

INFLUÊNCIAS DE VARIÁVEIS DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA SECAGEM ARTIFICIAL DE GRÃOS DETERMINADAS POR MODELAGEM MATEMÁTICA

Benjamim Zucolotto

Prof. Co-orientador(a) Dr^a. Fabiane Avena de Oliveira

Prof. Orientador Dr. Oleg Khatchatourian

RESUMO: Este artigo apresenta um estudo experimental de secagem de grãos visando a otimização do processo de secagem, que deve ser rápido, eficiente, seguro e econômico. Para atender tais exigências é fundamental conhecer e monitorar os fenômenos físicos presentes no processo de secagem de secadores industriais e neste sentido, a modelagem matemática associada a resultados experimentais é uma alternativa eficiente e de baixo custo. Para isto, realizou-se um estudo experimental construindo curvas de secagem de grãos de soja utilizando o método de secagem em camadas finas através do controle do fluxo de ar (velocidade), da umidade relativa dos grãos, da temperatura e umidade do ar de secagem. A análise das curvas de secagem mostrou que, diferentes velocidades do ar, produzem influências distintas sobre as curvas. Os dados experimentais de secagem de soja foram ajustados utilizando um ajuste exponencial, que é um dos ajustes mais frequentes na simulação do processo de secagem de produtos agrícolas. Através do método dos mínimos quadrados determinou-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2). Como resultados foram obtidas curvas de ajuste com R^2 superior a 0,99. A magnitude do coeficiente de determinação do modelo matemático utilizado neste ajuste mostrou a eficácia deste modelo para descrever uma representação satisfatória do fenômeno de secagem.

Apoio: CNPq.

Palavras-chave: Armazenamento de Grãos; Modelagem Matemática; Secagem de Grãos.

INTRODUÇÃO

O cultivo da soja é uma das principais atividades econômicas do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, o qual é produzido em grandes quantidades necessitando ser estocado por longos períodos de tempo. O clima da região e o estado físico do grão na época da colheita proporcionam um produto com umidade acima do recomendado para armazenamento. O teor de água adequado se situa na faixa de 10% a 13% para que seja mantida a duração e a qualidade biológica, química e física dos grãos minimizando as perdas pós-colheita por pragas e fungos, que se utilizam de ambientes assim para de proliferar. Para tanto, faz-se necessário realizar o processo de secagem.

A umidade no grão é a quantidade de moléculas de água que se encontram ligada às diversas partes dele. Weber (2005) apresenta três formas e locais distintos em que a água se encontra nos grãos: a umidade superficial seria a água líquida que se encontra na parte externa do grão, de fácil remoção; a umidade intersticial é a umidade livre no interior do grão e encontra-se em poros, onde a água é removida de forma relativamente fácil e a umidade de

constituição, está relacionada aos componentes dos grãos e localiza-se nas células, representando entre 8% e 10% do total de umidade do grão. No processo de secagem, a umidade de constituição não é removida, apenas a superficial e a intersticial.

Há um processo de secagem de grão que utiliza o ar como meio de conduzir o calor e transferir o excesso de água do grão para a atmosfera, baseia-se no decréscimo de sua umidade através do aumento da temperatura do ar de secagem, capaz de absorver a umidade disponível do grão. Segundo Cassini (2004), quando um sólido úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente: transferência de energia, que na maioria das vezes ocorre sob forma de calor, do meio ambiente para evaporar a umidade presente na superfície do produto e transferência da umidade interna até a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devido ao processo anterior. Como resultado se tem a separação parcial entre a matéria sólida e a água contida no grão.

O processo de secagem pode ser dividido em períodos distintos onde a velocidade do ar de secagem é constante e decrescente. Segundo Carvalho (1994) apud Sartori (2001), a água evaporada dos grãos é removida através do fluxo de ar, que tem sua temperatura e umidade relativa modificada durante o processo. Com isso, no decorrer da secagem, ao se afastar do ponto de entrada da massa de grãos, o ar passa a retirar a umidade dos grãos e a ceder calor para os mesmos. Consequentemente, o ar fica com uma umidade excessiva (satura) e calor insuficiente para continuar a retirar umidade dos grãos.

Como o ar continua a ser introduzido, o ponto de insuficiência para secagem avança constantemente até atravessar toda a massa de grãos. O deslocamento deste ponto é determinado pelo fluxo de ar, não obstante, quanto maior o fluxo de ar, mais rápido acontece a secagem (CARVALHO, 1994).

Quando o ponto de insuficiência atravessar a massa do produto, a temperatura dos grãos mantém-se igual à do ar de secagem saturado, com isso, o ar recupera, sob forma de vapor, o que perdeu sob forma de calor, portanto, neste momento as transferências de calor e massa compensam-se. Logo, a velocidade do ar sendo decrescente, a transferência de calor não é compensada pelo vapor de água, pois a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação, aumentando a temperatura do grão até alcançar a do ar de secagem (BROOKER et al., 1992).

O processo de secagem de soja deve ser rápido (o fluxo de entrega dos grãos nas unidades receptoras não pode ser interrompido), eficiente (uma quantidade prescrita de água

precisa ser retirada para que o grão atinja o teor de água adequado para o armazenamento), seguro (o grão não pode sofrer danos que prejudiquem sua finalidade futura) e econômico (mínimo custo operacional).

Para atender tais exigências é fundamental conhecer e monitorar fenômenos físicos existentes durante o processo de secagem e, considerando a importância deste, o proposto trabalho tem os seguintes objetivos:

- Determinar a influência da temperatura, da velocidade e da umidade do ar de secagem no processo de secagem de soja em camada fina através de experimentos;

- Desenvolver um modelo matemático que descreva o processo de secagem da soja em secador de leito fixo;

- Realizar simulações numéricas e comparar os dados experimentais com os obtidos através do modelo matemático, determinando a influência dos diversos parâmetros que envolvem o processo de secagem da soja;

- Repetir os experimentos para outros grãos (milho e aveia).

