

Transferência de massa na secagem infravermelho de sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)

M. L. Silva Neto; M. M. Prado; L. G. Marques

Departamento de Engenharia Química/Laboratório de Fenômenos de Transporte/CCET, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil

luanda_gimeno@ufs.br

(Recebido em 12 de dezembro de 2013; aceito em 13 de março de 2014)

Atualmente, o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) vem recebendo especial atenção para produção de biodiesel, uma vez que suas sementes contêm elevado teor de óleo. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem das sementes de pinhão-manso empregando a radiação infravermelha (IV) como método de secagem. As temperaturas da fonte de radiação IV utilizadas foram iguais a 70, 80 e 90°C. O comportamento cinético de secagem IV das sementes de pinhão-manso foi caracterizado por ocorrer apenas no período de taxa decrescente, de modo que as resistências internas, associadas à estrutura da semente, governam o fenômeno de transferência de massa. O modelo difusivo descreveu adequadamente o processo, com desvios relativos médios inferiores a 14%. Negligenciar o encolhimento da partícula levou a uma superestimativa da taxa de transferência de massa por difusão. A dependência da difusividade efetiva de massa com a temperatura foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius.

Palavras-chave: Oleaginosa, Energia renovável, difusividade efetiva.

Mass transfer in infrared drying of jatropha seeds (*Jatropha curcas* L.)

Nowdays, special attention has been directed for *Jatropha curcas* L. aiming the biodiesel production, since their seeds have a high oil content. Thus, the purpose of this work was to study the drying kinetics of jatropha seeds (*Jatropha curcas* L.) using infrared radiation (IR) as drying method. The temperatures of the IR radiation source used in the experiments were 70, 80 and 90°C. The IR drying behavior of jatropha seeds was characterized by the presence of only one falling rate period, thus showing that internal resistances related to seed structure control the mass transfer. The diffusion model adequately described the process, with mean relative deviations lower than 14%. Neglecting shrinkage of the seeds during IR drying led to an overestimation of the mass transfer by diffusion. The temperature dependence of effective mass diffusivity was described using an Arrhenius relationship.

Keywords: Oilseeds, renewable energy, effective diffusion coefficient.

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, o Brasil tem procurado alternativas energéticas que se apresentem economicamente competitivas, ambientalmente admissíveis e que estejam disponíveis em ampla quantidade para a substituição da matriz energética procedente do petróleo¹. Tem-se observado nos últimos anos uma política de valorização das energias renováveis e a sólida participação do álcool, proveniente da cana-de-açúcar, no mercado de combustíveis, e mais recentemente, a implantação de programas governamentais que visam o aperfeiçoamento do biodiesel em toda a cadeia produtiva.

As matérias-primas mais utilizadas para a produção de biodiesel consistem em: óleos vegetais, gordura animal, óleos e gorduras residuais. O pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) é uma oleaginosa com alto potencial para produção do biodiesel. Uma das principais vantagens dessa oleaginosa é que o biocombustível gerado a partir dela é considerado como de segunda geração.

O pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) é uma espécie nativa da América Tropical, mas atualmente é encontrada em muitas regiões tropicais e intertropicais da África, da Ásia e da Austrália², devido à distribuição por portugueses pelas ilhas de Cabo Verde e Guiné Bissau³. O fruto é capsular-ovóide, e possui, em média, de 2,5 a 4 cm de comprimento, com largura variando de 2,0 a 3,0 cm. Contém de 53 a 62% de sementes e de 38 a 47% de casca⁴⁻⁶.

Atualmente, o pinhão-manso tem recebido muita atenção para produção de biodiesel, uma vez que suas sementes contêm entre 25 a 39% de óleo⁶. Esse óleo é incolor, inodoro, muito fluido e fácil de extrair por pressão⁴, não é comestível por possuir componentes tóxicos, mas apresenta todas as qualidades para ser transformado em biodiesel por transesterificação⁷. Possui ainda boa estabilidade de oxidação, comparado ao óleo de soja, baixa viscosidade, se comparado com o óleo da mamona, e baixo ponto de congelamento, se comparado com o óleo de palma⁸.

