e 5, verifica-se que a equação de Halsey é mais adequada para determinação da umidade de equilíbrio do arroz em casca, na faixa de temperaturas de 10 a 20°C, pois apresenta uma distribuição aleatória dos resíduos em torno do zero. O mesmo não foi observado nos resíduos obtidos pelo uso da equação de Oswin, conforme apresentado na Figura 5.

Na Figura 6 está mostrado o ajuste da equação de Halsey para os dados experimentais de 10°C e 20 °C

Na Figura 7 está apresentada a superfície de resposta com os dados experimentais de umidade de equilíbrio e a estimativa pela equação de Halsey. Observa-se, nesta figura, a ótima concordância entre os dados experimentais e estimados com a referida isoterma.

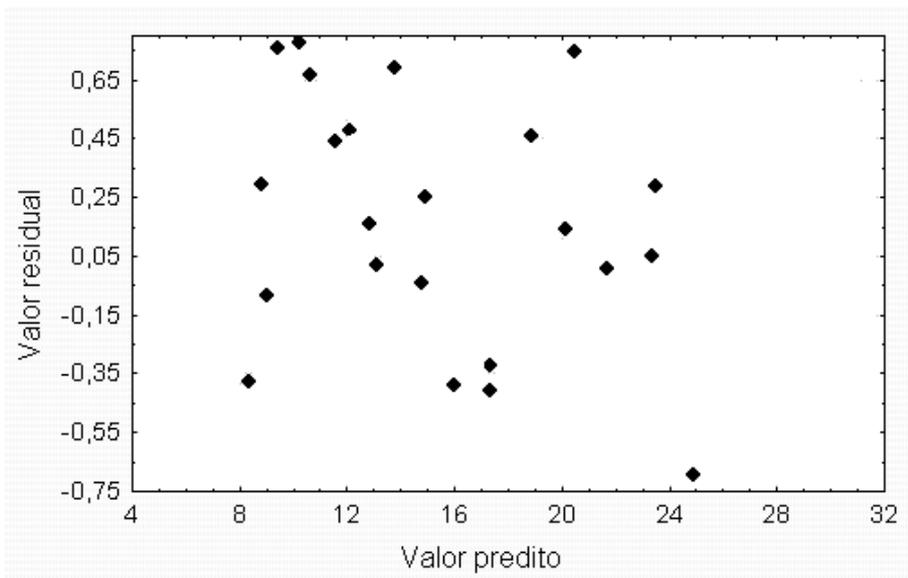


Figura 4. Resíduos da análise da equação de Halsey.

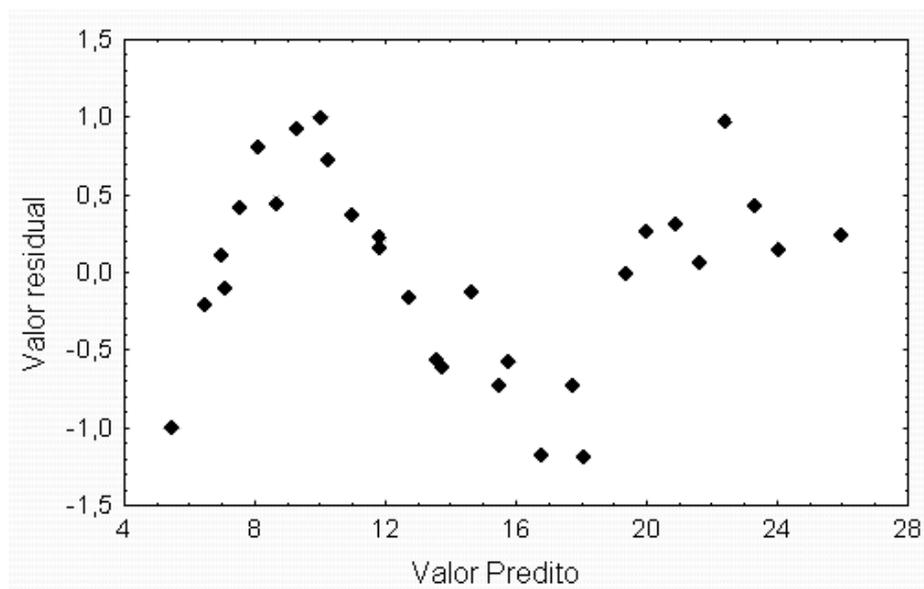


Figura 5. Resíduos da análise da equação de Oswin.