O modelo de secagem de grãos utilizado como base neste trabalho é o adaptado em Khatchatourian et al. (1999) que aprimoraram um modelo matemático baseado nas leis de conservação de energia e massa, porém tornou-se necessário conhecer as dependências dos fluxos de massa Φ_m e de calor Φ_h dos parâmetros principais do processo de secagem (temperatura e teor de umidade do grão, temperatura e umidade do ar, os valores do teor de umidade do grão para as condições de equilíbrio, grau de porosidade, velocidade do ar, etc.).

Para tanto, pretendemos realizar experimentos de secagem em camadas finas e a principal análise dar-se-á através da variação do teor de umidade do ar de secagem, porém, também variaremos a umidade inicial dos grãos e a velocidade do ar de secagem.

A velocidade do ar durante a secagem será sempre constante, sendo os grãos previamente aquecidos à temperatura de secagem, sem perda de umidade, pois, como já foi dito, deste modo as transferências de calor e massa compensam-se e o processo de secagem se torna mais eficiente.

A secagem em camada fina foi escolhida pelo fato de ser de fácil realização experimental em laboratório, neste processo a massa dos grãos está uniformemente condicionada, ou seja, a temperatura e o teor de umidade dos grãos e do ar são igualmente distribuídas durante todo o tempo do processo e em todo o volume. A equação matemática

que descreve o processo de secagem em camada fina, auxilia nos cálculos e entendimento dos processos de secagem de camada espessa.

MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da análise das curvas de secagem é possível mostrar que as diferentes velocidades do ar influenciam estas curvas de maneira distinta. Pôde-se concluir que, para teores de umidade inicial do grão mais altos, as curvas de secagem dependem da velocidade do ar e variam consideravelmente no início do processo de secagem. Para teores de umidade inicial do grão menores, a influência da velocidade do ar é menor e passado um determinado tempo do início da secagem, as curvas tendem a estabilizar-se para uma mesma parábola (ZUCOLOTTO, 2008).

Porém, observou-se a necessidade de um controle mais preciso na temperatura de secagem e o estudo da variação do teor de umidade do ar de secagem, sendo este o principal objetivo já que dados experimentais considerando esta variável são difíceis de serem encontrados na literatura.

A variação da velocidade do ar de secagem e da umidade inicial dos grãos foi mantida e acrescentamos variação da umidade do ar de secagem. Para isso se fez necessário uma série de experimentos que foram organizados através de gráficos para futuras análises. As condições de base para a realização dos experimentos da proposta inicial foram reorganizadas de forma a favorecer as condições impostas pelo equipamento e um exame com minúcia.

Xg = 16%	Usec = 12%	Vel.=0,12m/s – 0,49m/s – 0,8m/s – 1m/s
	Usec = 20%	
	Usec = 30%	Vel.=0,12m/s – 0,37m/s – 0,49m/s – 0,8m/s
Xg = 23%	Usec = 12%	Vel.=0,12m/s – 0,49m/s – 0,8m/s – 1m/s
	Usec = 20%	
	Usec = 30%	Vel.=0,12m/s – 0,37m/s – 0,49m/s – 0,8m/s

Tabela 01: Condições de base para realização dos experimentos (Xg, umidade inicial dos grãos; Usec, umidade do ar de secagem; Vel., velocidade do ar de secagem).

Criação da bancada

Para realizar este estudo foi desenvolvido, testado e aferido uma bancada capaz controlar a velocidade, e temperatura e umidade do ar de secagem. Um sistema gerador de vapor introduz umidade no ar de secagem, outro verifica a medição desta. Potenciômetros em

série à resistências elétricas tornam a temperatura de secagem mais precisa (variação de $\pm 1^{\circ}\text{C}$).

A bancada possui um pequeno declive em direção à curva onde se encontra um orifício para escoar a água que condensada nas paredes da tubulação, o orifício está conectado a um reservatório para armazenar a água, ele não tem abertura para a parte externa para não ocorrerem perdas na velocidade do ar.

O sistema gerador de vapor está conectado a bancada por uma mangueira de metal que resiste a altas temperaturas, o qual permanentemente fica ligado para sempre se ter vapor controlado. Este sistema funciona como uma panela de pressão, pois se coloca água dentro de um recipiente, aquece-se o mesmo para ocorrer a ebulição da água, o vapor gerado desta ebulição é transferido até o sistema para umedecer o ar. Existe uma válvula de escape para caso a pressão se torne muito alta dentro do recipiente e outra para controlar a vazão do vapor ao sistema.