A secagem é uma operação pós-colheita essencial para a preservação de sementes de oleaginosas, como o pinhão manso. A redução do teor de umidade a níveis adequados inibe a atividade de microorganismos e insetos, reduz o risco de reações enzimáticas e oxidativas que podem comprometer a qualidade do óleo contido nas sementes, aumentando o tempo de conservação e a vida útil do produto. Ademais, melhora a eficiência das operações de moagem e extração, garantindo ainda um armazenamento seguro por um longo período⁹.

A secagem artificial de sementes, geralmente, possui custo superior ao da secagem natural, porém, possibilita um maior controle das condições operacionais do processo e a obtenção de um produto dentro de padrões de qualidade pré-estabelecidos, sem os riscos de contaminação que a secagem natural oferece ao ar livre.

Novas e/ou inovadoras técnicas que aumentem as taxas de secagem e assegurem a qualidade do produto têm recebido considerável atenção na literatura¹⁰. Neste sentido, as tecnologias que fazem uso do fornecimento de energia eletromagnética têm se mostrado, particularmente, vantajosas para a operação de secagem quando comparadas à secagem convectiva¹¹.

Dentre as tecnologias radiantes, o uso da radiação infravermelho para a secagem de produtos agrícolas tem sido investigada por vários pesquisadores¹²⁻¹⁵, que apontam como suas principais vantagens: (a) simplicidade do equipamento requerido; (b) fácil incorporação do aquecimento IV com outros métodos de aquecimento (convectivo, condutivo e microondas); (c) o fácil direcionamento da fonte de calor e transferência da energia eletromagnética na região do infravermelho para a superfície do material sem aquecimento do ar; (d) a obtenção de altas taxas de transferência de calor com aquecedores compactos; (e) a reduzida necessidade de uma alta velocidade do ar, minimizando o contato do material submetido à secagem com o oxigênio; (f) a alta qualidade dos produtos finais e, (g) a significativa economia de energia.

Entre os fatores envolvidos no projeto de secadores IV, uma adequada predição das taxas de secagem é requerida. Esta informação é usualmente obtida a partir de estudos de secagem em camada fina, que possibilita o conhecimento da cinética de secagem do material em condições controladas do processo, fornecendo informações úteis sobre os mecanismos de transporte de umidade, a influência das condições operacionais sobre o comportamento de secagem e definição das condições de secagem ótimas para a preservação da qualidade das sementes. Vários trabalhos têm sido publicados sobre a secagem IV de grãos, sementes e outros produtos agrícolas em camada fina. Entretanto, nenhuma informação sobre a aplicação da radiação IV para a secagem de sementes de pinhão-manso encontra-se disponível na literatura.

Modelos de secagem em camada fina são necessários para a análise da secagem IV de sementes de pinhão-manso. A simulação do processo é uma ferramenta valiosa para a predição e otimização do desempenho do secador, tendo em vista, subsequentemente, reduzir o tempo e o consumo de energia. Na literatura encontram-se disponíveis diversos modelos teóricos, semiempíricos e empíricos descrevendo a secagem em camada fina. No caso da secagem de grãos e sementes, modelos teóricos baseados na teoria da difusão têm sido bastante utilizados¹⁶⁻¹⁸.

O modelo teórico baseado na segunda lei de Fick é amplamente empregado para descrever o mecanismo de migração de umidade no interior de sólidos durante o período de taxa decrescente do processo de secagem¹³. Para a descrição da secagem de grãos e sementes, as seguintes hipóteses são normalmente adotadas: o grão é considerado uma partícula esférica de raio R ; o teor de umidade inicial (X_0) do grão é uniforme; a transferência de massa é, predominantemente, difusiva; ocorre a difusão radial simétrica; o teor de umidade na superfície da partícula atinge instantaneamente o valor de equilíbrio (X_{eq}) nas condições de temperatura e umidade relativa do processo; a difusividade mássica efetiva (D_{ef}) é constante e o encolhimento negligenciável.