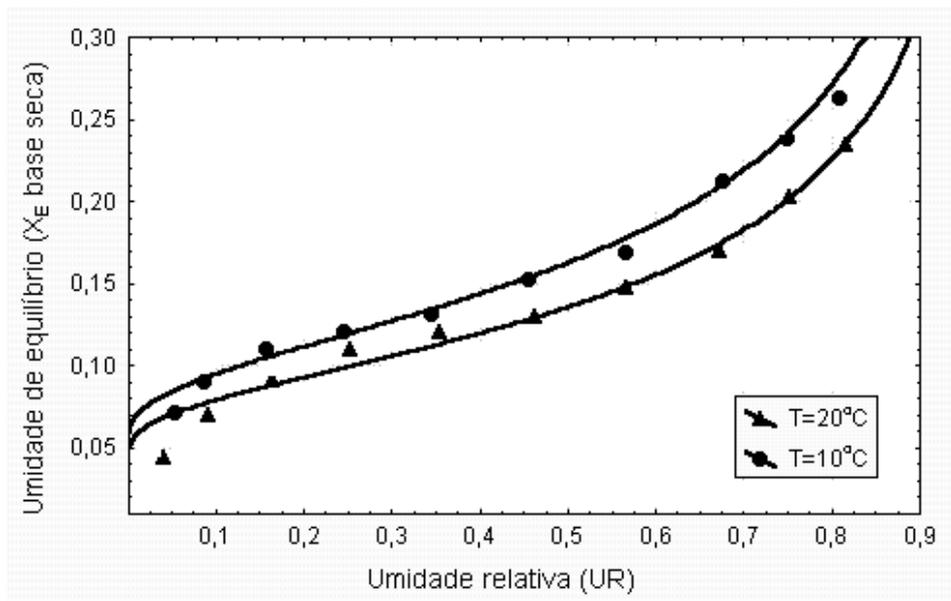


Figura 6. Dados experimentais e equação de Halsey ajustada para umidade de equilíbrio do arroz em casca L-144, sob temperaturas de 10°C e 20°C.