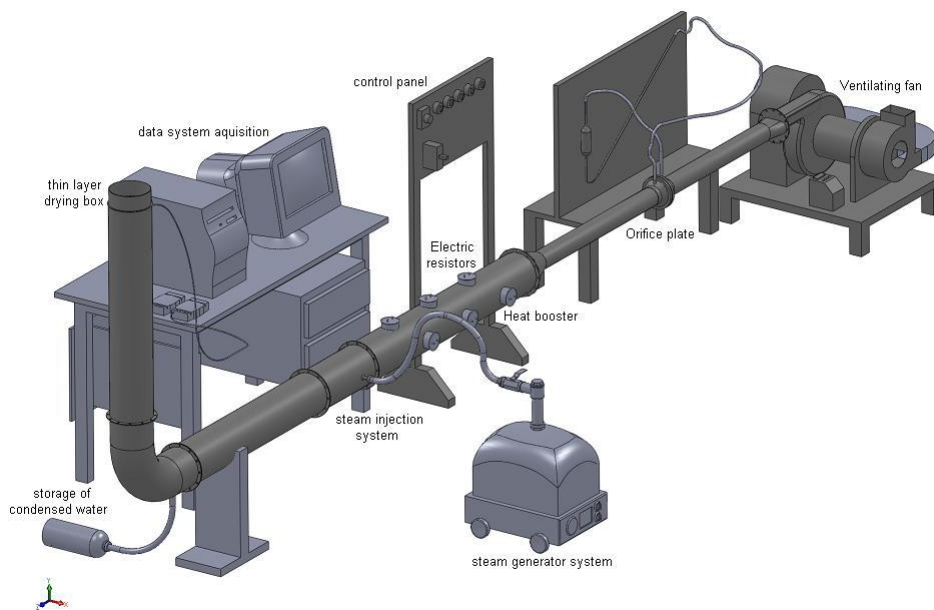


Fig. 01: Ilustração do esquema do sistema de secagem.

Para determinar a velocidade do ar utilizamos uma placa de orifício com um manômetro tipo U, tendo como líquido manométrico a água. Um dos ramos do tubo em U foi inclinado 30° em relação à horizontal, permitindo uma melhor precisão na leitura da diferença de pressão. Essa diferença de pressão exercida sobre a coluna de água permite calcular a velocidade média do fluxo de ar.

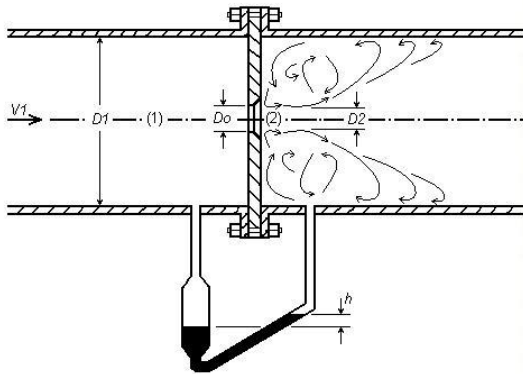


Fig. 03: Esquema do diafragma.

Segundo Streeter (1980), para determinar a vazão em casos como este, usa-se geralmente uma equação simplificada:

(5)

onde:

- = vazão (m^3/s);
- = coeficiente da placa;
- = área do orifício da placa (m^2);
- = variação de pressão (N/m^2);
- = massa específica do fluido (kg/m^3).

O valor do coeficiente C varia conforme a velocidade, mas para o intervalo de velocidades utilizadas neste trabalho consideramos (TONIAZZO, 1997). Deste modo, conseguimos realizar a secagem dos grãos impondo diferentes velocidades do ar, conhecidas.

Ao construir a bancada tivemos um cuidado especial em detalhes significantes, com manejo e desenvoltura do bolsista podemos nos certificar de que realizamos um trabalho de

qualidade capaz de atender perfeitamente as necessidades da pesquisa. Foram realizados diversos testes e percebeu-se que o controle das variáveis está dentro dos padrões exigidos.

Condicionamento de amostras de grãos em saches com umidade predeterminada

Para a realização dos experimentos utilizamos amostras de grãos com 16% e 23% de umidade, Xbu (teor de umidade em base úmida), porém, o período do ano em que realizamos a coleta não favoreceu para que encontrássemos grãos com a umidade específica, se tornando indispensável o umedecimento em laboratório.

Primeiramente, espalhamos os grãos em uma superfície plana com uma espessura de no máximo dois grãos. Utilizando água da chuva os molhamos homoganeamente, porém não deixando encharcar para não se alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos grãos. Retiramos algumas amostras, umas, levamos a um laboratório de controle rígido para medir a umidade dos grãos e outras separamos, as quais agora conhecemos o Xbu (considerando ser o mesmo Xbu das amostras que o laboratório mediu).

A umidade mediada inicialmente foi dos exatos 23%, logo, realizamos a embalagem de diversos saches cuidado para ficar o mínimo de ar no interior de cada sache e para que tivessem uma ótima vedação. Em cada sache colocamos aproximadamente 200 gramas de grãos e estes eram acondicionados em um refrigerador, estando prontos para serem utilizados.

As amostras separadas inicialmente foram utilizadas para saber a umidade do restante dos grãos. Conhecido o percentual de umidade da amostra, calculamos a massa total que os grãos deveriam atingir para que tivessem a umidade de 16%, considerando que a perda de massa ocorre-se somente pela evaporação da água. Quando se atingiu a umidade prescrita realizamos o mesmo processo de embalagem e armazenagem anteriormente. Terminando este processo, possuíamos amostras com umidade adequada para a realização dos experimentos (16% e 23%).



Fig. 04: Amostra de grãos de soja.

Realização dos experimentos de secagem de grãos utilizando o sistema de camadas finas

Iniciávamos aquecendo previamente os grãos até atingirem uma temperatura uniforme a qual seria realizado o experimento, para isso dispunha-se de uma estufa modelo NBR 11378 onde eram posto com a embalagem para não ocorrer perda de umidade.

Durante o aquecimento da amostra utilizávamos uma camada fina de grãos somente como teste para estabilizar a velocidade, temperatura e umidade do ar de secagem na bancada. O tempo de permanência do sachê na estufa era de 45 minutos para que os grãos ficassem com temperatura homogênea. Quando essas duas etapas estavam prontas iniciávamos o processo de secagem.

Após o decorrido tempo de pré-aquecimento, colocávamos na grade de secagem (suporte móvel que recebe o ar de secagem em sua base) e a partir deste momento realizávamos uma pesagem a cada 5 minutos para podermos construir as curvas de secagem.

