

DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE ABÓBORA

Ednilton Tavares de Andrade ¹, Luciana Pinto Teixeira ², Jéssica Zimmermann Espíndola ³,
Vitor Gonçalves Figueira ⁴, Ivenio Moreira da Silva ⁵

¹ Engenheiro Agrícola e Doutor em Engenharia Agrícola, DEG, UFLA, (35) 91952070, edniltontavares@gmail.com

² Engenheira Agrícola e Mestre em Engenharia Mecânica, UFF, (21) 982293817, lucianapteixeira@yahoo.com.br

³ Engenheiro Agrícola e Mestre em Engenharia Civil, UFF, (21) 982587964, jzespeindola@gmail.com

⁴ Engenheiro Agrícola Mestrando em Engenharia de Biosistemas, UFF, (21)982587964, figueiravitor@yahoo.com.br

⁵ Agrônomo e Mestre em Engenharia Mecânica, UFF, (21) 26295392, ivenio@vm.uff.br

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: Os grãos de abóbora podem ser utilizados na forma in natura ou processados para o aproveitamento do seu óleo, contudo estes devem ser estabilizados de forma a minimizar a suscetibilidade de deterioração. Para melhor conhecer o comportamento deste produto, o presente estudo objetivou determinar experimentalmente as propriedades físicas dos grãos de abóbora, tais como: tamanho e forma, massa específica e porosidade; e estudar a cinética de secagem dos grãos de abóbora para a velocidade de $0,33 \text{ m.s}^{-1}$, submetidas a diferentes temperaturas do ar de secagem (35, 45, 55, e 70°C), além de ajustar os dados experimentais a diferentes modelos matemáticos representativos da razão de umidade. No que diz respeito à determinação do tamanho e forma dos grãos utilizou-se das características de esfericidade e circularidade, sendo possível verificar que com a diminuição do teor de água, os valores de esfericidade e circularidade também diminuem. Quanto a massa específica e a porosidade, o resultado obtido demonstra que estas características são influenciadas pela contração volumétrica do produto que varia conforme o teor de água. Já, no que diz respeito a cinética de secagem, foi possível verificar que para todas as temperaturas, o Modelo da Aproximação da difusão foi o que melhor representou o fenômeno.

PALAVRAS-CHAVE: abóbora; cinética de secagem; desidratação.

ABSTRACT: The grains of pumpkin can be used in natura or processed for the use of their oil, however they must be stabilized to minimize the susceptibility of deterioration. To better understand the behavior of this product, this study aimed to experimentally determine the physical properties of pumpkin grains, such as size and shape, density and porosity; and the kinetics of drying of the grains of pumpkin to the air velocity of 0.33 m.s^{-1} , subjected to different drying air temperatures (35, 45 , 55, and 70°C), and adjust the experimental data to different mathematical models representative of the ratio of moisture. As regards the determination of the size and shape of the grains was used sphericity and roundness characteristics, it is possible to see that with decreasing moisture content, the values of roundness and sphericity also decreased. As the density and porosity, the result shows that these characteristics are influenced by the shrinkage of the product varies depending on the moisture content. Already, with regard to drying kinetics, was verified that for all temperatures, the Diffusion Approximation model was best represented the phenomenon.

KEYWORDS: pumpkin ; drying kinetics ; dehydration.

INTRODUÇÃO

De acordo com Sant'Anna et al. (2005), a abóbora (*Cucurbita moschata*) é uma planta planta rasteira originária da Ásia tropical, na qual tanto se consome o fruto in natura ou processado, como seus grãos. Os grãos da abóbora são importantes fontes de proteínas (32 a 40%), lipídios (44 a 50%) e fibras (23 a 27%), ricos em ácidos graxos, mono e poli-insaturados, podendo ser utilizados tostados, ou como matéria prima para a produção de óleo (Trucom, 2006; Sant'anna, 2005).

No que envolve o processamento desses produtos, o conhecimento a respeito das propriedades físicas dos grãos e sementes são de relevante importância na otimização de processos, na regulação, construção e operação de equipamentos, e no desenvolvimento de novos projetos envolvendo o processamento de produtos agrícolas (Borém, 2008). Além disso, estas características são determinantes para análises relacionadas com os fenômenos de transferência de calor e massa durante a secagem e armazenamento de produtos (Franceschini et al., 1996; Goneli et al., 2003; Benedetti, 1987); e para a manutenção da qualidade do óleo no interior do grão (Oetterer et al., 2006).

Segundo Pabis et al. (1998), para a especificação teórica da irregularidade dos formatos dos grãos e sementes é necessário o conhecimento das dimensões dos três eixos ortogonais, o comprimento como maior eixo, a espessura como menor eixo, e a largura como eixo médio de cada grão ou semente. A relação entre esses três eixos ortogonais possibilita a determinação das características de circularidade (C), e a esfericidade (Es) (Mohsenin, 1986).