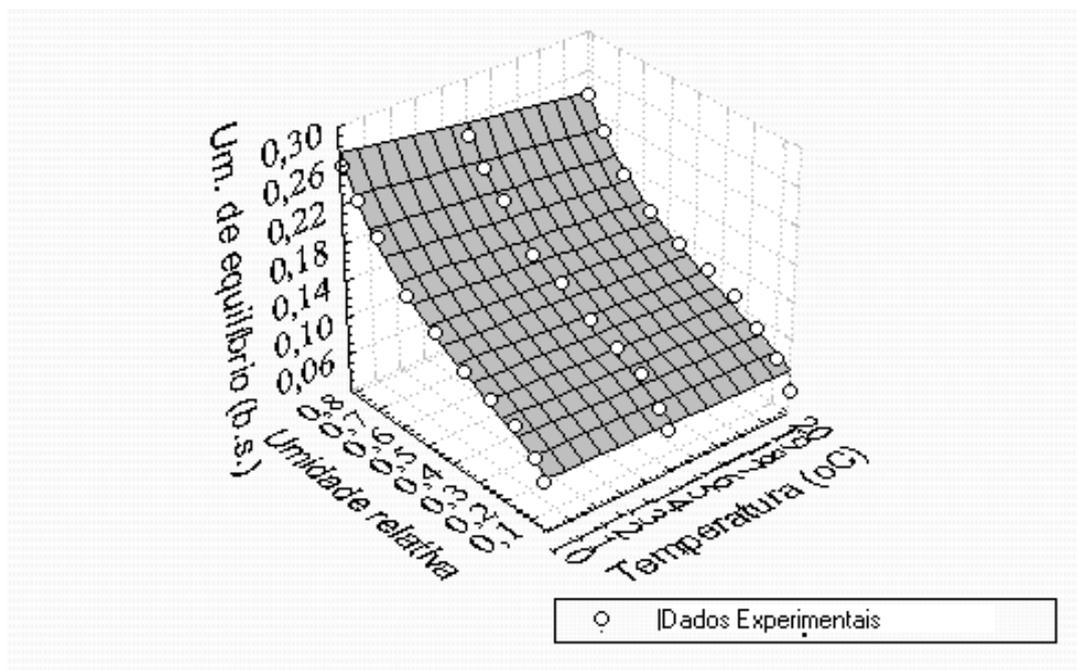


Figura 7. Superfície de resposta da umidade de equilíbrio do arroz em casca L-144, obtida com a utilização da equação de Halsey.

Secagem em silos

A etapa de secagem, utilizando-se os dados obtidos por Ness (1998) para grãos, foi realizada nos primeiros 70 dias, enquanto, no experimento realizado por Porto (2001), para sementes, a mesma etapa foi realizada nos primeiros 140 dias. Os valores estão apresentados nas Figuras 8 e 9.

Pode ser observado, nas Figuras 8 e 9, que houve diferença na redução de umidade das amostras de arroz, nos dois experimentos. Na secagem dos grãos, a redução para um valor abaixo de 15 % ocorreu nos primeiros sete dias, enquanto para as sementes só ocorreu após os primeiros trinta dias. Este comportamento é consequência das diferentes condições climáticas, nos anos em que foram realizados os experimentos de secagem (Figura 10).

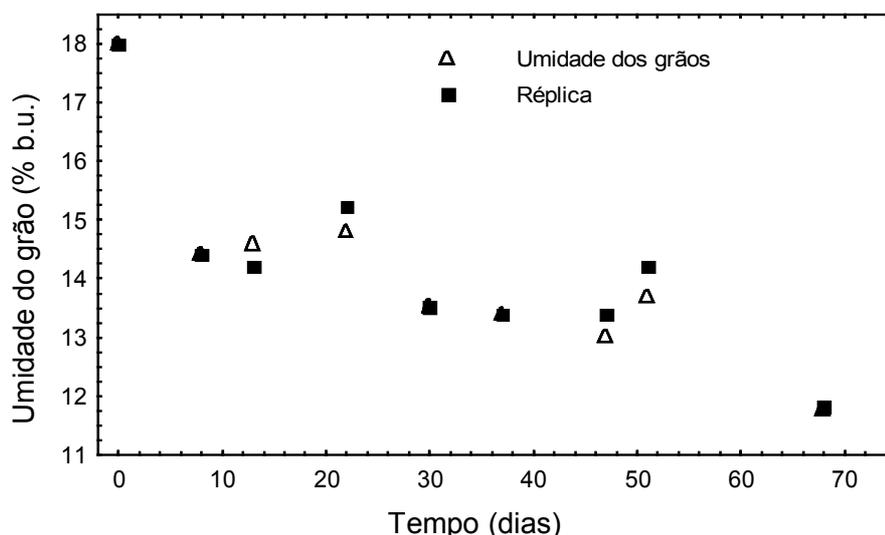
Em determinadas épocas, as condições do ar (umidade relativa e temperatura) proporcionaram umedecimento do arroz, o que explica as flutuações da umidade no

material durante todo o experimento, conforme se pode verificar nas Figuras 8 e 9.

Embora a umidade ideal de armazenagem para sementes seja maior, as condições climáticas no ano de 2000 apresentaram-se diferentes daquelas do experimento realizado em 1997, devido à maior umidade relativa do ar ambiente.