Conforme o tempo se passava a massa total diminuía devido à evaporação da água. A umidade era calculada através da seguinte interpretação:

- Sabemos a massa total (Mt) inicial e o percentual de umidade deste montante, com isso calculamos a massa de água (Ma) e a massa da matéria seca (Ms), onde U é o teor de umidade do grão:

(6)

(7)

- Durante o processo de secagem, para qualquer momento, utilizamos os dados iniciais para determinar a massa de água da nova massa total, onde M_{ti} é a massa total inicial:

(8)

- Para análises futuras, calculamos o teor de umidade em base seca (X_{bs}) que é expresso como sendo a razão entre M_a presente no grão e M_s :

(9)

- O teor de umidade de equilíbrio da soja (X_e) era calculado para cada condição de umidade relativa de ar, de acordo com Dalpascoale (1981):

(10)

onde:

RUs : umidade relativa do ar de secagem (percentagem);

T_s : temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$).

- Tendo-se os teores de umidade, 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:

(11)

onde:

X_o : teor de umidade em base seca inicial (percentagem).

Deste modo, construímos gráficos da curva de secagem estabelecendo uma relação RU x Tempo para experimentos de secagem utilizando grãos com 0,16 e 0,23 de umidade, velocidades do ar de secagem de 0m/s até 1m/s, e umidade do ar de secagem de 12%, 20% e 30%, com a temperatura de secagem $70^{\circ}C$.

Os dados experimentais de secagem de soja foram ajustados utilizando um ajuste exponencial conhecido como “Page”, que é um dos ajustes mais freqüentes na simulação do processo de secagem de produtos agrícolas.

(12)

onde:

RU = razão de umidade (adimensional);

, = coeficientes de ajustes do modelo;

t = tempo de secagem.

Para o ajuste do modelo utilizou-se o método Procura em Rede. Através do método dos Mínimos Quadrados determinou-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), que auxilia na percepção da eficácia do modelo.

Após ajustado cada curva de secagem realizamos uma análise dos coeficientes dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados todos os experimentos de secagem de soja propostos e algumas conclusões obtidas no trabalho anterior se confirmaram.

Observa-se nos gráficos de dados experimentais a seguir que a queda de umidade possui um limite, a partir de certo ponto a curva que demonstra o decrescimento da umidade tende estabilizar-se a uma umidade mínima.

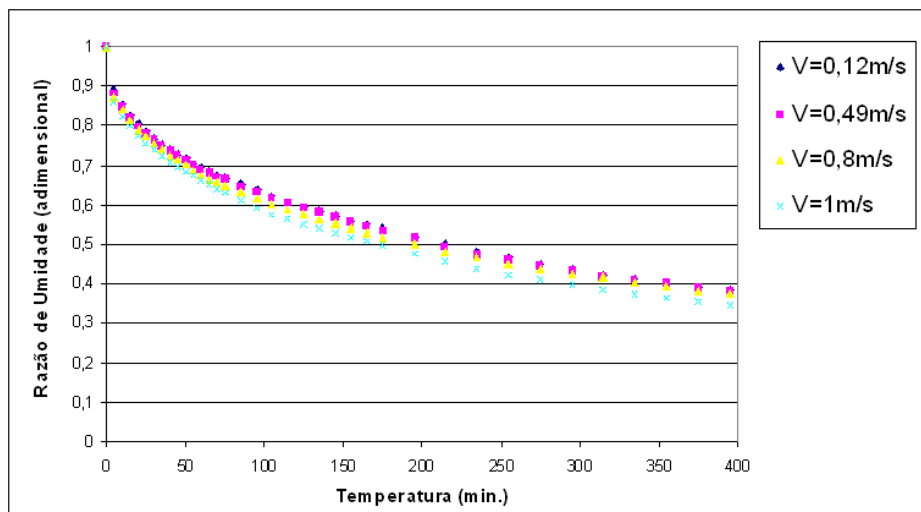


Gráfico 01: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=12\%$.

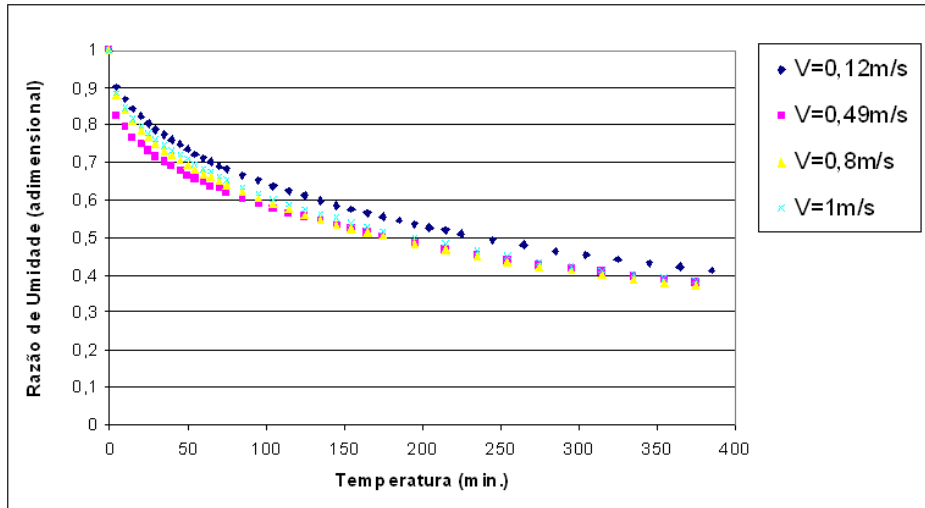


Gráfico 02: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=20\%$.