A esfericidade corresponde ao quanto o formato de um produto se aproxima ao de uma esfera de mesmo volume (Firmino et al., 2010). Outra importante mensuração é a circularidade que equivale a medida da agudez dos cantos de um objeto (Pabis & Jaya, 1998). De acordo com Firmino et al. (2010), a caracterização da circularidade tem como finalidade indicar o quanto a forma do produto em repouso se aproxima de um círculo.

De acordo com Couto et al. (1999), a massa específica e a porosidade existente na massa de grãos são parâmetros relevantes no que envolve a comercialização do produto e dimensionamento eficiente de estruturas de recepção, beneficiamento e armazenamento.

De acordo com Mohsenin (1972), a massa específica é a razão entre a massa e o volume ocupado por esse objeto, podendo ser real ou aparente. A diferença é que a massa específica aparente, também chamada de densidade de Bulk, inclui o volume dos espaços vazios existentes entre um grão e outro, enquanto a massa específica real ou unitária considera apenas o volume ocupado pela massa de grãos, desconsiderando os espaços vazios. Já, os espaços intergranulares envolvidos na determinação da massa específica aparente recebe o nome de porosidade. Segundo Pabis & Java (1998), a porosidade equivale a relação entre o volume de espaços intergranulares e o volume total ocupado pela massa de grãos.

Segundo Okada et al. (2002), o processo de secagem ocorre a partir da remoção de água ou qualquer outro líquido da parte sólida, por evaporação, por meio da utilização de temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido. Operacionalmente, segundo Andrade et al. (2008), o processo de secagem se desenvolve por meio da passagem de um fluxo de ar, preferencialmente aquecido, pelo produto, induzindo a formação de um gradiente de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ambiente, e, por conseguinte, entre a superfície do produto e seu interior.

Para a verificação do comportamento do produto ao longo do tempo, durante a secagem, Corrêa et al., (2001) e Andrade et al. (2008) indicam a análise da taxa de redução de água, que representa a variação da massa de água, em relação a massa seca e a variação do tempo de processo

Dessa forma, o trabalho objetivou determinar circularidade, esfericidade, massa específica real e aparente e a porosidade da massa de grãos de abóbora; assim como realizar o estudo de cinética de secagem e taxa de redução de água dos mesmos.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal Fluminense. Para as análises foram utilizados grãos de abóbora obtidos a partir dos frutos da abóbora adquiridos em comércio local. Inicialmente, os grãos foram, manualmente, separados da polpa, e rapidamente lavados para a máxima retirada de resíduos, de forma a se obter um material composto apenas pelos grãos de abóbora, e menos suscetível a deterioração. Em seguida, esse material foi espalhado em uma peneira, e deixado exposto no ambiente para a eliminação de água da sua superfície. Para as análises, o produto foi umedecido à diferentes teores de água, sendo, em seguida, armazenado em refrigerador até o momento do seu uso. Os teores de água utilizados foram 0,096; 0,274; 0,633; e 0,997, em base seca.

Para determinação das dimensões e forma dos grãos de abóbora foram utilizadas amostras representativas, contendo 100 grãos para cada teor de água. A metodologia utilizada baseou-se nos princípios da projeção, indicada por Mohsenin (1986). Contudo, no lugar de um projetor para a projeção dos grãos, as mesmas foram dispostas, em função do teor de água, sobre a mesa de digitalização de um scanner comercial de alta resolução.

A partir da imagem e por meio do programa AutoCad 2012, foram determinadas a área projetada, o comprimento (a), e a largura (b), respectivamente, maior eixo, e eixo médio de cada grão. Já, a espessura, foi medida por meio de um paquímetro digital, para então ser realizada a determinação da circularidade e esfericidade. A partir desses dados empíricos, a esfericidade e a circularidade foram determinadas, respectivamente, através das Equações 1 e 2.

$$Es = \frac{d_e}{d_c} \quad (1)$$

$$C = \left(\frac{A_p}{A_c} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que, d_e é o diâmetro do maior círculo inscrito no produto; d_c é o diâmetro gerado a partir da menor círculo circunscrito pelo produto; C equivale a circularidade, em %; A_p é a área projetada do objeto em repouso, em mm^2 ; e A_c corresponde a área do menor círculo circunscrito, em mm^2 .

A massa específica foi determinada experimentalmente por meio da análise dos grãos de abóbora com diferentes teores de água trabalhados. Inicialmente, foi determinada a massa específica aparente. Para isto foi utilizada uma proveta graduada, a qual se inseriu a massa de grãos até que estes atingissem a marca de 100 mL. Em seguida o material foi pesado, em uma balança com precisão de duas casas decimais, desconsiderando-se o peso da proveta. Para cada teor de água foram realizadas 3 repetições. Para o cálculo da massa específica aparente foi utilizada a Equação 3.

$$\mu_a = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Em que, μ_a é a massa específica aparente, em g mm^{-3} ; e V é o volume da massa incluindo os espaços vazios, em mm^3