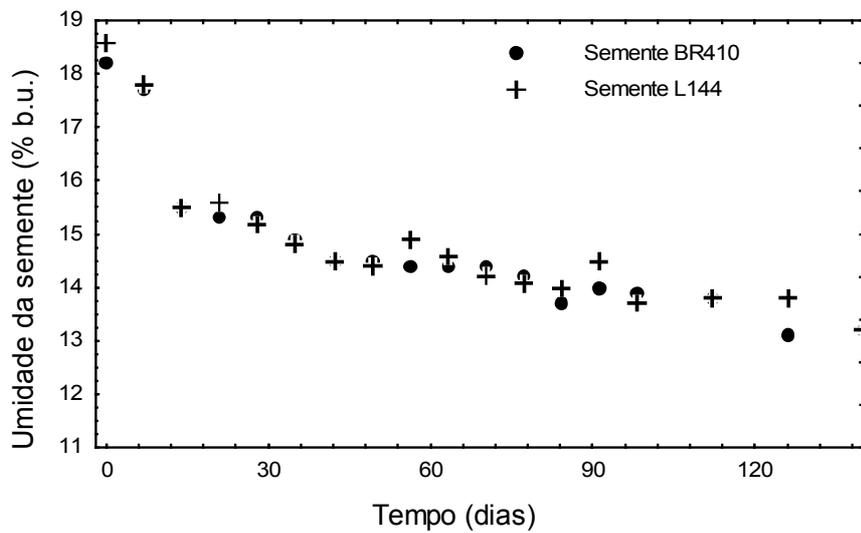
O período restante dos dois experimentos foi considerado de manutenção da umidade do material para armazenagem: considerada adequada $13,0 \pm 0,5\%$ para sementes e $12,0 \pm 0,5\%$ para grãos (base úmida).

Conhecidas as condições do ar, pode-se determinar os valores de umidade de equilíbrio correspondentes, utilizando-se a equação de Halsey. Com estes, são calculados os valores do adimensional de água livre $[(X-X_E)/(X_0-X_E)]$, conforme apresentado na Figura 11, para sementes. Estes valores foram utilizados para ajuste das equações semi-empíricas, apresentadas no Quadro 2, por análise de regressão.



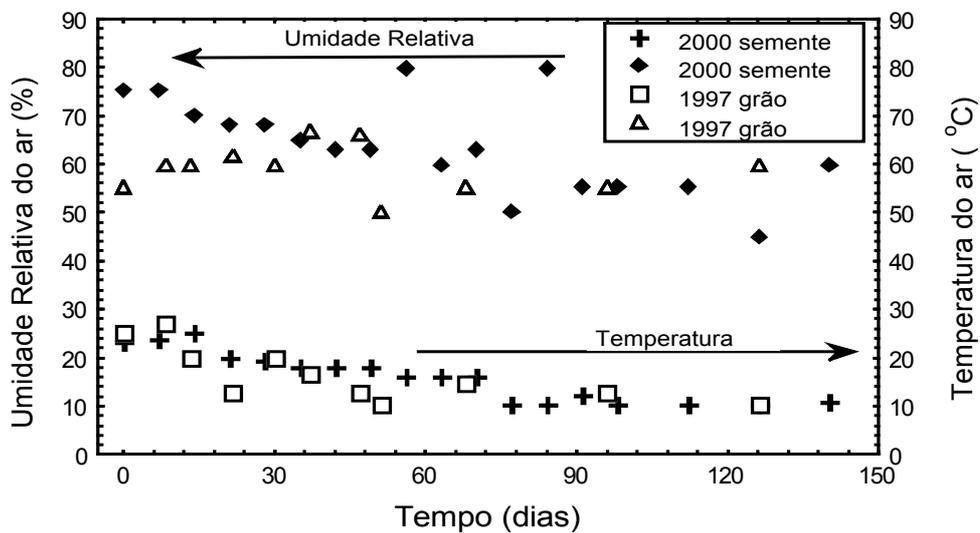
Fonte: Ness (1998)

Figura 8. Curva de umidade dos grãos de arroz com casca da variedade L-144 na secagem em silos (com réplica).



Fonte: Porto (2001)

Figura 9. Curva da umidade de sementes de arroz das variedades L-144 e BR-410 na secagem em silos.



