

Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem

André Luís Duarte Goneli^{1*}, Paulo Cesar Corrêa², Felipe Elia de Almeida Magalhães² e Fernanda Machado Baptestini²

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Rod. Dourados-Itahum, km 12, 79804-970, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. ²Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: andregoneli@ufgd.edu.br

RESUMO. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da variação do teor de água na contração volumétrica, dimensões características e forma dos frutos de mamona durante a secagem. Foram utilizados frutos colhidos com teor de água de 2,50 (b.s.), secos à temperatura de 40°C até o teor final de 0,11 (b.s.). O tamanho dos frutos foi determinado por meio da variação do volume e a forma foi analisada pela esfericidade e circularidade. A contração volumétrica dos frutos foi determinada pela relação entre o volume em cada teor de água e o volume inicial. Com base nos resultados, concluiu-se que a forma dos frutos de mamona é influenciada pela redução do teor de água, promovendo redução da esfericidade e circularidade. As dimensões características (comprimento, largura e espessura) e o diâmetro geométrico médio dos frutos sofrem redução de suas magnitudes com a redução do teor de água. A redução do teor de água influencia a contração volumétrica unitária e da massa dos frutos de mamona, provocando redução de seus valores em 46,0 e 63,0%, respectivamente. O modelo polinomial, dentre aqueles testados, foi o que melhor representou o fenômeno da contração volumétrica da massa e unitária dos frutos de mamona.

Palavras-chave: *Ricinus communis* L., propriedades físicas, contração volumétrica.

ABSTRACT. Shape and shrinkage of the castor bean fruit during the drying process. The objective of this work was to evaluate the effect of moisture content on castor bean fruit shrinkage, dimensional characteristics and shape during drying. Castor bean fruits were harvested with 2.50 (d.b.) moisture content and dried at 40°C up to final moisture content of 0.11 (d.b.). The size of the fruits was determined according to the shrinkage rate and the shape analyzed through the sphericity and circularity method. Castor fruit shrinkage was determined by the ratio between its volume with respective moisture content and its initial volume. Based on the obtained results, it can be concluded that the shape castor bean fruits is influenced by reduction in moisture content promoting the sphericity and circularity values as the moisture content is reduced. The dimensional characteristics (length, width and thickness) and the mean geometric diameter values of the fruits are reduced as the moisture content is reduced. The moisture content reduction influenced unit volumetric shrinkage and fruit mass, resulting in reduction of 46.0 and 63.0%, respectively. The polynomial model, among all tested, best fit the shrinkage phenomenon of castor bean fruits.

Keywords: *Ricinus communis* L., physical properties, shrinkage.

Introdução

A mamoneira é uma oleaginosa de relevante importância econômica para o Brasil, sendo produzida tradicionalmente em pequenas e médias propriedades, gerando emprego e renda em razão de suas inúmeras possibilidades de aplicação na área industrial, além da perspectiva de potencial energético na produção de biodiesel, tornando-se um agronegócio bastante promissor. Pela possibilidade de uso do óleo de mamona como matéria-prima para a produção de biodiesel, a

cultura da mamona vem apresentando elevado crescimento nos últimos anos, com expansão de novas áreas de plantio e com a adesão de maior número de produtores e indústrias a esse agronegócio.

O beneficiamento dos frutos de mamona é um dos principais fatores limitantes ao crescimento da cultura, sendo uma etapa muito importante para a definição da qualidade da semente. Os frutos de mamona, segundo Beltrão et al. (2001), são cápsulas tricocas, geralmente compostos de três sementes,

podendo ser lisas ou com estruturas semelhantes a espinhos, denominadas acúleos. As sementes de mamona têm tamanhos muito variados entre diferentes cultivares e as máquinas geralmente são reguladas para um único tamanho e, ainda assim, adaptadas de máquinas destinadas ao beneficiamento de cereais (SILVA et al., 2001).