Para a determinação da massa específica real, aproveitou-se do mesmo sistema utilizado para a determinação da massa específica aparente. Para esta análise procedeu-se a introdução de um líquido até que este cobrisse toda a massa de grãos, de forma que a valoração do volume ocupado apenas por grãos se desenvolvesse em função da diferença de volume do líquido introduzido. Então, utilizou-se mais uma proveta apenas com o líquido, onde, por diferença de volume, determinou-se o volume do líquido introduzido, logo o volume ocupado pela massa de grãos. O líquido utilizado foi o óleo de soja refinado e oriundo do comércio local. Para o cálculo da massa específica unitária foi utilizada a Equação 4.

$$\mu = \frac{m}{V_g} \quad (4)$$

Em que, μ é a massa específica unitária, em g mm^{-3} ; m é a massa do produto, em g; e V_g é o volume da massa de grãos, em mm^3 .

Assim como indicado por Mohsenin (1986), a porosidade foi determinada pelo método direto. Este método se baseia na mesma metodologia utilizada para a determinação da massa específica real, contudo o foco da determinação se baseia no volume do líquido na proveta de complementação. Para o cálculo da porosidade foi utilizada a Equação 5.

$$\varepsilon = 100 \times \left(\frac{V - V_g}{V} \right) \quad (5)$$

Em que, ε é a porosidade, em porcentagem.

Para uma melhor determinação do comportamento da massa específica aparente e da porosidade, os dados experimentais foram modelados (Equação 6 e 7) de acordo com a metodologia indicada por Andrade et al. (2011), cujos parâmetros foram determinados por meio dos programa STATISTICA, versão 5.0 (STATSOFT, 2004).

$$\mu_{a \text{ estimada}} = A (U)^3 + B (U)^2 + C (U) + D \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{calculada}} = A (U)^3 + B (U)^2 + C (U) + D \quad (7)$$

Em que $\varepsilon_{\text{calculada}}$ é a porosidade calculada, em porcentagem; A, B, C, D são os parâmetros que dependem da natureza do produto, adimensional; e U é teor de água do produto, em base seca.

Para o desenvolvimento do processo de secagem, os grãos de abóbora foram dispostos em bandejas de alumínio, e durante todo o processo. Para a determinação da variação de massa, o sistema contendo bandejas e grãos foram periodicamente pesados. Durante a realização do experimento, todo o processo de secagem ocorreu com a temperatura média do ar ambiente de aproximadamente 21°C, e uma umidade relativa do ambiente de, aproximadamente, 40%. O teor de água inicial das amostras era de 0,88 em b.s. Para a análise da cinética de secagem foram utilizadas as temperaturas de 35, 45, 55, e 70°C.

Para a determinação dos teores de água de equilíbrio do produto foi utilizado o Modelo de Copace com parâmetros estimados para os grãos de abóbora (Equação 8).

$$U_e = \exp [-3,40 -(0,005 \cdot T) + (3,17 \cdot a_w)] \quad (8)$$

Em que, U_e - Teor de água do produto, b.s.; a_w é a atividade de água, decimal; T é a temperatura do ar ambiente, °C.

Para a determinação da razão de umidade dos grãos de abóbora, para as diferentes condições de secagem foi utilizada a Equação 2 (BROOKER, 1992).

$$RU = \frac{U_\theta - U_e}{U_i - U_e} \quad (9)$$

Em que, RU - razão de umidade do produto, adimensional; U_θ - teor de água da banana no tempo θ (b.s.); U_i - teor de água inicial (b.s.); U_e - teor de água de equilíbrio (b.s.).

Para o estudo de descrição do fenômeno de cinética de secagem e as isotermas envolvidas, foram utilizados os modelos semiempíricos dispostos na Tabela 1 (Corrêa et al., 2007; Doymaz, 2006; Mohapatra & Rao, 2005; Lahsani et al., 2004; Midilli et al., 2002; Panchariya et al., 2002; Ozdemir & Devres, 1999).

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de cinética de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Equação	Eq.
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(10)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(11)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	(12)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$	(13)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	(14)
Logarítmico	$RU = a \exp(-kt) + c$	(15)
Midilli	$RU = a \exp(-kt^n) + bt$	(16)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	(17)
Thompson	$RU = \exp((-a(a^2 + 4bt)^{0,5})/2b)$	(18)
Verna	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kt)$	(19)

Em que, k, k_0 , k_1 : constantes de secagem, h^{-1} ; e a, b, c, n: coeficientes dos modelos.

Neste estudo, para a análise de representatividade dos dados aos modelos propostos, os dados experimentais são comparados com os valores estimados por cada modelo, verificando-se a representatividade de cada um. Para isto foram estimados o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de erro médio relativo (P), e o erro médio estimado (SE) de acordo, respectivamente com as Equações 20 e 21.

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum (|Y - \hat{Y}| / Y) \quad (20)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (21)$$

Em que, Y é o valor observado experimentalmente; \hat{Y} é o valor calculado pelo modelo; GLR é o grau de liberdade do modelo, N equivale ao número de repetições.

