

PLANEJAMENTO CENTRAL COMPOSTO NA SECAGEM DE MAÇÃ

KIL JIN PARK¹, ROSÂNGELA GOMES LEITE², RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA¹

¹Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, CP. 6011, Campinas/SP, 13083-875, Fone-Fax: (19)3788-1076, e-mail: kil@agr.unicamp.br.

²Engenharia Agrícola, UEG, Anápolis - GO.

**Escrito para apresentação no
XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola
31 de julho a 4 de agosto de 2006 - João Pessoa - PB**

RESUMO: Neste trabalho estudou-se o processo de secagem da maçã (*Malus sp*) variedade *Red Delicious*. Os experimentos constituíam na secagem de amostras cilíndricas em um secador convectivo com fluxo do ar perpendicular. Com os dados colhidos nos experimentos, pôde-se determinar a difusividade efetiva (variável dependente), pelo ajuste na solução da segunda lei de Fick, para cada uma das combinações das variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar), através do planejamento central composto. Somente o efeito quadrático da temperatura não foi considerado significativo no modelo matemático.

PALAVRAS-CHAVE: difusividade efetiva, secagem convectiva, coordenada cilíndrica.

CENTRAL COMPOSE DESIGN TO APPLE DRYING

ABSTRACT: In this work, the drying process of apple (*Malus sp*) cultivar Red Delicious was studied. The experimental procedure was composed drying runs of cylindrical apple samples in a convective dryer with perpendicular air flow. With drying data, the respective effective diffusivity values (dependent variable) was determined by second Fick's law solution fit, for each one of the central composite experimental design runs. This experimental design considered two independent variables (temperature and air velocity). Only the quadratic effect of temperature was considered no significant in mathematical model.

KEYWORDS: effective diffusivity, convective drying, cylindrical coordinate.

INTRODUÇÃO: A macieira é uma árvore frutífera típica de clima temperado, pertencente à família *Rosaceae*, e muito exigente em seus tratos culturais. A produção brasileira de maçã esta concentrada na região sul, responsável por 98% da produção nacional. O Brasil deu um grande salto, passou de importador em 1970 para exportador da fruta a partir de 2003. O processamento da maçã é comum em alguns países, como os EUA, ao contrário do que ocorre no Brasil. As técnicas de processamento mais comuns são: conservas em calda, suco, geléia ou desidratada. A secagem é um processo que pode ser utilizada para vários fins, como em produtos de panificação, molhos e compotas e para consumo da própria fruta seca.. As vantagens de se utilizar o processo de secagem são várias, dentre as quais tem-se: a facilidade na conservação do produto; estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; proteção contra degradação enzimática e oxidativa; redução do seu peso; economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano. A desidratação industrial é definida como a secagem com o calor artificial sob condições de temperatura, umidade, e fluxo de ar controlado. Durante a secagem, na superfície do material ocorre a evaporação da água que foi transportada do interior do sólido. Os mecanismos desse transporte mais importantes são: difusão líquida, difusão de vapor e fluxo de líquido e de vapor. O conhecimento do conteúdo inicial e final (equilíbrio) de umidade do material, da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície possibilitam fundamentar o fenômeno da secagem.

MATERIAL E MÉTODOS: A escolha da variedade de maçã utilizada para o experimento foi a *Red Delicious*, pela facilidade de encontrá-la no mercado. A secagem foi realizada no laboratório de secagem da FEAGRI/UNICAMP utilizando o secador convectivo conjugado de fluxo perpendicular e paralelo (BROD, PARK e OLIVEIRA, 2001). Foi utilizada apenas uma bandeja na câmara do secador, ocupando, assim, apenas uma metade (esquerda) da mesma. A outra metade foi vedada, assim como as laterais da câmara, para restringir o fluxo de ar apenas para a bandeja e somente no sentido vertical (perpendicular). As amostras utilizadas foram cortadas em formato cilíndrico. Foram utilizadas duas variáveis independentes: temperatura e velocidade do ar, e como variável dependente (resposta), a difusividade efetiva, sendo esta determinada pela seguinte equação do cilindro:

$$Y = \frac{4}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n} \exp(-D_{ef} b_n^2 t) \quad (1)$$

Onde: D_{ef} = difusividade efetiva, m^2/s ; Y = conteúdo adimensional de umidade, adimensional; t = tempo, r = raio, m ; n = número de dados experimentais; b_n = raízes da função de Bessel.