Projetos de máquinas para processamento, classificação e dimensionamento de equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas, especialmente as propriedades geométricas. Nesse sentido, informações a respeito de tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos que envolvem transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares.

Dentre os processos utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas após a colheita, a secagem é um dos mais empregados, como forma de reduzir a atividade de água no produto. Com a redução do teor de água, até níveis seguros, inibe-se o crescimento de microrganismos, reduz-se a possibilidade de proliferação de insetos pragas, além de se minimizar mudanças físicas e químicas durante o armazenamento, que contribuem decisivamente para a perda de qualidade do produto.

Uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume externo. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em sua dimensão (MAYOR; SERENO, 2004). Segundo Ramos et al. (2003), a redução do conteúdo de água, durante o processo de secagem, origina uma redução no tamanho do tecido celular, fenômeno este que usualmente é chamado de contração volumétrica. A contração volumétrica pode ser muito intensiva, dependendo do método de secagem aplicado (KROKIDA; MAROULIS, 1997) e das condições de secagem, afetando os parâmetros da transferência de calor e massa e devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (RAMOS et al., 2003).

As variações volumétricas, pela sua desidratação, são relatadas como as principais causas das alterações das principais propriedades físicas dos produtos agrícolas (RATTI, 1994; SOKHANSANJ; LANG, 1996). Segundo Ramos et al. (2005), as modificações no produto referentes à sua contração volumétrica também devem ser incluídas nos modelos para completa descrição, precisão e análise do fenômeno

de secagem. A variação das propriedades físicas dos produtos agrícolas, como a forma e a contração volumétrica, durante o processo de secagem, tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (CORRÊA et al., 2002, 2004, 2006; KOÇ et al., 2008; MAYOR; SERENO, 2004; RAMOS et al., 2003; RAZAVI et al., 2007a; 2007b; RESENDE et al., 2005; RIBEIRO et al., 2005; SOKHANSANJ; LANG, 1996).

As bases teóricas para o conhecimento do processo de contração volumétrica envolvem complexas leis mecânicas e de deformação de materiais (TOWNER, 1987). No entanto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos, utilizando-se aproximações e modelos empíricos na tentativa de se melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (CORRÊA et al., 2006; MAYOR; SERENO, 2004; RESENDE et al., 2005; RIBEIRO et al., 2005).

Khraisheh et al. (2004) observaram que a contração volumétrica dos produtos agrícolas durante a secagem ocorre de maneira heterogênea. No início da secagem, aparentemente, o produto permanece com a estrutura intacta e mantém sua forma original. Entretanto, com a retirada de água, acontece o seu encolhimento que é acompanhado de deformação das partículas, formação de poros e demais mudanças microestruturais (KOÇ et al., 2008).

Considerando a importância e a variabilidade existentes nas propriedades físicas dos produtos agrícolas de diferentes espécies e variedades e a necessidade de geração de informação técnica que possibilite o crescimento da cultura da mamona, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar, caracterizar e modelar as dimensões características e a forma dos frutos de mamona ao longo do processo de secagem, bem como avaliar a contração volumétrica dos frutos de mamona durante a secagem, ajustando modelos matemáticos aos valores experimentais.

Material e métodos

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - Centreinar, localizado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Estado de Minas Gerais.

Foram utilizados frutos de mamona da variedade Guarani, provenientes de plantações comerciais das cidades de Divino e Curvelo, em Minas Gerais, colhidos manualmente com teor de água de, aproximadamente, 2,50 (decimal b.s.).

Após a homogeneização e preparação das amostras, o produto foi submetido à secagem em estufa com ventilação forçada, à temperatura de 40°C. Tal temperatura foi utilizada por permitir bom espaçamento entre as leituras das dimensões características do produto, para diferentes teores de água.

A redução do teor de água, ao longo da secagem, foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água final de, aproximadamente, 0,11 (decimal b.s.). O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Os teores de água dos frutos de mamona foram determinados pelo método de estufa, a 105 ± 1°C, durante 24h, em três repetições.