Para a verificação do comportamento do produto ao longo do tempo, foi analisada a taxa de redução de água, que representa a variação da massa de água, em relação a massa seca e a variação do tempo de processo (Equação 22).

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{M_s (t_i - t_0)} \quad (22)$$

Em que, a TRA equivale a taxa de redução de água, em $\text{kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$; Ma_0 é a massa de água total anterior, em kg; Ma_i é a massa de água total atual, em kg; M_s é a matéria seca, em kg; t_0 é o tempo total de secagem anterior, em horas; e t_i é o tempo total de secagem atual, em horas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da obtenção das dimensões médias de comprimento, altura e espessura para cada teor de água foram, então mensurados, respectivamente, o maior círculo inscrito e o menor círculo circunscrito, para a determinação, respectivamente, das propriedades de circularidade e esfericidade (Tabela 2). A espessura média para todos os teores de água foi de 2,65 mm.

TABELA 2. Dimensões médias do comprimento e largura, área projetada, circularidade e esfericidade para grãos de abóbora.

Teor de água (b.s.)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área projetada (mm^2)	Circularidade (adimensional)	Esfericidade (%)
0,096	14,231	8,715	8,814	13,8538	0,6150
0,274	14,141	8,863	9,731	15,4897	0,6267
0,633	14,205	9,002	10,648	16,7976	0,6338
0,997	14,702	9,613	11,565	17,0319	0,6539

Por meio dos resultados é possível verificar que a medida que o teor de água do produto aumenta, ocorre o aumento da largura, área projetada, e esfericidade, contudo o mesmo não é observado para o comprimento. De acordo com os resultados, o comprimento sofre menor influência da variação do teor de água. Possivelmente isto ocorre em razão das tensões internas do próprio grão.

Também é possível verificar que as características de circularidade e esfericidade são influenciadas pelo teor de água do produto, pois a medida que o teor de água do produto diminui, os valores de esfericidade e circularidade também diminuem. Resultados semelhantes foram observados para sementes de feijão (Resende et al., 2005) e semente de algodão (Ozarslan, 2002).

Os valores encontrados para a massa específica aparente, massa específica real, e porosidade dos grãos de abóbora, para cada teor de água analisado, estão presentes na Tabela 3.

TABELA 3. Massa específica e porosidade dos grãos de abóbora para diferentes teores de água.

Teor de água (b.s.)	Massa específica (kg m^{-3})		Porosidade (%)
	Aparente	Real	
0,096	344,39	647,32	48,36
0,274	310,65	349,73	51,36
0,487	300,56	331,76	50,77
0,633	347,11	457,94	49,90
0,997	408,15	494,58	48,88

De acordo com os resultados, é possível verificar que o teor de água influencia tanto na massa específica como porosidade. O comportamento da massa específica, a qual se verifica inicialmente um alto valor que depois diminui e posteriormente volta a aumentar, ocorre em razão da interação da contração volumétrica e do teor de água, assim como o verificado por Andrade et al. (2011). A Figura 1 apresenta os valores de massa específica aparente e porosidade determinados experimentalmente e os calculados.

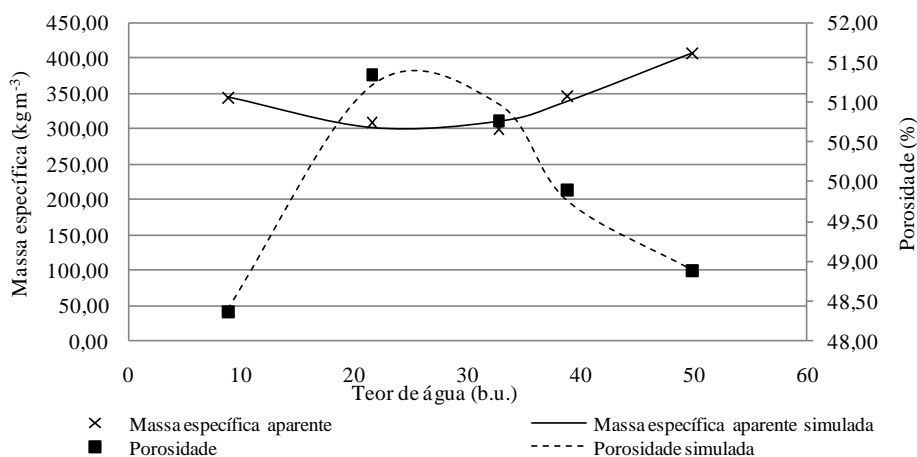


FIGURA 1. Massa específica aparente e porosidade experimental e estimada.

