

## MODELAGEM MATEMÁTICA DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS ESPIGAS DE MILHO DURANTE A SECAGEM

FERNANDO MENDES BOTELHO<sup>1</sup>, PAULO CESAR CORRÊA<sup>2</sup>, OSVALDO RESENDE<sup>3</sup>, ACÁCIO FIGUEIREDO NETO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Eng. Agrícola e Ambiental, Bolsista PIBIC/CNPq, Dep. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa - MG, (0xx31) 3899-2030, e-mail: fernando\_eaa@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Eng. Agrônomo, D.S., Professor Adjunto, Dep. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa - MG

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, M.S., Doutorando em Engenharia Agrícola, Bolsista CAPES, Universidade Federal de Viçosa, UFV, MG

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, M.S., Doutorando, Dep. de Eng. Agrícola, , Bolsista CAPES, Universidade Federal de Viçosa, UFV, MG

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

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi avaliar, e ajustar modelos matemáticos aos dados da contração volumétrica unitária das espigas de milho durante o processo de secagem. Utilizou-se espigas de milho com teor de água inicial de aproximadamente de 0,45 b.s., secas até um teor final de aproximadamente 0,12 b.s. nas temperaturas de 35, 45, 55 e 65°C. A contração volumétrica unitária dos grãos foi determinada pela relação entre o volume para cada teor de água e o volume inicial. Ajustaram-se seis modelos para a representação do fenômeno de contração. Conclui-se que a redução volumétrica das espigas de milho variou de 11,40% para a temperatura de 35°C até 19,53% para a temperatura de 65 °C, sendo que quanto maior a temperatura de secagem maior é a contração do produto. O modelo de Bala e Woods adaptado foi o que melhor representou o fenômeno da contração volumétrica das espigas de milho durante a secagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** encolhimento, modelagem, milho em espiga

### MATHEMATICAL MODELLING OF EAR CORN SHRINKAGE DURING DRYING

**ABSTRACT:** The objective of this work was to evaluate and adjust mathematical models of ear corn volumetric shrinkage during drying. The ear corn with an initial water content of 0.45 d.b. were used, droughts until a final moisture content of approximately 0,12 d.b., for temperatures of 35, 45, 55 e 65 °C. The grain volumetric shrinkage has been determined by the relation between the volume for each water moisture content and the initial volume. Six models were fitted to shrinkage phenomenon representation. The results obtained allowed to conclude that the ear corn volumetric shrinkage varied between 11,40% for 35°C up to 19,53% for 65°C, being that the bigger drying temperature, the bigger product shrinkage. The best model to evaluated the ear corn volumetric shrinkage phenomena during the drying process has been the Bala and Woods adapted.

**KEYWORDS:** Shrinkage, modelling, ear corn

**INTRODUÇÃO:** Uma das mais importantes mudanças físicas que os produtos sofrem durante a secagem é a redução de volume do produto. A redução do conteúdo de água, gera stress na estrutura celular dos

alimentos que levam a mudanças na forma e redução de suas dimensões (CORREA et al., 2004). A maioria dos modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas foi desenvolvida, negligenciando-se a importância da contração volumétrica do produto (BROOKER et al., 1992). Estas equações vêm sendo revisadas para incorporar o efeito desse fenômeno, para melhor simulação do processo e precisão dos resultados (LANG e SOKHANSANJ, 1993). Mudanças volumétricas dos produtos devido à sua desidratação são relatadas como sendo as principais causas das alterações das propriedades físicas mais importantes dos produtos agrícolas (RATTI, 1994). RATTI (1994) e ZOGZAS et al. (1994) observaram que a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de água, sendo também, dependente das condições do processo e da geometria do produto. Muitos pesquisadores têm utilizado aproximações e modelos empíricos na tentativa de melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (LANG et al., 1994; KROKIDA e MAROULIS, 1997; AFONSO JÚNIOR et al., 2000). Diante o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e ajustar modelos matemáticos aos dados observados da contração volumétrica unitária das espigas de milho durante o processo de secagem.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Foram utilizadas espigas de milho com teor de água inicial de aproximadamente 0,45 b.s., secas até um teor final de aproximadamente 0,12 b.s.. Os teores de água do produto foram determinados por gravimetria até massa constante, em estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ . A secagem das espigas de milho foi realizada em estufa com circulação forçada nas temperaturas de 35, 45, 55 e  $65^\circ\text{C}$ , em três repetições. O volume de cada espiga, considerada um cilindro reto, foi determinado por meio da medição, nos três eixos ortogonais, das medidas de comprimento (a), largura (b) e espessura (c) com o auxílio de um paquímetro digital e régua graduada, ao longo do processo de secagem, como proposto por Mohsenin (1986). A contração volumétrica unitária dos grãos foi determinada pela relação entre o volume para cada teor de água e o volume inicial. O diâmetro do cilindro foi calculando pela média aritmética entre as medidas “b” e “c”. Os dados experimentais foram ajustados por seis modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação do fenômeno de contração, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos utilizados para descrever a contração volumétrica durante a secagem.