Durante a secagem, para cada teor de água obtido, amostras eram homogeneizadas e encaminhadas para a determinação de suas propriedades físicas, sempre em triplicata. A forma e o tamanho dos frutos de mamona, considerados como esferoides, foram analisados pela esfericidade, circularidade e volume, a partir das medidas em 30 frutos de dimensões características, eixos ortogonais (Figura 1).

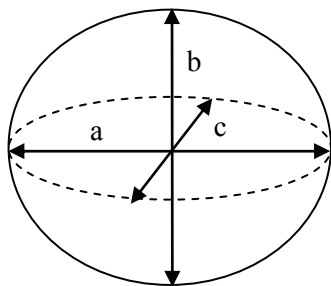


Figura 1. Desenho esquemático do fruto de mamona, considerado como esferoide tri axial, com suas dimensões características.

em que:

- a: comprimento ou maior eixo, mm;
- b: largura ou eixo médio, mm;
- c: espessura ou menor eixo, mm.

Para a determinação do volume, os frutos de mamona foram considerados como esferoides tri axiais, sendo medidas suas dimensões características, eixos ortogonais (Figura 2), em 30 frutos, obtidos por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Para essas

determinações, desconsideraram-se os espinhos que são característicos desta variedade analisada.

O diâmetro geométrico médio (D_g) dos frutos de mamona foi determinado pela seguinte expressão (MOHSEININ, 1986):

$$D_g = (abc)^{1/3} \quad (1)$$

Após determinadas suas dimensões características, o volume (V) dos frutos foi determinado como proposto por Mohsenin (1986), de acordo com a seguinte expressão:

$$V = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (2)$$

A esfericidade (E) dos frutos de mamona, em porcentagem (%), foi calculada, utilizando-se a expressão a seguir, proposta por Mohsenin (1986):

$$E = \left[\frac{(abc)^{1/3}}{a} \right] 100 \quad (3)$$

em que:

E_s : esfericidade, %;

A circularidade (C), em porcentagem (%), foi determinada pela seguinte expressão (MOHSEININ, 1986):

$$C = \left(\frac{b}{a} \right) 100 \quad (4)$$

O índice de contração volumétrica da massa de frutos de mamona, durante a secagem do produto, foi determinado pela relação entre o volume para cada teor de água (V) e o volume inicial (V_0), como apresentado a seguir:

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (5)$$

em que:

- ψ : índice de contração volumétrica, decimal;
- V: volume em cada teor de água, m³;
- V_0 : volume inicial, m³.

Para o acompanhamento da redução do volume da massa durante cada medição, o produto foi transferido para um cilindro de acrílico graduado, com capacidade de 2 L.

O índice de contração volumétrica unitária dos frutos 1de mamona foi determinado de acordo com a Equação (4). Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária e da massa foram ajustados os modelos matemáticos descritos pelas expressões listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos utilizados para se simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.

Referência	Modelo	
Bala e Woods (1984) modificado	$\psi = 1 - A \{ 1 - \exp[-B(M_0 - M)] \}$	(6)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = \frac{1}{A + B \exp(M)}$	(7)
Exponencial	$\psi = A \exp(BM)$	(8)
Linear	$\psi = A + BM$	(9)
Polinomial	$\psi = A + BM + CM^2$	(10)
Rahman (1995)	$\psi = 1 + \beta(M - M_0)$	(11)

em que:

M: teor de água, decimal b.s.;

M₀: teor de água inicial, decimal b.s.;

A, B, C: parâmetros que dependem do produto;

β: coeficiente de contração volumétrica, adimensional.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, realizou-se a análise de regressão não-linear e linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 6.0®.

Os modelos foram selecionados, considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação (R²), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro-padrão da estimativa (SE), além da verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Os resíduos, que são a diferença entre os valores observados experimentalmente pelos valores estimados pelos modelos, foram representados em gráficos, em função dos valores estimados de contração volumétrica.