Para melhor análise do comportamento da massa específica aparente e porosidade foi realizada a modelagem matemática (Equações 23 e 24).

$$\mu_{a \text{ estimada}} = -478,09(U)^3 + 1220,57(U)^2 - 629,62(U) + 396,13 \quad (23)$$

Para a equação representativa da massa específica aparente, o R^2 , P e SE foram, respectivamente, 96,59 %, 1,80% e 8,99 sendo $A = -478,09$; $B = 1220,57$, $C = -629,62$, e $D = 396,13$.

$$\varepsilon_{\text{estimada}} = 43,40 (U)^3 - 80,42 (U)^2 + 40,75 (U) + 45,20 \quad (24)$$

Já, para a equação representativa da porosidade, o R^2 , P e SE foram, respectivamente, 98,67%, 0,21% e 0,17, sendo $A = 43,40$, $B = -80,42$, $C = 40,75$, $D = 45,20$.

De acordo com os resultados obtidos, os modelos aplicados respectivamente à porosidade e a massa específica descrevem satisfatoriamente o comportamento dos grãos de abóbora, tendo como coeficientes de determinação superiores a 98% e erros médios relativos inferiores a 10%.

No que diz respeito ao comportamento do produto, é possível perceber que a medida que há a diminuição da massa específica, há o aumento da porosidade da massa de grãos. Este mesmo comportamento é verificado para os grãos de pinhão manso (Andrade et al., 2011).

O processo de secagem procedeu com ajuste do secador para as respectivas temperaturas de análise, onde a amostra era periodicamente pesada para quantificar a perda de água em relação ao tempo decorrido. Dessa forma foi possível determinar o comportamento do teor de água do grão de abóbora em função do tempo e da temperatura utilizada (Figura 2).

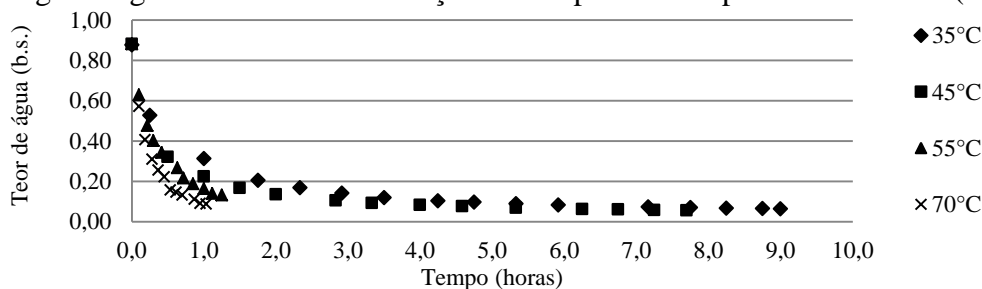


FIGURA 2. Redução do teor de água médio dos grãos de abóbora em função do tempo e da temperatura utilizada para a análise.

O processo de secagem dos grãos de abóbora foi realizado até o momento em que o produto atingisse um teor de água de aproximadamente 10%, em base úmida, para cada temperatura do ar de secagem especificada. A Tabela 4 apresenta os dados médios referentes a temperatura, umidade relativa do ar, tempo e taxa de redução de água para os diversos tratamentos de secagem.

TABELA 4. Temperatura, umidade relativa do ar, tempo e taxa de redução de água dos grãos de abóbora.

Teor de água inicial (b.s.)	Teor de água final (b.s.)	Temperatura de secagem (°C)	Umidade relativa média do ar de secagem (%)	Tempo de secagem (horas)	TRA Média (kgkg ⁻¹ h ⁻¹)
0,88	0,10	35	16,63	4,75	0,135
0,88	0,08	45	9,76	4,00	0,125
0,88	0,13	55	5,42	1,25	0,667
0,88	0,07	70	3,18	1,25	0,673

Na Figura 2 e de acordo com a Tabela 4 é possível verificar que o aumento da temperatura de secagem promove uma elevação nas taxas de redução de água. Entre as temperaturas de 35 e 45°C e de 55 e 70°C verifica-se que não há grande diferença na taxa de redução de água, sendo, ainda, verificado para o primeiro caso que há uma pequena queda na taxa de redução de água, que deve ter ocorrido em razão da diferença de teor de água final do produto. Contudo, quando se comparam as taxas de redução de água para as temperaturas de 45 e 70°C constata-se uma acentuada diferença, logo a temperatura de secagem influencia a cinética de secagem dos grãos de abóbora.

A partir dos dados de secagem obtidos experimentalmente para os grãos de abóbora foi analisada a representatividade dos modelos matemáticos descritos na Tabela 1. Para determinação da razão de umidade dos grãos de abóbora, para as diferentes condições de secagem, utilizou-se a Equação 8. A umidade relativa do ar de secagem foi determinada por meio do programa *GRAPSI* (Melo et al., 2004), que correlaciona a temperatura e umidade relativa do ambiente com a temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Na Tabelas 5 estão apresentados os resultados das estimativas relacionadas às análises dos modelos de cinética de secagem para os grãos de abóbora para as temperaturas de 35, 45, 55, e 70°C.

TABELA 5. Parâmetros estimados, coeficientes de determinação, e erros médios relativo e estimado para os modelos analisados para a secagem dos grãos de abóbora.