Fonte: Ness (1998) e Porto (2001)

Figura 10. Umidade relativa e temperatura do ar utilizado na secagem e aeração dos silos para grãos e sementes de arroz.

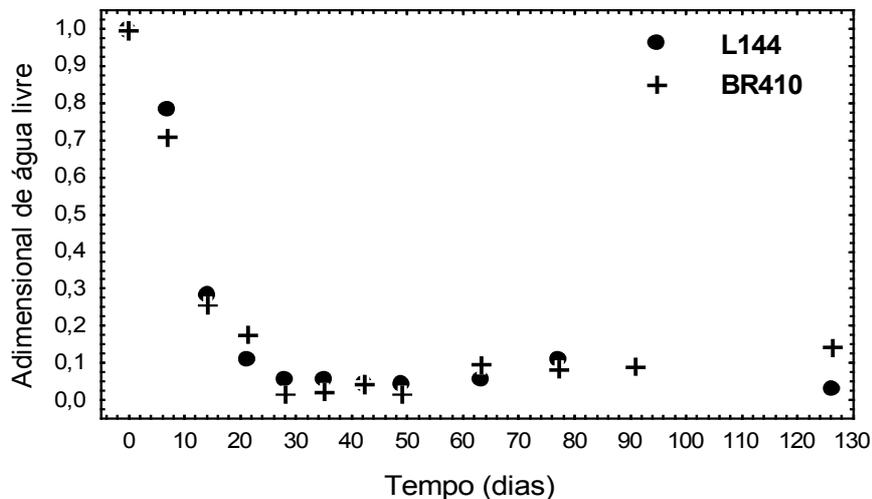


Figura 11. Adimensional de água livre para as sementes de arroz L-144 e BR-410 em função do tempo

No Quadro 6 estão apresentados os resultados das correlações estimadas em todas as equações estudadas, utilizando-se o método dos mínimos quadrados.

No Quadro 6, observa-se o bom ajuste de todas as equações utilizadas aos dados experimentais, considerando-se os valores de coeficiente de determinação (R^2) obtidos.

A análise da distribuição dos resíduos de cada equação foi feita para determinar a qualidade do ajuste. Esses resíduos apresentaram-se aleatórios, em torno do zero, para todas as equações.

A equação de Brooker tem maior significado físico quanto à interpretação, pois, pode ser vista como uma simplificação da solução analítica do modelo difusivo para longos tempos de secagem, em que

somente o primeiro termo da série é considerado. Dessa forma, a constante de secagem K pode ser utilizada para determinação do parâmetro físico difusividade efetiva de umidade.

A avaliação da qualidade dos parâmetros determinados para a equação de Brooker está mostrada no Quadro 7, por meio do teste-t de Student, uma vez que todos os parâmetros da equação mostraram-se significativos ($p < 0,001$).

No Quadro 7, nota-se que os parâmetros da equação apresentaram boa qualidade, sendo a equação de Brooker adequada para descrever o comportamento dos dados experimentais. Nas Figuras 12, 13 e 14 estão mostrados os ajustes do modelo de Brooker nas curvas de secagem.

Quadro 6. Coeficientes de determinação obtidos para as equações ajustadas

Equação	L-144G	L-144S	BR-410S
Brooker	99,37%	97,11%	96,83%
Henderson & Henderson	99,35%	96,47%	96,35%
Lewis	99,37%	96,91%	96,73%
Overhults	99,37%	98,76%	97,66%
Page	99,37%	98,76%	97,66%

Quadro 7. Qualidade de parâmetros estimados para a equação de Brooker

Equação/Parâmetros	K (min ⁻¹)	C
L144 Grão		
Brooker	0,125	1,001
Teste t	16,22	34,37
L144 Semente		
Brooker	0,077	1,540
Teste t	11,90	4,92
BR410 Semente		
Brooker	0,080	1,062
Teste t	13,86	7,90