Um modelo é considerado aceitável se os valores dos resíduos se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero, o que indica que os resultados não são tendenciosos. Se apresentar distribuição tendenciosa dos seus resíduos, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão.

Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra e Rao (2005). O erro médio relativo e o desvio-padrão da estimativa, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (12)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (13)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

Ŷ: valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Resultados e discussão

Na Figura 2, são apresentados os valores experimentais e estimados das dimensões características e do diâmetro geométrico médio dos frutos de mamona, em função do teor de água (decimal b.s.).

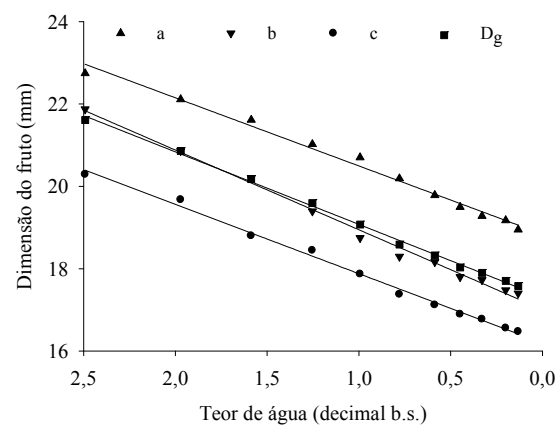


Figura 2. Valores observados e estimados das dimensões dos frutos de mamona em função do teor de água.

Analisando-se a Figura 2, observa-se que houve redução de todas as dimensões dos frutos de mamona (comprimento, largura e espessura) com a redução do teor de água, tendência também observada para os valores do diâmetro geométrico médio. Esses resultados concordam com os encontrados por Razavi et al. (2007a), trabalhando com castanhas e grãos de pistachio.

De acordo com a Figura 2, observa-se que as dimensões dos frutos de mamona reduziram 16,68; 20,44 e 18,82%, respectivamente, para comprimento (a), largura (b) e espessura (c), em relação às suas dimensões iniciais com a redução do teor de água de 2,50 para 0,11 (decimal b.s.). Além disso, com a redução do teor de água, o diâmetro geométrico

médio variou 18,66% em relação à sua dimensão inicial. A partir destes resultados, constata-se que os frutos de mamona, assim como a maioria dos produtos agrícolas, possuem encolhimento desuniforme de suas dimensões características durante o processo de secagem, tal como observado por Resende et al. (2005), trabalhando com grãos de feijão. Estes resultados não só permitem caracterizar a forma dos frutos de mamona, como também servirão de subsídios para projetos destinados à colheita e pós-colheita deste produto, bem como aprimorar os equipamentos já existentes.

Na Tabela 2, são apresentados os modelos lineares ajustados aos dados observados de comprimento, largura, espessura e diâmetro geométrico médio dos frutos de mamona em função do teor de água. Os modelos apresentaram-se adequados para se estimar as dimensões características das sementes de mamona, apresentando elevado valor do coeficiente de determinação (R²), que foram superiores a 98%, e significância da regressão, em nível de 1%, pelo teste F.

Tabela 2. Equações ajustadas aos valores das dimensões dos frutos de mamona em função do teor de água.

Eixo ortogonal	Modelo	R ² (%)
a (comprimento)	a = 1,6554U + 18,8410	98,90**
b (largura)	b = 1,9368U + 17,0091	99,29**
c (espessura)	c = 1,6843U + 16,1952	99,42**
D _g (diâmetro geométrico médio)	D _g = 1,7619U + 17,3148	99,75**

**Significativo a 1% de significância, pelo teste F.

Na Tabela 3, são apresentados os índices de contração das dimensões características (dimensão/dimensão inicial), esfericidade e circularidade das sementes de mamona em função do teor de água (decimal b.s.). Observa-se que os frutos de mamona apresentam variação desuniforme de suas dimensões, com maior redução de sua largura quando comparada ao comprimento e espessura de seus frutos, conforme pode ser observado pela variação do índice de contração das dimensões.