A partir das hipóteses supracitadas, o problema da difusão transiente em coordenadas esféricas é descrito pela equação diferencial e conjunto de condições inicial (C.I.) e de contorno (C.C.) expressos abaixo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\text{C.I.: } t = 0, \quad X(r,t) = X(r,0) = X_0 \quad (2)$$

$$\text{C.C.1: } t > 0, \quad r = 0, \quad \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

$$\text{C.C.2: } t > 0, \quad r = R_0, \quad X(r,t) = X(R,t) = X_{eq} \quad (4)$$

onde X é o teor de umidade local, r é a coordenada radial e t é o tempo. A solução analítica do problema é expressa na forma de uma série de termos:

$$XR = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \exp \left[-j^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{R_0^2} \right] \quad (5)$$

onde XR é o adimensional de umidade, \bar{X} é o teor de umidade médio, R_0 é o raio inicial da esfera e D_{ef} é a difusividade efetiva, sem considerar o encolhimento da partícula. Desde que uma prolongada exposição à radiação IV permite uma completa remoção da umidade contida no material, a umidade de equilíbrio (X_{eq}) atingida na secagem IV pode ser assumida como igual a zero.

Valores confiáveis de difusividade efetiva são necessários para interpretar precisamente o fenômeno de transferência de massa envolvido na secagem. Para partículas susceptíveis ao encolhimento, a determinação da difusividade efetiva deve levar em conta a redução na distância requerida para o movimento das moléculas de água. Entretanto, poucos trabalhos têm sido realizados sobre os efeitos do fenômeno de encolhimento sobre D_{ef} .

A solução analítica do modelo difusivo em coordenadas esféricas considerando o encolhimento da semente e a difusividade efetiva de umidade constante é^{13, 19, 20}:

$$YR = \frac{X/V - X_{eq}/V_{eq}}{X_0/V_0 - X_{eq}/V_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \exp \left[-j^2 \pi^2 D_{ef}^* \frac{t}{R^2} \right] \quad (6)$$

onde V é o volume da amostra de partículas num dado tempo, V_0 é o volume inicial da amostra e V_{eq} é o volume da amostra ao atingir a umidade de equilíbrio, R é o raio da partícula num dado tempo e D_{ef}^* é a difusividade de umidade efetiva levando em conta o encolhimento da partícula.

Os objetivos deste trabalho foram: (a) determinar a cinética de secagem das sementes de pinhão-mansão, em dois estádios de maturação, verde e maduro, empregando a radiação infravermelha; (b) avaliar a aplicação do modelo difusivo de Fick para representar o processo e (c) avaliar a influência da temperatura da fonte de aquecimento IV e do encolhimento das sementes sobre o coeficiente de difusão efetivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) em dois estádios de maturação, verde e maduro. As sementes foram obtidas diretamente do campo (*in situ*) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

A determinação do teor de umidade foi realizada utilizando o método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h²¹. As sementes foram adquiridas com um teor de umidade, em base seca (b.s), de

aproximadamente, 1,63 para o estágio verde, e 0,76 para o estágio maduro. Até a realização dos experimentos os frutos foram armazenados em local refrigerado. A Figura 1(a), 1(b) e 1(c) mostram, respectivamente, os grãos de pinhão-manso no estágio verde, maduro e suas sementes após a remoção da casca.

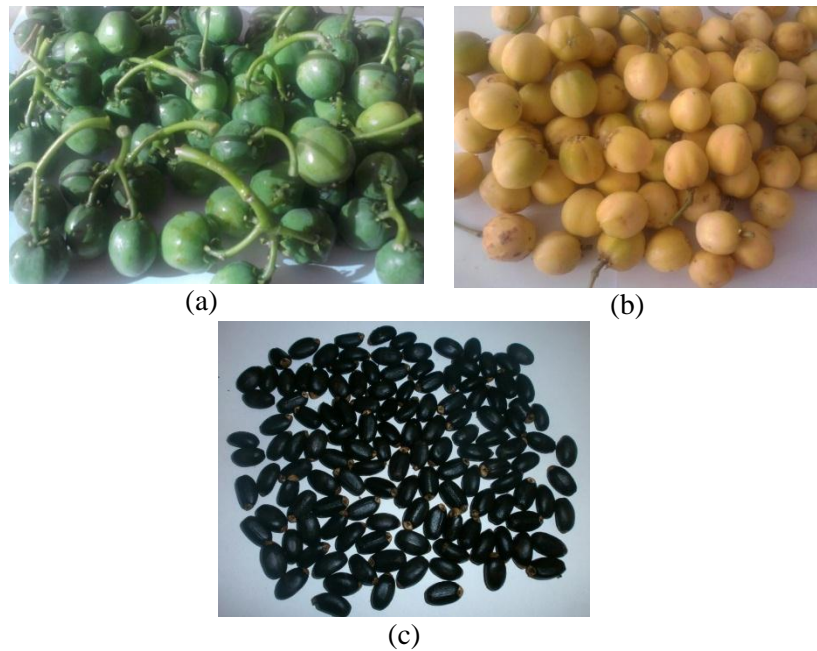


Figura 1. Grãos de pinhão-manso no estágio verde (a); maduro (b) e sementes (c).