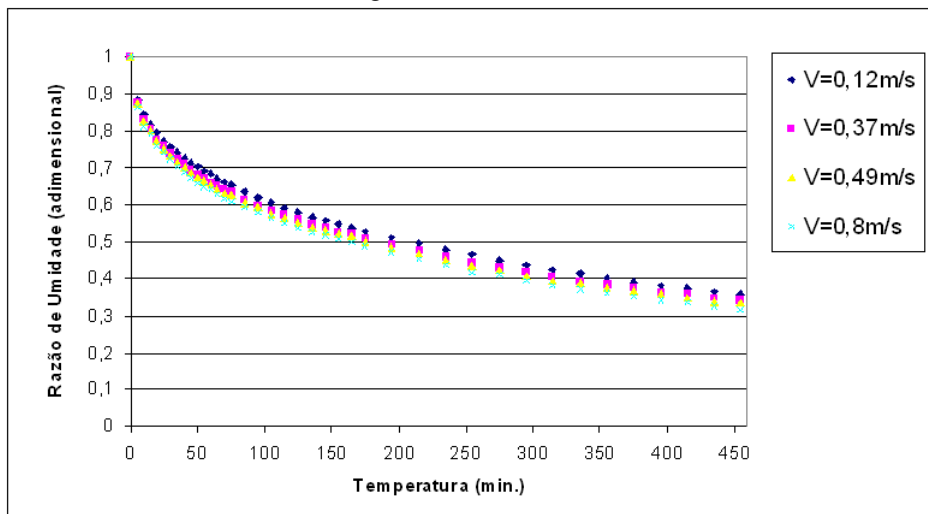


Gráfico 03: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=30\%$.

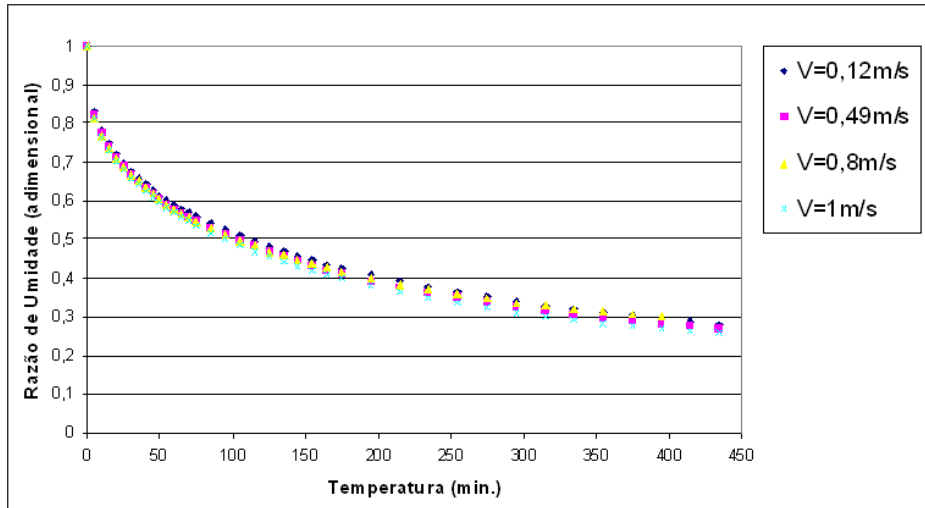


Gráfico 04: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=23\%$ e $U_{sec}=12\%$.

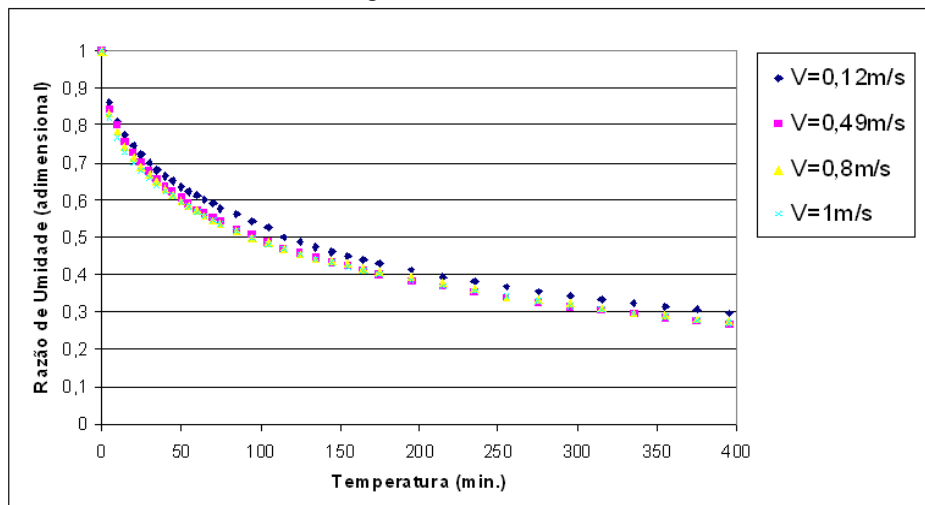


Gráfico 05: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=23\%$ e $U_{sec}=20\%$.

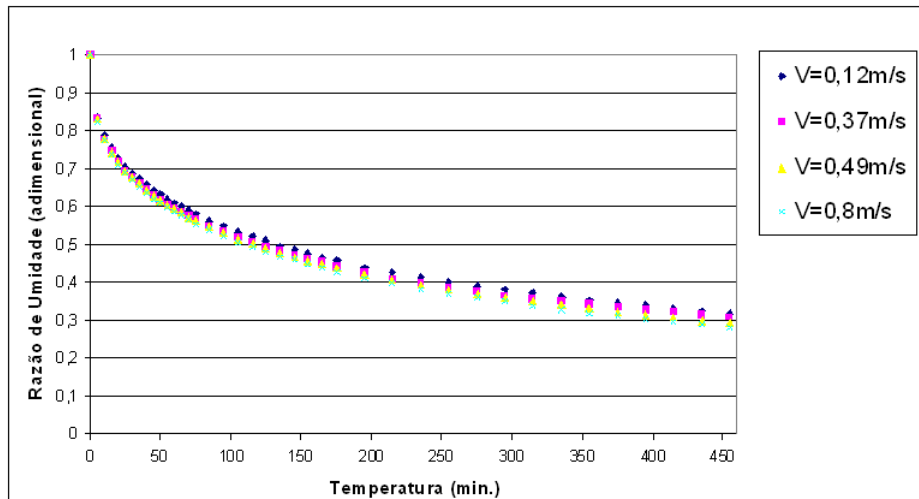


Gráfico 06: Dinâmica da secagem de soja para diferentes valores da velocidade do ar de secagem, considerando $X_g=23\%$ e $U_{sec}=30\%$.