Tabela 4. Modelos de contração volumétrica da massa de frutos de mamona, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação – R² (%), erro-padrão da estimativa – SE (adimensional), erro médio relativo – P (%) e tendência de distribuição dos resíduos.

Modelos de contração volumétrica	R ²	SE	P	Resíduos
$\psi = 1 - 0,817 \{ 1 - \exp[-0,006(M_0 - M)] \}$	99,88	0,0072	1,0193	Alcatório
$\psi = \frac{1}{2,389 - 0,118 \exp(M)}$	88,07	0,0726	10,8527	Tendencioso
$\psi = 0,331 \exp(0,437M)$	99,40	0,0163	2,6500	Tendencioso
$\psi = 0,290 + 0,253M$	95,17	0,0462	6,7725	Tendencioso
$\psi = 0,369 + 0,043M + 0,084M^2$	99,96	0,0043	0,6489	Alcatório
$\psi = 1 + 0,003(M - M_0)$	91,77	0,0572	9,5391	Tendencioso

Tabela 3. Índices de contração (a/ao, b/bo e c/co), esfericidade (E) e circularidade (C) dos frutos de mamona em função do teor de água (decimal b.s.).

Teor de água (b.s.)	a/a ₀	b/b ₀	c/c ₀	C (%)	E (%)
2,492	100,00	100,00	100,00	96,17	95,02
1,971	97,23	95,37	96,98	94,34	94,33
1,587	95,03	92,38	92,66	93,50	93,34
1,254	92,43	88,67	90,91	92,26	93,20
0,994	91,02	85,71	88,08	90,57	92,12
0,779	88,77	83,64	85,65	90,61	92,05
0,586	86,98	83,03	84,38	91,80	92,62
0,448	85,73	81,37	83,27	91,28	92,48
0,329	84,76	81,04	82,67	91,96	92,84
0,200	84,31	79,91	81,61	91,15	92,33
0,132	83,32	79,56	81,18	91,84	92,77

Analisando-se a Tabela 3, verifica-se que houve redução dos valores das propriedades físicas, esfericidade e circularidade, pelas alterações não-homogêneas das características dimensionais do fruto de mamona com a redução do teor de água. Dados constantes na Tabela 3 demonstram que, mesmo reduzindo, os valores de esfericidade e circularidade mantiveram-se acima de 90%, comprovando que os frutos de mamona podem ser classificados como esféricos, independente do teor de água que apresentem. Resultados semelhantes foram obtidos por Corrêa et al. (2002) para frutos de café da variedade Conilon.

Na Tabela 4, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R²), erro médio relativo (P), erro-padrão da estimativa (SE) e a tendência da distribuição de resíduos para os modelos utilizados para se avaliar a contração volumétrica da massa de frutos de mamona durante a secagem.

De acordo com a Tabela 4, observa-se que somente os modelos de Bala e Woods (1984) modificado e o modelo polinomial de segundo grau obtiveram distribuição aleatória de seus resíduos. Desta forma, somente estes dois modelos podem ser recomendados para prever o fenômeno da contração volumétrica da massa de frutos de mamona.

Ainda de acordo com a Tabela 4, pode-se observar que os modelos de Bala e Woods (1984) modificado e o polinomial apresentam os maiores valores do

coeficiente de determinação (R^2) e as menores magnitudes do erro médio relativo e erro-padrão da estimativa, comparativamente aos demais modelos analisados. Corrêa et al. (2006), trabalhando com grãos de trigo, constataram que o modelo de Bala e Woods (1984) modificado foi o único a se representar satisfatoriamente à contração volumétrica da massa de grãos. Ribeiro et al. (2005) recomendaram o modelo linear para a representação da contração volumétrica da massa de sementes de soja. Pela sua maior simplicidade, quando comparado ao modelo de Bala e Woods (1984) modificado, o modelo polinomial foi o escolhido para representar a contração volumétrica da massa de frutos de mamona.