Inicialmente, para a obtenção das sementes, as cascas foram retiradas dos frutos, com o auxílio de uma faca de mesa. Impurezas e sementes quebradas foram separadas manualmente. As dimensões das sementes nos dois estágios de maturação foram medidas por meio de um micrômetro digital (Pantec, modelo 13101-25, precisão de 0,001 mm). As dimensões medidas foram aquelas correspondentes ao maior eixo da semente (a), ao eixo médio (b) e ao menor eixo (c), conforme apresentado na Figura 2 (a).

A partir das dimensões medidas, foi possível obter uma distribuição normal do tamanho das sementes de pinhão-manso e identificar a faixa de tamanho de partícula presente em maior fração no material coletado, a qual foi utilizada em todos os experimentos de secagem visando minimizar o efeito da variabilidade do tamanho da partícula sobre os fenômenos de transferência envolvidos. As sementes foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas num refrigerador mantido a $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$. As amostras de sementes, antes de cada experimento, eram retiradas do refrigerador e deixadas à temperatura ambiente durante 2 horas. Com o auxílio de papel toalha era removida toda água livre situada na superfície das sementes.

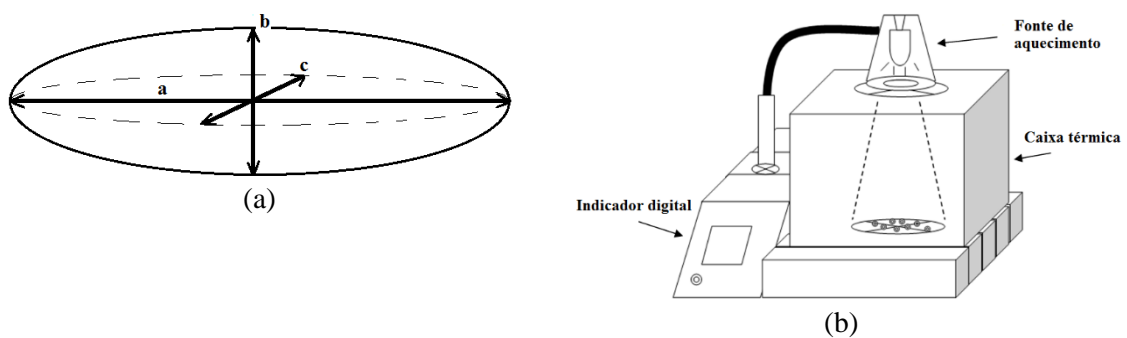


Figura 2. Representação esquemática: (a) dimensões características da semente de pinhão-manso e (b) unidade experimental de secagem.

O estudo da secagem de sementes de pinhão-mansó foi conduzido num secador infravermelho (Quimis, modelo Q333D-2), constituído por uma lâmpada incandescente com emissão de raios infravermelhos de 250 W, conforme apresentado na Figura 2 (b), e uma balança analítica para registrar a perda de massa do material. A temperatura da fonte de aquecimento infravermelho foi regulada através de um display digital e representa o valor medido próximo à lâmpada. A distância entre a lâmpada infravermelho e a amostra de sementes foi fixada em 17 cm. As temperaturas da fonte de aquecimento IV empregadas foram de 70, 80 e 90°C, sendo todos os experimentos realizados em duplicata. A faixa de temperatura empregada permitiu analisar a influência desta variável operacional sobre a transferência de massa no processo de secagem infravermelho.