Os níveis de cada variável foram determinados a partir de um planejamento experimental, sendo este baseado na metodologia de superfície de resposta, com dois níveis para cada variável independente (temperatura e velocidade do ar de secagem), totalizando 4 experimentos chamados de fatoriais. Os pontos fatoriais são apenas para avaliar os efeitos de suas variáveis e suas interações, não sendo possível, neste estágio, otimizar o processo. Para o planejamento utilizado, deve-se ainda avaliar o erro puro incluindo no mínimo 3 repetições dos pontos centrais. Optou-se por se utilizar mais 4 ensaios, chamados de ensaios axiais. As combinações das variáveis independentes e o planejamento experimental são mostrados na Tabela 1. Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem, segunda ordem e da interação entre os termos, conforme a Equação 2.

$$D_{ef} = b_0 + b_1 T + b_2 V + b_{11} T^2 + b_{22} V^2 + b_{12} T V \quad (2)$$

Terminada a secagem, as amostras de maçã seca foram utilizadas para se determinar a massa seca segundo a metodologia da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1995). Os teores de água de equilíbrio foram determinados pela equação de Henderson modificada apresentada por Kaymak-Ertekin e Gedik (2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Com os dados obtidos das secagens para cada ponto do planejamento experimental central composto, pôde-se obter a curva de secagem para cada grupo de experimentos (fatorial, central e axial). Através do pacote de regressão não-linear do programa estatístico STATISTICA (2001), determinou-se os valores correspondentes de difusividade efetiva para cada curva de secagem. Foram também calculados os desvios médios relativos (DMR) de cada curva. Os valores das difusividades efetivas para cada ensaio e cada amostra são mostradas na Tabela 1. Como exemplo, uma curva de secagem com sua respectiva curva predita é mostrada na Figura 1.

Tabela 1: Difusividade efetiva na secagem da maçã.

Ensaio	Variáveis		Resposta – $D_{ef} \times 10^8 [m^2/s]$			DMR	
	T (°C)	V (m/s)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		
Pontos fatoriais	1	50,0	0,50	4,39	4,32	4,46	0,14
	2	50,0	1,30	4,44	4,52	4,76	0,11
	3	70,0	0,50	6,56	5,99	5,87	0,13
	4	70,0	1,30	10,56	10,43	9,46	0,21
Pontos centrais	5	45,9	0,90	3,77	3,79	3,63	0,15
	6	74,1	0,90	13,51	11,70	12,26	0,24
	7	60,0	0,33	4,25	4,35	4,58	0,17
Pontos axiais	8	60,0	1,30	6,46	7,43	7,46	0,13
	9	60,0	0,90	6,65	6,65	6,42	0,17
	10	60,0	0,90	7,47	6,93	6,84	0,16
	11	60,0	0,90	7,51	6,92	6,81	0,14

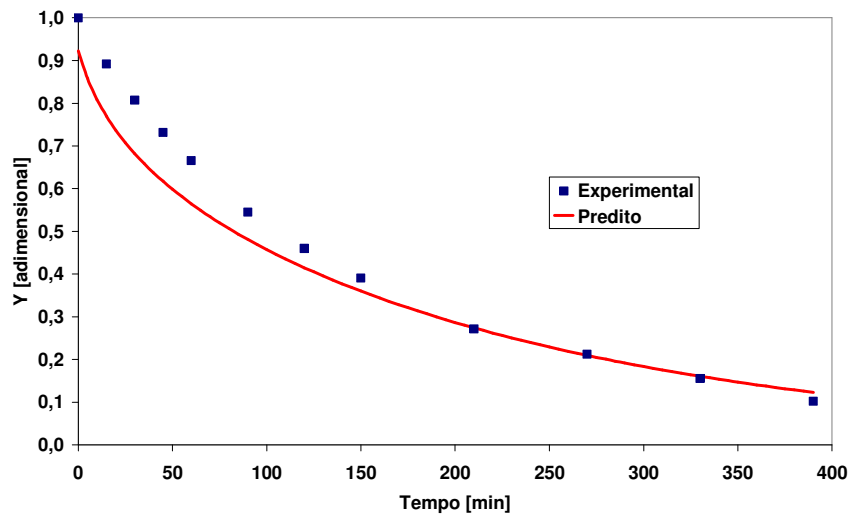


Figura 1: Curva exemplo de secagem

A Tabela 2 mostra os efeitos das variáveis e sua interação na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 95% para análise de secagem de maçã.

Tabela 2: Efeito estimado, erro puro e grau de significância estatística (p) para difusividade efetiva na secagem de maçã.

Variáveis	Efeito	Erro puro	p
Temperatura T (linear)	4,52E-08	2,16E-09	2,27E-03
Temperatura T (quadrático)	9,32E-09	2,40E-09	6,06E-02
Velocidade V (linear)	3,07E-08	2,77E-09	8,03E-03
Velocidade V (quadrático)	-2,43E-08	4,26E-09	2,93E-02
Interação T x V	2,32E-08	3,54E-09	2,26E-02

Notou-se que todas os parâmetros, excetuando-se o efeito quadrático da temperatura foram significativos a um nível de 95% de confiança ($p = 0,05$), determinando, assim, uma curva polinomial de segunda ordem. Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar o modelo (Tabela 3).