Na Figura 3, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, do índice de contração volumétrica da massa de frutos de mamona em função do teor de água. Analisando-se a Figura 20, observa-se que a massa de frutos de mamona teve seu volume reduzido em 63% em relação ao volume inicial, para o teor de água variando de 2,50 a 0,13 (decimal b.s.).

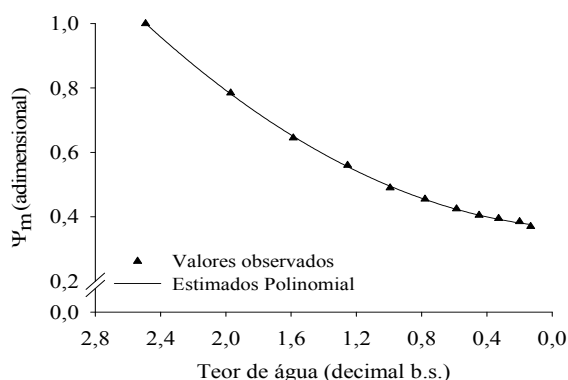


Figura 3. Valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, da contração volumétrica da massa de frutos de mamona.

Na Tabela 5, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro-padrão da estimativa (SE) tendência da distribuição de resíduos para os

modelos utilizados para se avaliar a contração volumétrica unitária dos frutos de mamona durante a secagem. De acordo com a Tabela 5, observa-se que, à exceção dos modelos propostos por Corrêa et al. (2004) e Rahman (1995), todos os demais modelos utilizados para descrever a contração volumétrica unitária dos frutos de mamona apresentaram distribuição aleatória de seus resíduos, podendo representar satisfatoriamente o fenômeno estudado. Além disso, os modelos de Bala e Woods (1984) modificado, linear, exponencial e polinomial apresentaram elevados valores de seus coeficientes de determinação (R^2), além de reduzidas magnitudes do erro médio relativo e erro-padrão da estimativa, comparativamente aos demais modelos analisados. Assim, estes modelos podem ser utilizados para a representação do fenômeno de contração volumétrica unitária das sementes de mamona.

Pela simplicidade e facilidade de interpretação dos seus parâmetros, o modelo polinomial foi o escolhido para representar a contração volumétrica unitária dos frutos de mamona. Afonso Júnior et al. (2003) também utilizaram o modelo polinomial para representar a contração volumétrica de diferentes variedades de frutos de café.

Na Figura 4, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo polinomial, do índice de contração volumétrica unitária dos frutos de mamona em função do teor de água.

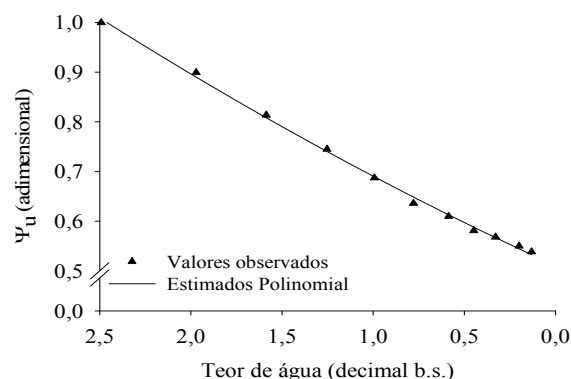


Figura 4. Valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, da contração volumétrica unitária dos frutos de mamona.

Tabela 5. Modelos de contração volumétrica unitária dos frutos de mamona, com seus respectivos valores de coeficiente de determinação – R^2 (%), erro-padrão da estimativa – SE (adimensional), erro médio relativo – P (%) e tendência de distribuição dos resíduos.