A operação de secagem IV foi feita em duas etapas, uma etapa de secagem propriamente dita, precedida por uma etapa inicial de estabilização do sistema térmico, na qual o equipamento era ligado, e o sistema de aquecimento IV regulado para que atingisse a temperatura de operação desejada. Após a estabilização da temperatura, uma bandeja de alumínio contendo a amostra de sementes de pinhão-mansó em monocamada (cerca de 25 unidades), era colocada no interior do equipamento, tendo assim, o início do processo de secagem.

Para a obtenção das curvas de secagem, foram feitas pesagens da amostra de sementes em uma balança analítica, em intervalos de tempo pré-determinados, obtendo-se a massa de água evaporada por diferença das pesagens efetuadas. A temperatura da superfície das sementes foi também medida ao longo do processo com o auxílio de um pirômetro óptico digital (Impac, precisão 0,1 °C). Ao final de cada experimento, a massa de sólido seco foi determinada pelo método direto da estufa, com temperatura de $105,0 \pm 3,0^\circ\text{C}$ por 24 horas²¹.

A fim de avaliar o encolhimento durante o processo de secagem das sementes de pinhão-mansó suas dimensões foram medidas com um micrômetro digital em tempos pré-determinados.

A densidade de fluxo de umidade (N_w) num dado tempo (t) ou teor de umidade médio (\bar{X}) foi calculada pela seguinte equação:

$$N_w = \frac{m_{ss}}{A} \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (8)$$

onde m_{ss} é a massa de sólido seco, A é a área da amostra de sementes exposta à radiação IV, $d\bar{X}/dt$ é a taxa de secagem, a qual foi obtida por derivação numérica das curvas de secagem utilizando o software OriginPro[®] 6.1.

As formas simplificadas das Equações (5) e (6), truncadas no primeiro termo de cada série, foram aplicadas para ajustar os dados experimentais de cinética de secagem das sementes de pinhão-mansó, expressos em termos dos adimensionais XR e YR, respectivamente. As difusividades efetivas, com e sem a consideração do encolhimento, foram estimadas em cada temperatura, utilizando uma análise de regressão não-linear pelo método dos mínimos quadrados, no software STATÍSTICA 7[®] para Windows. Os critérios estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajuste foram o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio relativo médio (DRM).

As dependências de D_{ef} e D_{ef}^* em relação à temperatura foram investigadas ao plotar os valores obtidos em função da temperatura de secagem e ajustar uma equação do tipo Arrhenius aos dados:

$$D_{ef} = D_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (9)$$

onde D_0 é o fator pré-exponencial de Arrhenius, E é a energia de ativação, R é a constante dos gases e T é a temperatura absoluta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando minimizar a influência da variabilidade de tamanho das partículas sobre os fenômenos a serem estudados, os testes de secagem IV foram conduzidos com amostras de sementes de pinhão-mansinho nos estádios, verde e maduro, cujas faixas de tamanho são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões das partículas, nos diferentes estádios.

Dimensões	Estádio	
	Verde	Maduro
a (mm)	19,45 ± 2,75	20,92 ± 2,03
b (mm)	11,81 ± 1,22	12,17 ± 1,22
c (mm)	9,00 ± 1,26	9,63 ± 1,64

As Figuras 3 (a) e 3 (b) apresentam os resultados típicos de umidade adimensional (X/X_0) em função do tempo, para as sementes de pinhão-mansinho nos estádios verde e maduro, respectivamente. A diferença entre os valores experimentais de umidade adimensional das réplicas são inferiores aos erros de medida, em torno de 1%, indicando a reprodutibilidade dos ensaios experimentais e confirmando a validade da metodologia experimental empregada.