Observa-se nos gráficos anteriores que as curvas de secagem tendem se estabilizar para uma mesma parábola, sem necessidades de continuar o processo de secagem, pois se atinge umidade próxima da de constituição.

CARVALHO (1994) apud Sartori (2001) defende que, quanto maior o fluxo de ar mais rápido acontece a secagem, porém, ao se aplicar este conhecimento científico e empírico à criação de dispositivos e processos de secagem é inevitável atenção ao atendimento das necessidades (rápido, eficiente, seguro e **econômico**), pois, velocidade do ar de secagem elevada não é sinônimo de tempo reduzido no final do processo de secagem. Inicialmente as curvas de secagem são diferenciadas pela velocidade de secagem, diferença que aumenta ao elevar a umidade inicial dos grãos, mas para velocidades de ar elevadas a diferença entre as curvas reduz consideravelmente, com isso, não adianta a velocidade do ar ser muito grande sendo que o importante é haver o fluxo de ar para ocorrer a secagem.

Para quatro velocidades do ar de secagem e três umidades iniciais dos grãos com $X_g=16\%$ ajustou-se o modelo de Page. Observa-se que os ajustes destes dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superior a 98% (Gráficos 07, 08, 09), o que indica uma representação satisfatória do fenômeno de secagem (MADAMBA et al., 1996).

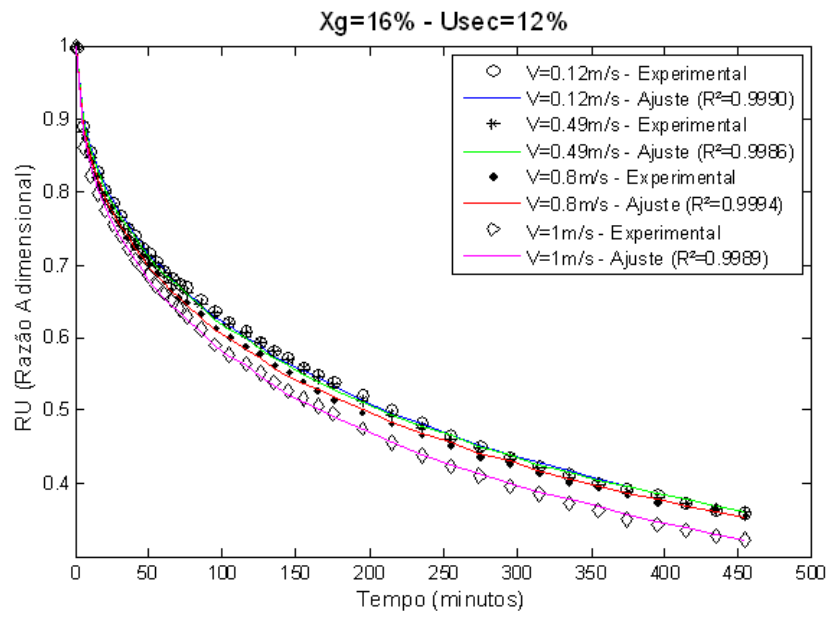


Gráfico 07: Dinâmica da secagem de soja e seus respectivos ajustes de curvas, considerando Xg=16% e Usec=12%.

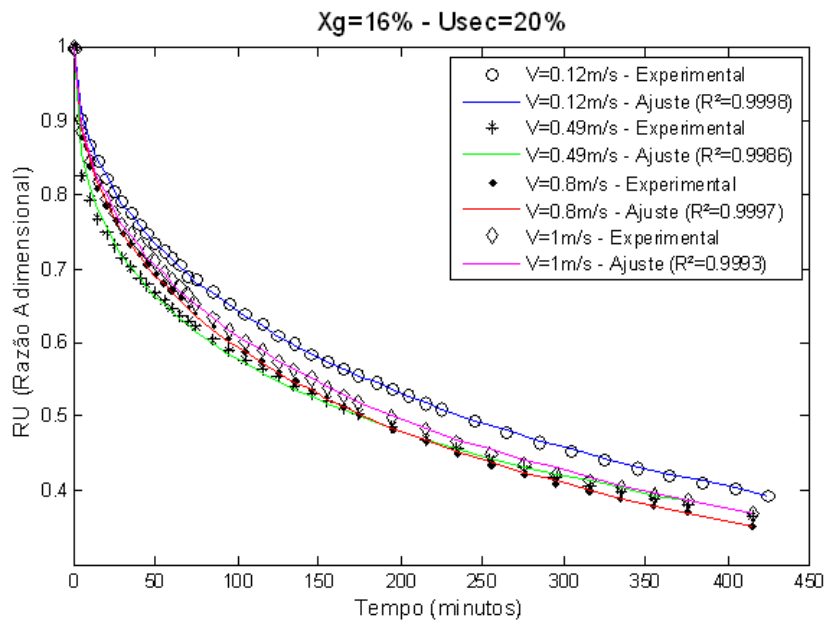


Gráfico 08: Dinâmica da secagem de soja e seus respectivos ajustes de curvas, considerando Xg=16% e Usec=20%.