Modelos	35°C							R ²	P (%)	SE (decimal)
	A	B	C	K	K0	K1	n			
Aproximação da difusão	0,6593	12,7290	-	0,8766	-	-	-	99,99	3,93	0,01
Dois termos	0,4636	0,4636	-	-	1,2997	1,2997	-	96,67	34,74	0,09
Exponencial de dois termos	0,2048	-	-	5,6650	-	-	-	98,31	27,27	0,11
Henderson e Pabis	0,9272	-	-	1,2997	-	-	-	96,67	34,74	0,16
Henderson e Pabis modificado	0,3091	0,3091	0,391	1,2997	1,2997	1,2997	-	96,67	34,74	0,07
Logarítmico	0,8912	-	0,0715	1,8795	-	-	-	97,93	39,99	0,09
Midlli	0,7936	-0,2104	-	0,2764	-	-	0,0000	87,30	124,74	0,18
Page	-	-	-	1,3892	-	-	0,6371	99,83	14,42	0,04
Thompson	0,1984	0,0442	-	-	-	-	-	72,90	150,18	0,45
Verna	0,1000	-	-	1,4647	-	-	-	95,87	43,11	0,18
Modelos	45°C							R ²	P (%)	SE (decimal)
	A	B	C	K	K0	K1	n			
Aproximação da difusão	0,5106	49,3332	-	1,1339	-	-	-	99,99	5,39	0,00
Dois termos	0,4941	0,4941	-	-	2,0986	2,0986	-	98,59	43,10	0,06
Exponencial de dois termos	0,3049	-	-	5,2880	-	-	-	99,38	27,92	0,07
Henderson e Pabis	0,9883	-	-	2,0986	-	-	-	98,59	43,10	0,10
Henderson e Pabis modificado	0,3294	0,3294	0,3294	2,0986	2,0986	2,0986	-	98,59	43,10	0,04
Logarítmico	0,9449	-	0,0512	2,5459	-	-	-	99,40	48,00	0,05
Midlli	0,7595	-0,2700	-	0,3753	--	-	0,0000	78,47	315,70	0,22
Page	-	-	-	1,8704	-	-	0,6148	99,95	16,33	0,02
Thompson	0,2072	0,0386	-	-	-	-	-	59,65	246,19	0,53
Verna	0,1000	-	-	2,1207	-	-	-	98,57	43,48	0,10
Modelos	55°C							R ²	P	SE
	Parâmetros									

	A	B	C	K	K0	K1	n	(%)	(decimal)	
Aproximação da difusão	0,6848	5,9009	-	1,7367	-	-	-	99,92	3,05	0,02
Dois termos	0,4654	0,4654	-	-	2,3646	2,3646	-	97,95	16,03	0,08
Exponencial de dois termos	0,2183	-	-	9,3089	-	-	-	99,45	8,49	0,07
Henderson e Pabis	0,9307	-	-	2,3646	-	-	-	97,95	16,03	0,13
Henderson e Pabis modificado	0,3102	0,3102	0,3102	2,3646	2,3646	2,3646	-	97,95	16,03	0,06
Logarítmico	0,8819	-	0,0900	3,2536	-	-	-	99,25	9,14	0,06
Midlli	2,6157	-0,0940	-	3,4058	-	-	0,6027	99,63	78,74	0,98
Page			-	2,1069	-	-	0,7466	99,89	2,90	0,03
Thompson	0,1838	0,0280	-	-	-	-	-	53,11	78,01	0,63
Verna	0,1000	-	-	2,5811	-	-	-	97,13	20,85	0,15

70°C

Modelos	Parâmetros							R ²	P (%)	SE (decimal)
	A	B	C	K	K0	K1	n			
Aproximação da difusão	0,5840	3,3383	-	2,6797	-	-	-	99,88	4,83	0,02
Dois termos	0,4821	0,4821	-	-	3,8746	3,8746	-	99,09	24,79	0,06
Exponencial de dois termos	0,2815	-	-	10,9429	-	-	-	99,83	9,84	0,04
Henderson e Pabis	0,9642	-	-	3,8746	-	-	-	99,09	24,79	0,10
Henderson e Pabis modificado	0,3214	0,3214	0,3214	3,8746	3,8746	3,8746	-	99,09	24,79	0,04
Logarítmico	0,9462	-	0,0359	4,4150	-	-	-	99,57	13,18	0,05
Midlli	2,6996	-0,0952	-	3,3761	-	-	0,3829	99,59	57,64	0,98
Page			-	3,2643	-	-	0,8180	99,85	5,80	0,04
Thompson	0,2102	0,0250	-	-	-	-	-	39,73	188,61	0,79
Verna	0,1000	-	-	4,0240	-	-	-	98,94	27,84	0,11