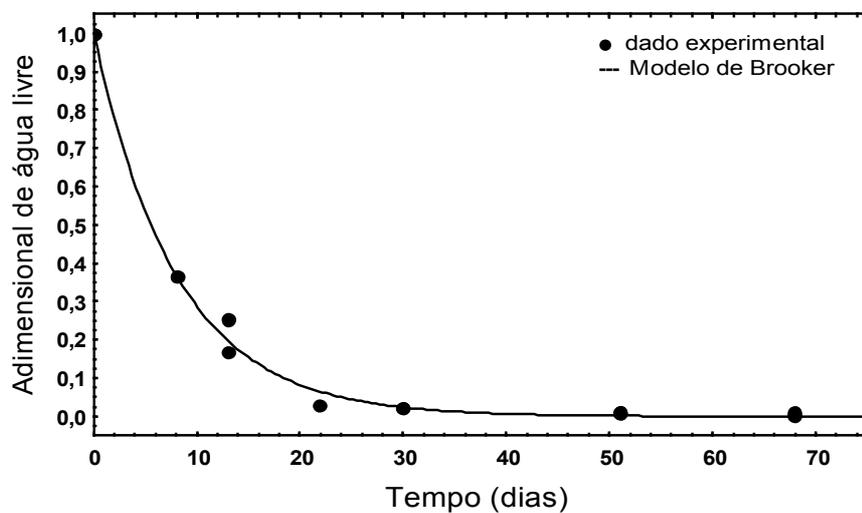


Figura 12. Ajuste do modelo de Brooker para secagem de grãos de arroz L-144.

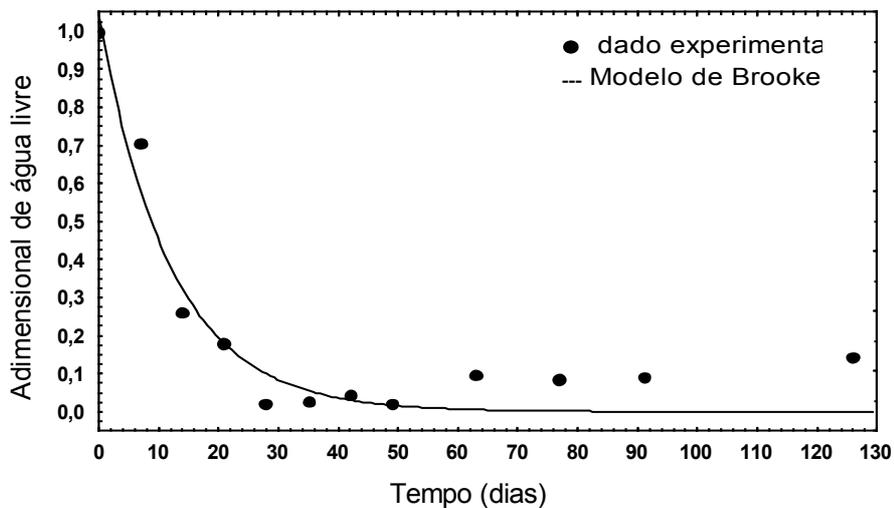


Figura 13. Ajuste do modelo de Brooker para secagem de sementes de arroz L-144.