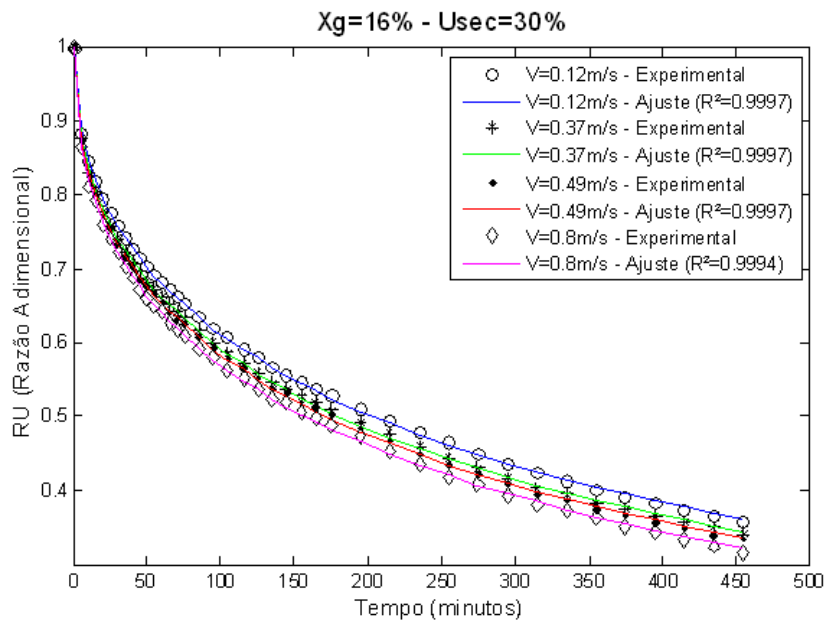


Gráfico 09: Dinâmica da secagem de soja e seus respectivos ajustes de curvas, considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=30\%$.

Na tabela 02, encontram-se os coeficientes de ajustes do modelo de Page para as curvas de secagem de grãos com $X_g=16\%$.

Usec = 12%				
Vel. do ar (m/s)	0,12	0,49	0,8	1
Z_1	0,0464	0,0485	0,0551	0,0577
Z_2	0,5049	0,4980	0,4802	0,4861
Usec = 20%				
Vel. do ar (m/s)	0,12	0,49	0,8	1
Z_1	0,0409	0,0803	0,054	0,0513
Z_2	0,5170	0,4176	0,492	0,4925
Usec = 30%				
Vel. do ar (m/s)	0,12	0,37	0,49	0,8
Z_1	0,0541	0,0611	0,0638	0,0685
Z_2	0,4798	0,4674	0,4636	0,4582

Tabela 02: Coeficientes de ajustes do modelo para secagem de grãos com umidade inicial de 16%.

Num segundo ajuste, os coeficientes Z_1 e Z_2 foram ajustados para diferentes velocidades do ar de secagem.

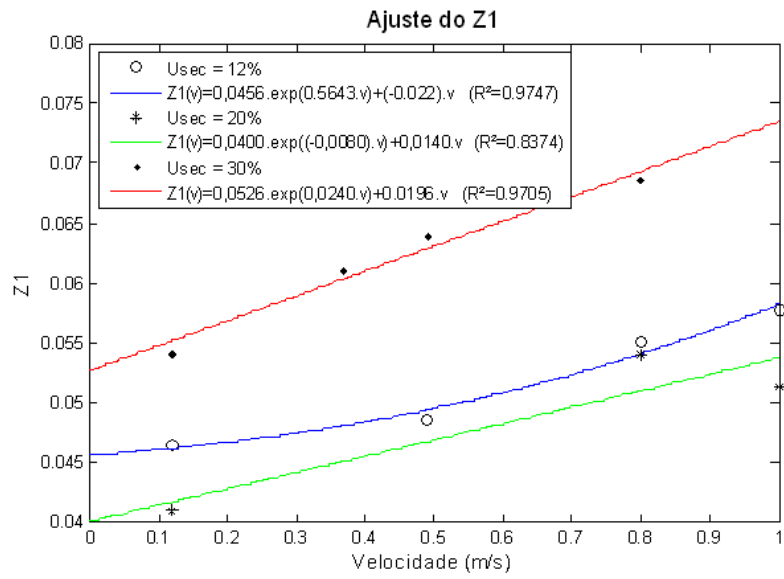


Gráfico 10: Ajuste do coeficiente Z_1 , considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=30\%$.

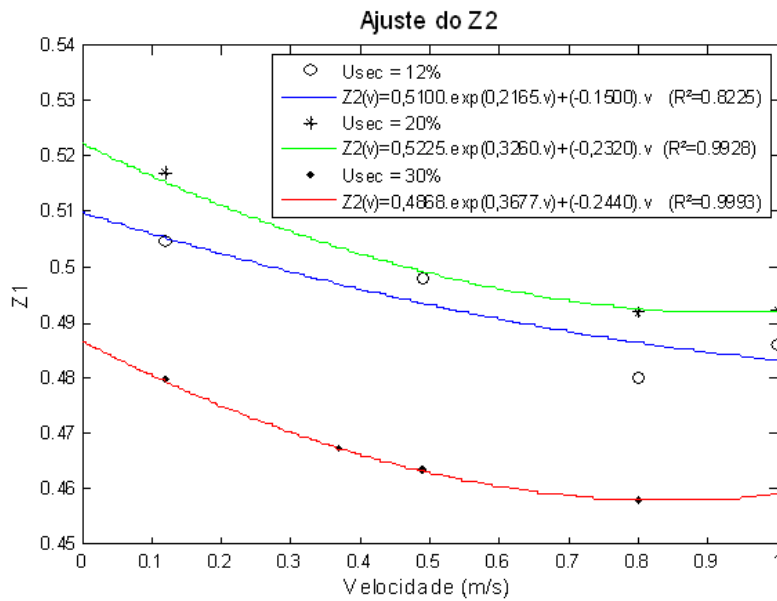


Gráfico 11: Ajuste do coeficiente Z_2 , considerando $X_g=16\%$ e $U_{sec}=30\%$.
 A curva escolhida para fazer este ajuste foi a seguinte:

(13)

onde:

Z_1 = coeficiente do ajuste do modelo para secagem de grãos com $X_g=16\%$ e U_{sec} 12%;

a, b, c = coeficientes de ajustes do modelo;

v = velocidade do ar de secagem.