Tabela 3: Análise de variância (ANOVA) para processo de secagem de maçã.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R^2
Regressão	6,49E-15	4	1,62E-15	18,27	4,53	0,942
Resíduo	5,33E-16	6	8,89E-17			
Falta de ajuste	5,16E-16	4	1,29E-16	15,10	19,25	
Erro puro	1,71E-17	2	8,55E-18			
Total	7,03E-15	10				

Verifica-se que o modelo apresentou regressão significativa (F_{calc} superior ao F_{tab} com os respectivos graus de liberdade). A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo, porém o ajuste não satisfaz o critério sugerido por Box e Wetz (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002), no qual F_{calc} deve ser pelo menos dez vezes maior que F_{tab} para ser considerado preditivo. Assim o modelo não pode ser considerado preditivo e não pode ser utilizado na estimativa do processo de secagem de maçã, apesar de não haver evidências de falta de ajuste. O coeficiente de determinação foi de 0,942, ou seja, 94,2% da variação é explicada pelo modelo, considerada erros aleatórios. O valor de F_{calc} para falta de ajuste foi inferior ao valor de F_{tab} , o que

significa que não há evidência de falta de ajuste do modelo. Foi feita análise dos resíduos e percebeu-se a distribuição aleatória dos dados, sendo que estes se apresentaram afastados da linha ideal. O modelo proposto para representar a difusividade efetiva na secagem de maçã está apresentado na equação não codificada a seguir:

$$D_{ef} = -1,35 \cdot 10^{-8} + 3,13 \cdot 10^{-10} T - 1,49 \cdot 10^{-8} V - 5,88 \cdot 10^{-8} V^2 + 2,39 \cdot 10^{-9} T V \quad (3)$$

A superfície de resposta e o perfil (curvas em nível) que representam o modelo são mostrados na Figura 2.

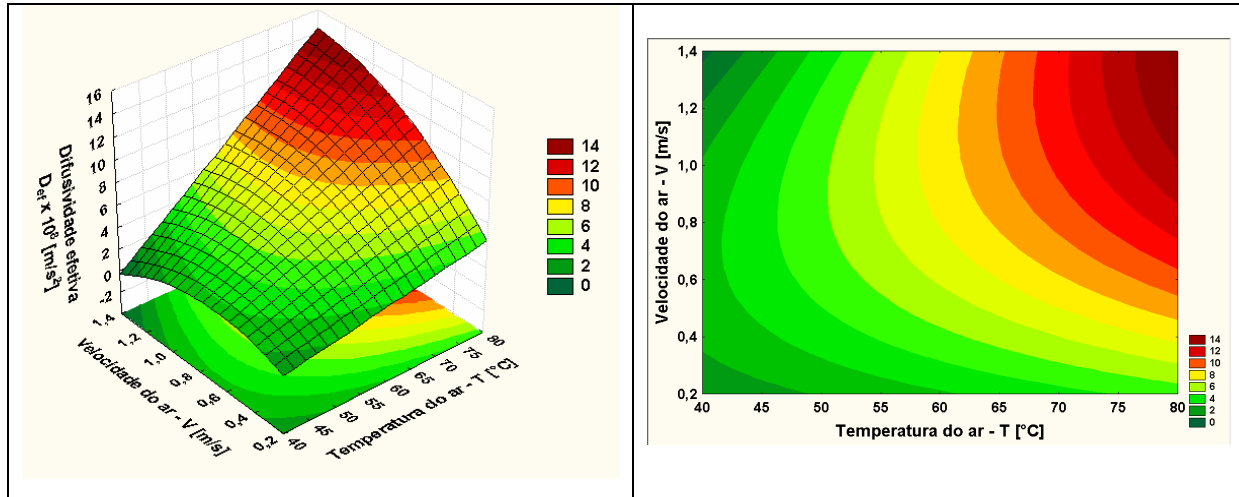


Figura 2: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros na secagem de maçã.

A dependência quadrática da velocidade do ar na difusividade efetiva causou a curvatura na superfície resposta.

CONCLUSÕES: A difusividade efetiva da secagem mostrou ser dependente linear positivo dos parâmetros temperatura, velocidade do ar e interação temperatura e velocidade positivamente ao passo que a dependência quadrática da velocidade é inversa.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem a FAPESP, CNPq, CAPES e UNICAMP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. international**. 16^a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc.. 1998.
- BOX, G.E.P.; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. University of Wisconsin Technical Report 9, 1973. *apud* BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.
- BROD, F.P.R.; PARK, K.J.; OLIVEIRA, R.A. Secagem de raiz de chicória em um secador convectivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR: SBEA, 2001. CD-ROM.
- KAYMAK-ERTEKIN, F.; GEDIK, A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**. v. 37, p. 429–438, 2004.
- STATISTICA version 6.0. **Data analysis software system**. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.