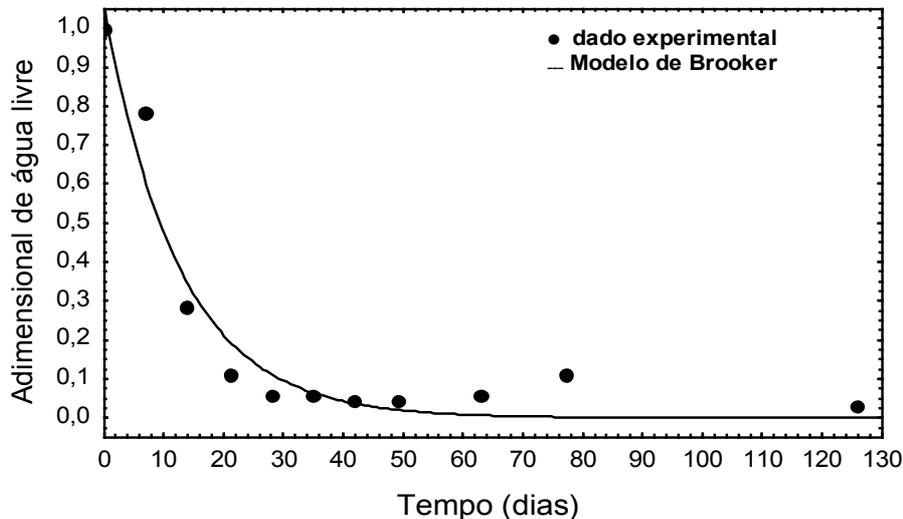


Figura 14. Ajuste do modelo de Brooker para secagem de sementes de arroz BR-410.

CONCLUSÕES

As isotermas de equilíbrio para arroz em casca da variedade “El Passo” L-144, na faixa de temperatura de 10 a 20°C, foram melhor representadas pela equação de Halsey, por esta apresentar alto coeficiente de determinação ($R^2 > 98\%$), boa qualidade dos parâmetros (altos valores do teste-t de Student) e distribuição de resíduos aleatória.

Todas as equações de secagem de grãos ajustaram-se bem aos dados experimentais obtidos da secagem de arroz em casca em silos de armazenagem. A equação de Brooker, por apresentar uma forma análoga à solução do modelo difusivo para longos tempos de secagem, deve ser utilizada para estimativa da secagem de arroz em casca da variedade L-144.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, T.; BASUNIA, M. A. Simulation of temperature and moisture changes during storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.65, p.223-233, 1996.

AOAC Official Methods of Analysis (14^a ed) Washington, DC: **Associates of Official Analytical Chemists**, 1995.

ASAE D245.4, Moisture relationship of grains, **ASAE Standarts** (42nd ed.) MI, USA: St. Joseph, 1995.

ASAE, Equilibrium moisture content equations and constants, **ASAE Standarts**, MI, USA: St. Joseph, 1988.

AUGUSTO RUIZ, W. & NESS, A. R. Qualidade do arroz em casca seco e armazenado em mini silos metálicos em aeração controlada. **Engenharia na Agricultura**, v.9, n.1, Viçosa, p. 35-54, Jan./Mar., 2001.

BARROZO, M. A. de S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. da . **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos: UFSCar 1998, cap. 4, p. 119-159.

BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough

- rice. **Journal of Stored Products Research**, v.37, p. 205-219, 2001. (a)
- BASUNIA, M. A.; ABE, T. Thin-Layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. **Journal of Food Engineering**, v.47, p. 295-301, 2001. (b)
- BONIFÁCIO, W; BARROZO, M.A.; SARTORI, D.J.M. Isothermas de umidade de equilibrio para soja. In: XXI Encontro sobre escoamento em meios porosos. Ouro Preto, MG. **Anais... UFMG**, Vol II, pp 443-453, 1993.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. & HALL, C. W. **The drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, Avi Book, 1992.
- CHEN, C.; WU, P., Thin layer drying model for rough rice with high moisture content, **Journal of Agricultural Engineering Research**. v.80, n.1, p.45-52, 2001.
- FORTES M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grain. In: MUJUMDAR, A. **Advances in Drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation v.1 p. 119-154, 1980.
- GASTÓN, A. L.; ABALONE, R. M.; GINER, S. A. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. **Journal of Food Engineering**, v.52, p. 313-322, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa>> Acessado em 27 jan. 2003.
- NESS, A. R. R. **Qualidade do arroz em casca, seco e armazenado em silos metálicos com aeração controlada**, 1998, 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Rio Grande.
- PERRY, R. H. & CHILTON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook**, McGraw-Hill Co., 5 ed., Sec. 20-4. 1983.
- PORTO, A. G. **Avaliação da qualidade de sementes de arroz (Oriza sativa L.) secas e armazenadas em silos metálicos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- RUMSEY, T. R.; ROVEDO, C. O. Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying. **Chemical Engineering and Processing**. V. 40, p. 355-362, 2001.