CONCLUSÕES

Os ajustes de curvas de secagem de grãos de soja podem ser perfeitamente realizados utilizando-se o modelo de Page, pois, além de sua simplicidade, conseguiu descrever um modelo com magnitude de coeficiente de determinação superior a 99%.

Em relação à constante Z_1 e Z_2 deste modelo devemos utilizar outro ajuste para representá-lo, pois, apesar do R^2 ter sido de 0,99 (com apenas uma exceção, possível erro experimental), a curva Z_1 deve apresentar uma tendência de crescer de forma acentuada no início e em seguida diminuir seu crescimento. Quanto mais se eleva a velocidade do ar de

secagem menos intenso é queda da umidade do grão. Segundo Zucolotto (2008), a influência da variação de velocidade, para altas velocidades do ar de secagem, vai se tornando cada vez menor, evidenciado que para se ter secagem basta ter fluxo de ar.

Contudo, o subprojeto 2009-2010 prevê a coleta de dados com outras velocidades e ajustar as curvas com outros diferentes modelos, para percepção mais precisa da influência das variáveis no processo de secagem de grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKKER-ARKEMA, F.W.; BICKERT, W.G. **A deep-bed computational cooling procedure for biological products.** *Transactions ASAE*, v.9, n.6, p.834-6,1966.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; DEBOER, S.F.; ROTH, M.G. **Grain dryer simulation.** *Agricultural Experiment Station Report*, Michigan State University, East Lansing, MI, n. 224, 1974.
- BROOKER,D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.;Hall,C.W. **Drying Cereal Grains.**AVI Publishing,Westport,CT, 1974.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; Hall, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CARVALHO, N. M; A secagem de Sementes. Jaboticabal; FUNEP, 1994.
- CASSINI, A.S. **Análise das características de secagem da proteína texturizada de soja.** Porto Alegre: UFRGS, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004
- COURTOIS, F., LEBERT, A., LASSERAN, J.C. and BIMBENET, J.J. **Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems** . *Drying Technology*, 9(4),927-945. 1991.
- FRANÇA, A.S., Fortes, M. and Haghghi, K.. **Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials.** *Drying Technology*, Vol.12(7), 1537-1560. 1994.
- KHATCHATOURIAN, Oleg; OLIVEIRA, Fabiane Avena de. **Mathematical Modelling of Air Flow and Thermal State in Large Aerated Grain Storage.** Biosystems Engineering, UK, v. 95, n. 2, p. 159-169, 2006.
- KHATCHATOURIAN, Oleg; SAVICKI, Darci Luiz. **Mathematical Modelling of Airflow in an Aerated Soya Beans Store under Non-Uniform Conditions.** Biosystems Engineering, UK, v. 88, n. 2, p. 201-211, 2004.
- KHATCHATOURIAN, O.A; BORGES, P.A.P., PETRY, V. J. **Dinâmica de Secagem de Grãos de Soja em Câmara de Leito Fixo: Modelo Matemático e Análise Comparativa dos Métodos Numéricos de Resolução.** *Anais do MERCOFRIO 2000 - Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do MercoSul.* Porto Alegre, 2000. CD-ROM.p.01-10.
- KHATCHATOURIAN, O.A., SAVICKI, Darci Luiz , D.L., TONIAZZO N.A., **Modelo Matemático E Aplicativo Para Simulação De Distribuição Do Ar Em Armazéns Com Aeração Em Condições Não-Uniformes Da Massa De Grãos.** *Proceedings of the 22nd Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering.* 2nd Brazilian

Congress on Computational Mechanics, CIL-242, pp.1-18, ISBN 85-902253-1-3, UNICAMP, November 7-9, 2001, Campinas-SP-Brazil.

LAWS, N. and Parry, J.L. **Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying**. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 385 169-187. 1983.

LUIKOV, A.V. **Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies**. New York: Pergamon, 1966.

MODAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. **Thin-layer drying characteristics of garlic slices**. *Journal of Food Engineering*, London, v.29, n.1, p.75-97,1996.

SARTORI, J.A. **Qualidade dos grãos de milho após o processo de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

SOARES, J.B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja** (*Glycine max L.*). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, MG. 1986.

Streeter, Victor L.; Wylie, E. B. *Mecânica dos Fluidos*. 7.ed. São Paulo: McGrawHill, 1980.

TONIAZZO, N. A. **Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Sistemas de Armazenagem de Grãos**. Ijuí: UNIJUÍ, 1997. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Departamento de Física, Estatística e Matemática, UNIJUÍ, 1997.

WEBER, E.A. **Excelência em beneficiamento e Armazenagem de Grãos**. Canos: Salles, 2005.

ZUCOLOTTI, B.; OLIVEIRA, F.A.; KHATCHATOURIAN, O.; **Dados Experimentais sobre Secagem de Grãos Utilizando Camadas Finas**. In Anais do I CNEM - Congresso Nacional de Educação Matemática; VIII EREM - Encontro Regional de Educação Matemática; III EREF - Encontro Regional de Ensino de Física; UNIJUI; Ijuí; RS; 2008.