De acordo com Mohapatra e Rao (2005) e Lomauro et al. (1985), e considerando a análise dos resultados da Tabela 5, é possível verificar que para todas as temperaturas, o Modelo da Aproximação da difusão foi o que melhor representou o fenômeno. Para as temperaturas de 35, 45, 55, e 70 °C, este modelo apresentou, respectivamente, coeficientes de determinação de 99,99, 99,99, 99,92, e 99,88%, erros médios relativos de 3,93, 5,39, 3,05, e 7,83%, e erros médios estimados de 0,01, 0,00, 0,02, e 0,03. As Equações de 25 a 28 apresentam os melhores modelos de cinética de secagem para os grãos de abóbora, respectivamente, para as temperaturas de 35, 45, 55, e 70 °C.

$$RU = 0,6593 \times (\exp(-0,8766 \times t) + (1 - 0,6593) \times (\exp(-0,8766 \times 12,7290 \times t))) \quad (25)$$

$$RU = 0,5106 \times (\exp(-1,1339 \times t) + (1 - 0,5106) \times (\exp(-1,1339 \times -49,3332 \times t))) \quad (26)$$

$$RU = 0,6848 \times (\exp(-1,737 \times t) + (1 - 0,6848) \times (\exp(-1,7367 \times 5,9009 \times t))) \quad (27)$$

$$RU = 0,5840 \times (\exp(-2,6797 \times t) + (1 - 0,5840) \times (\exp(-2,6797 \times 3,3383 \times t))) \quad (28)$$

Os modelos Exponencial de dois termos e Page para as temperaturas de 55 e 70 °C, e o modelo Logarítmico para 55°C também podem ser utilizados para a representação do fenômeno de cinética de secagem de grãos de abóbora visto que apresentam coeficientes de determinação superior a 99,25 e P e SE inferiores a 2,90% e 0,03. Já para as temperaturas do ar de secagem de 35 e 45°C apenas o modelo de Aproximação da difusão se adequou aos dados experimentais.

Para uma melhor verificação da representatividade do modelo, ao fenômeno da cinética de secagem, foi analisada a taxa de redução de água utilizando-se a Eq. 20, para descrever a perda de água por unidade de matéria seca por unidade de tempo.

Em função da análise da Figuras 3 foi possível verificar que a taxa de redução de água varia conforme a alteração da temperatura do ar de secagem. Quando há uma elevação na temperatura do ar de secagem ocorre um aumento na taxa de redução de água. A Figura 3 apresenta as curvas referentes à taxa de redução de água e à razão de umidade experimental e simulada.

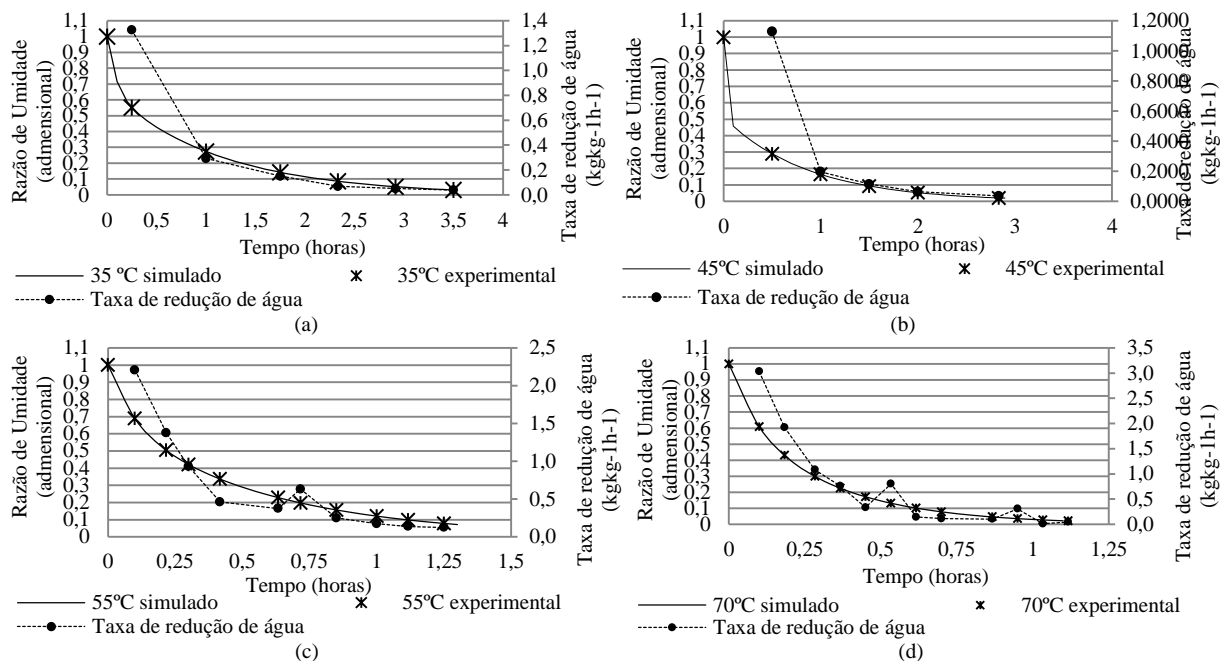


FIGURA 3 - Curvas de razão de umidade, experimental e simulada, e taxa de redução de água do dos grãos da abóbora para temperatura de 35°C (a), 45°C (b), 55°C (c), e 70°C (d).