Referência do modelo	Modelo
Exponencial	$\psi = a \cdot [\exp(b \cdot U)]$
Lang & Sokhansanj (1993)	$\psi = a + b \cdot (U - U_0)$
Bala & Woods (1984)	$\psi = a \cdot \{1 - \exp[b \cdot (U - U_0)]\}$
Linear	$\psi = a + b \cdot U$
Rahman (1995)	$\psi = 1 + b \cdot (U - U_0)$
Correa et al. (2004)	$\psi = 1/(a + b \cdot \exp(U))$

Onde:  $\psi_m$  é o índice de contração volumétrica da massa granular (decimal), U é o teor de água do produto, decimal (b.s.),  $U_0$  é o teor de água inicial do produto (decimal b.s.), e, “a” e “b” são os coeficientes das equações que dependem do produto.

Para o ajuste dos modelos matemáticos foi realizada análise de regressão não linear e linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 6.0<sup>®</sup>. O grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e a magnitude dos erros médios relativo (P) e estimado (SE).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}}$$

Onde: Y é o valor observado experimentalmente;  $\hat{Y}$  é o valor calculado pelo modelo; GLR são os graus de liberdade do modelo e n são número de observações experimentais.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Tabela 02 estão apresentadas as porcentagens de contração, considerando um teor de água final de 12% b.s. das espigas de milho, para cada temperatura do ar de secagem analisada. Observa-se que a contração volumétrica aumentou com o aumento da temperatura variando de 11,40 à 19,53% para as temperaturas de 35 à 65 °C, respectivamente.

Tabela 02 – Porcentagem de contração das espigas de milho para cada temperatura do ar de secagem

Temperatura	Porcentagem de contração
35 °C	11,40
45 °C	17,66
55 °C	18,82
65 °C	19,53

De acordo com a Tabela 03, observa-se que para todas as temperaturas de secagem analisadas (35, 45, 55 e 65°C), o modelo de Bala e Woods adaptado foi o que apresentou os melhores índices do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e reduzidas magnitudes dos erros médio relativo (P) e estimado (SE), comparativamente aos demais modelos analisados. Sendo assim, o modelo de Bala e Woods mostrou-se o mais adequado para representar o fenômeno da contração volumétrica das espigas de milho durante o processo de secagem. Corrêa et al. (2004) também observaram que o modelo de Bala e Woods foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de contração volumétrica dos frutos de café durante o processo de secagem. Na Tabela 04, estão apresentadas as equações, com os devidos coeficientes ajustados, do modelo de Bala e Woods para as temperaturas do ar de secagem utilizadas.

Tabela 03 – Parâmetros das equações ajustadas para calcular a contração volumétrica das espigas de milho para cada temperatura em função do teor de água.

Modelos	Temperaturas											
	35 °C			45 °C			55 °C			65 °C		
	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE
Rahman	0,953	0,742	0,0092	0,944	1,295	0,0192	0,977	0,828	0,0090	0,988	0,626	0,0070
Correa	0,935	0,913	0,0113	0,988	0,457	0,0058	0,984	0,701	0,0077	0,960	1,284	0,0134
Exponencial	0,952	0,756	0,0096	0,981	0,560	0,0075	0,984	0,701	0,0079	0,983	0,781	0,0088
Linear	0,957	0,715	0,0092	0,976	0,650	0,0084	0,979	0,821	0,0088	0,989	0,620	0,0072
Bala e Woods	0,978	0,506	0,0066	0,986	0,502	0,0063	0,985	0,631	0,0074	0,994	0,465	0,0054
Lang e Sokhansanj	0,957	0,715	0,0092	0,976	0,650	0,0084	0,979	0,821	0,0088	0,989	0,620	0,0072

Tabela 04 – Equações ajustadas do modelo de Bala e Woods adaptado para as temperaturas analisadas

Temperatura	Modelo de Bala e Woods adaptado
35 °C	$\psi = 1 - (-0,05733) \cdot (1 - \exp(3,42341 \cdot Z))$
45 °C	$\psi = 1 - (0,251796) \cdot (1 - \exp(-3,4105 \cdot Z))$
55 °C	$\psi = 1 - (0,530161) \cdot (1 - \exp(-1,3369 \cdot Z))$
65 °C	$\psi = 1 - (-0,41498) \cdot (1 - \exp(1,03392 \cdot Z))$

**CONCLUSÕES:** De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a redução volumétrica unitária das espigas de milho, considerando um teor de água final de 0,12 b.s., variou de 11,40% para a temperatura de 35°C até 19,53% para a temperatura de 65 °C, sendo que, quanto maior a temperatura de secagem maior é a contração do produto. O modelo de Bala e Woods é o que melhor representou o fenômeno da contração volumétrica das espigas de milho durante o processo de secagem.

#### REFERÊNCIAS:

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; VILARINHO, M.C.; FRANÇA, A.S. Dinâmica da contração volumétrica do fruto de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.Especial, n.8, p.29-35, 2004.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.30, n.3, p.235-244, 1984.
- 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.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: 14th International Drying Symposium (IDS 2004). São Paulo. Proceeding... São Paulo, SP: 2004. v.A, p.742-747.
- KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, New York, v.15, n.10, p.2441-2458, 1997.
- LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, Trumbull, v.16, n.4, p.305-314, 1993.
- LANG, W.; SOKHANSANJ, S.; ROHANI, S. Dynamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. **Drying Technology**, v.12, n.7, p.1687-1708, 1994.
- MOSHENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v.23, n.1, p.91-105, 1994.
- RAHMAN, S. **Physical properties of foods**. Boca Raton, CRC Press LLC, 1995. 500p.
- ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; KOURIS, D.M. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.