Modelos de contração volumétrica	R^2	SE	P	Resíduos
$\psi = 1 - 2,347 \{1 - \exp[-0,001(M_0 - M)]\}$	99,77	0,0078	0,8953	Aleatório
$\psi = \frac{1}{1,698 - 0,062 \exp(M)}$	81,49	0,0698	8,1652	Tendencioso
$\psi = 0,523 \exp(0,268M)$	99,54	0,0111	1,1191	Aleatório
$\psi = 0,498 + 0,199M$	99,61	0,0101	1,2305	Aleatório
$\psi = 0,510 + 0,167M + 0,013M^2$	99,80	0,0077	0,8504	Aleatório
$\psi = 1 + 0,002(M - M_0)$	99,59	0,0098	1,2625	Tendencioso

Analisando-se a Figura 4, observa-se que os frutos de mamona apresentaram 46% de redução do seu volume em relação ao volume inicial, para o teor de água variando de 2,50 a 0,13 (decimal b.s.). Embora o foco principal deste trabalho seja investigar o encolhimento dos frutos de mamona durante o processo de secagem, os resultados encontrados demonstram que a contração volumétrica não deve ser negligenciada durante a modelagem de processos de secagem dos frutos de mamona, resultados estes que concordam com os encontrados por Afonso Júnior et al. (2003) para frutos de café.

Conclusão

A forma dos frutos de mamona é influenciada pela redução do teor de água, promovendo redução dos valores da esfericidade e circularidade com a redução do teor de água; as dimensões características (comprimento, largura e espessura) e o diâmetro geométrico médio dos frutos sofrem redução de suas magnitudes com a redução do teor de água; a redução do teor de água influencia a contração volumétrica unitária e da massa dos frutos de mamona, provocando redução de seus valores em 46,0 e 63,0%, respectivamente; o modelo polinomial, dentre aqueles testados, foi o que melhor representou os fenômenos da contração volumétrica da massa e unitária das sementes de mamona.

Referências

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; PINTO, F. A. C.; SAMPAIO, C. P. Shrinkage evaluation of five different varieties of coffee berries during the drying process. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 4, p. 481-485, 2003.

BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 235-244, 1984.

BELTRÃO, N. E. M.; SILVA, L. C.; VASCONCELOS, O. L.; AZEVEDO, D. M. P.; VIEIRA, D. J. Fitologia. In: AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Serviço de Comunicação Tecnológica, 2001. p. 37-61.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; QUEIROZ, D. M.; SAMPAIO, C. P.; CARDOSO, J. B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 466-470, 2002.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; GONELI, A. L. D. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: IDS, 2004. v. A, p. 742-747.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 665-670, 2006.

KHRAISHEH, M. A. M.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v. 34, n. 5, p. 497-503, 2004.

KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN, F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 3, p. 340-349, 2008.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441-2458, 1997.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986.

RAHMAN, S. **Food properties handbook**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1995.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 201-206, 2003.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1, p. 195-203, 2005.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 23, n. 1, p. 91-105, 1994.

RAZAVI, S. M. A.; EMADZADEH, B.; RAFE, A.; AMINI, A. M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 1, p. 209-217, 2007a.

RAZAVI, S. M. A.; RAFE, A.; MOHAMMADI MOGHADDAM, T.; AMINI, A. M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part II. Gravimetric properties. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 1, p. 218-225, 2007b.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 1, p. 15-24, 2005.

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo

de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 3, p. 611-617, 2005.

SILVA, O. R. R. F.; CARVALHO, O. S.; SILVA, L. C. Colheita e descascamento. In: AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Serviço de Comunicação Tecnológica, 2001. p. 337-350.

SOKHANSANJ, S.; LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, n. 2, p. 129-136, 1996.

TOWNER, G. D. The tensile stress generated in clay through drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 37, n. 3-4, p. 279-289, 1987.

Received on October 28, 2008.

Accepted on March 17, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.