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesse estudo é possível verificar que as características de massa específica, porosidade, circularidade e esfericidade sofrem influencia direta do teor de água presente nos grãos de abóbora.

A medida que o teor de água do produto diminui, os valores de esfericidade e circularidade também diminuem. Já, esta proporcionalidade no comportamento não se verifica para o caso da massa específica e porosidade, cujo teor de água influencia na contração volumétrica do produto.

Em função das particularidades no comportamento do grão de abóbora no que diz respeito a massa específica e porosidade, os modelos propostos predizem satisfatoriamente o comportamento do produto, possibilitando sua utilização para a determinação dessas características no dimensionamento, regulagem e projetos de equipamentos.

Para o estudo de cinética de secagem, o modelo da Aproximação da Difusão apresentou excelente representatividade, descrevendo adequadamente o processo de cinética de secagem dos grãos de abóbora. Em relação a taxa de redução de água, esta varia conforme em função da temperatura do ar de secagem; sendo que quando há uma elevação na temperatura do ar de secagem ocorre um aumento na taxa de redução de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E.T.; BORÉM F.M. Modelagem Matemática e Simulação Aplicados na Secagem do Café-Lavras- Ed. UFLA. p. 303-347.2008.
- ANDRADE, E. T.; BRASIL, J. M.; TEIXEIRA, L. P.; BRAZ, A. J. L.; FREIXO, N. S.; ARAUJO, P. M. Determinação das propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). XIII Semana de Engenharia da UFF. VII Seminário Fluminense de Engenharia. Niterói – RJ. 2011.
- BENEDETTI, B. C. Influência do teor de água sobre propriedades físicas de vários grãos. 125p. Dissertação de Mestrado. FEAGRI. UNICAMP, Campinas-SP. 1987.
- BORÉM, F. M. Pós colheita do café. Lavras: UFLA. 630p. 2008.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport : AVI, 450 p. 1992.

CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. *Ciência e Agrotecnologia*. Lavras, v.25, n.1, p.134-142. 2001

CORRÊA, P.C.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Obtenção e modelagem das isotermas de desorção e do calor isotérico de desorção para grãos de trigo. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, p.39-48, 2007.

COUTO, S. M; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M.; BASTOS, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.61-68, Campina Grande, 1999.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.74, n.3, p.370-375, 2006.

FIRMINO, P. T.; WANDERLEY JÚNIOR, J. S. A.; SILVA, A. C.; SANTOS, D. C.; SANTOS, F. N. Determinação das propriedades físicas de sementes de pinhão manso. In. IV Congresso Brasileiro de Mamona & I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas. 2010. João Pessoa – PB. Inclusão Social e Energia: Anais... Campina Grande: Embrapa Algodão. p. 2025-2030.2010.

FRANCESCHINI, A.S.; CORRÊA, P.C.; RAMOS, M.G. Determinação de algumas propriedades físicas do milho, híbrido BR-201. *Rev. Bras. de Armaz., Viçosa, MG*, v. 21, n. 1, p. 22-27, 1996.

GONELI, A.L.D., CORRÊA P.C., SILVA, F. S., MIRANDA, G.V. Efeito do teor de impurezas nas propriedades físicas de sementes de milho. *Resumos do 32º Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola, Goiânia*. p. 77. 2003.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, London, v.61, n.2, p.173-179, 2004.

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, Vegetable and meat products. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, Zurich, v.18, n.2, p.111-117, 1985.

MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. . GRAPSI - Programa Computacional para o Cálculo das Propriedades Psicrométricas do Ar. *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, v. 12, n.2, p. 145-154, 2004.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*, v.20, p.1503-1513, 2002.

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

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

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal material. Gordon and Breach Science Publishers. New York. 2 ed, 742p. 1978.

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers. 841p. 1986

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Barueri, SP: Manole, 612. 2006.

Okada et al. (2002),

OZARSLAN, C. Physical Properties of Cotton Seed. *Biosystems Engineering*, v.83, n.2, p.169-174, 2002.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, v. 42, n. 04, p. 225-233, 1999.

PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. Grain drying: theory and practice. New York: John Wiley & Sons, Inc. 303p. 1998.

Panchariya et al., 2002;

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*, Campina Grande, v.7, n.1, p.15-24. 2005.

SANT'ANNA, L. C. Avaliação da composição físico-química da semente de abóbora (*Curcubita pepo*) e do efeito do seu consumo sobre o dano oxidativo hepático de ratos (*Rattus norvegicus*). 2005. 69. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2005.

STATSOFT. Statistica for Windows computer program manual. Tulsa: StatSoft, 2004. Disponível em: < <http://www.statsoft.com/#>>. Acessado em Junho de 2011.

TRUCOM, C. A importância da linhaça na saúde. 1.ed. São Paulo: Alaúde. 152p. 2006.