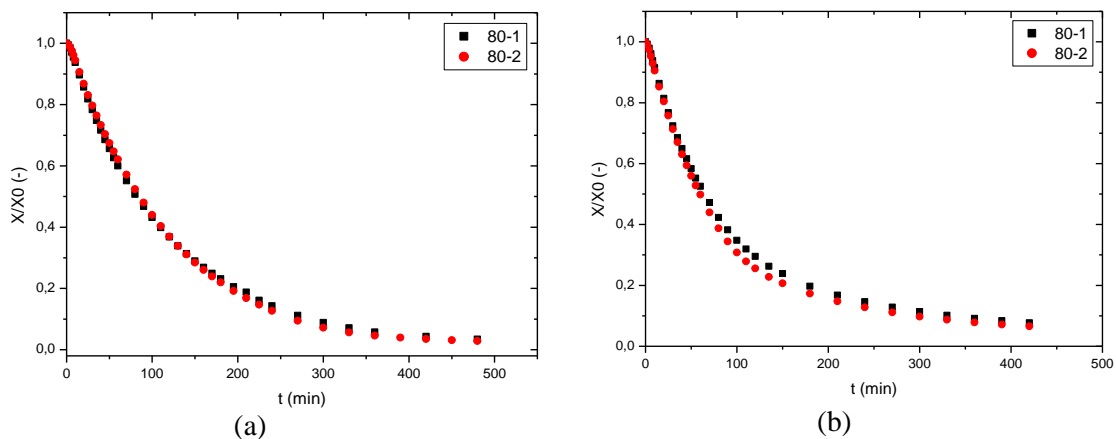


Figura 3: Umidade adimensional em função do tempo, para $T=80^{\circ}\text{C}$, para o pinhão-mansinho: (a) estádio verde e (b) estádio maduro.

A partir dos resultados apresentados na Figura 3, também é possível verificar que o estágio de maturação não influenciou o tempo de processamento.

Os resultados típicos da temperatura da superfície da partícula em função do tempo, em diferentes temperaturas da fonte IV, para os dois estádios de maturação das sementes, são mostrados nas Figuras 4 (a) e 4 (b).

É possível observar que em todos os ensaios a temperatura da superfície das sementes estabilizava a uma temperatura acima da temperatura da fonte. Isto pode ser explicado pelo fato de que na transferência de calor por radiação o meio (ar) não é aquecido, fazendo com que a temperatura do sólido não seja limitada pela temperatura de bulbo úmido do ar, de modo que elevadas temperaturas podem ser alcançadas em um curto espaço de tempo para a remoção de umidade²².

Nas Figuras 5 (a) e 5 (b) são apresentados os resultados típicos do adimensional de umidade (X/X_0) em função do tempo de processamento, em diferentes temperaturas da fonte de aquecimento infravermelho. Como esperado, a temperatura da fonte exerce uma influência significativa sobre o comportamento de secagem do material, tal que quanto maior a temperatura da fonte menor o tempo do processo, independente do estágio de maturação da semente.

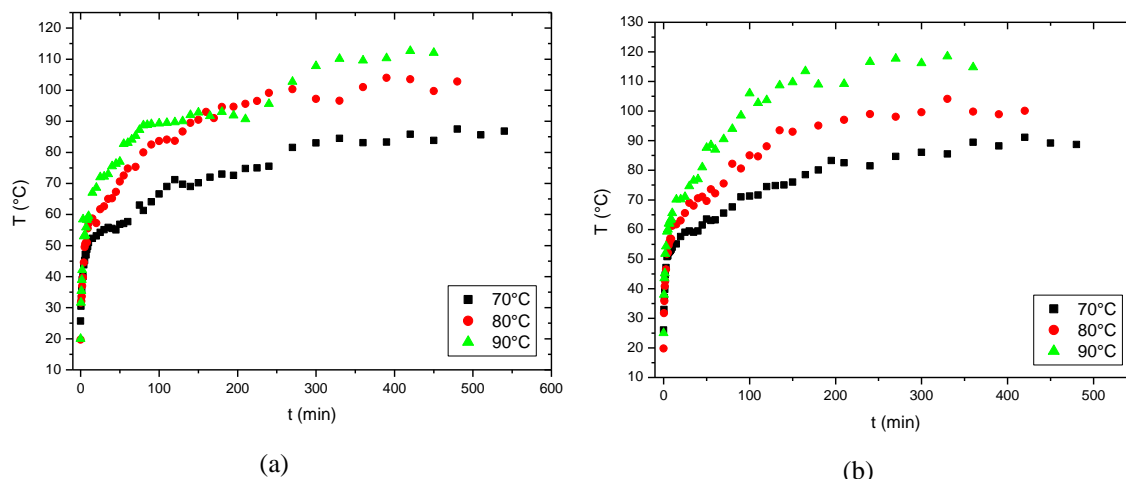


Figura 4: Temperatura da superfície das sementes em função do tempo, em diferentes temperaturas da fonte de aquecimento IV: (a) estágio verde e (b) estágio maduro.

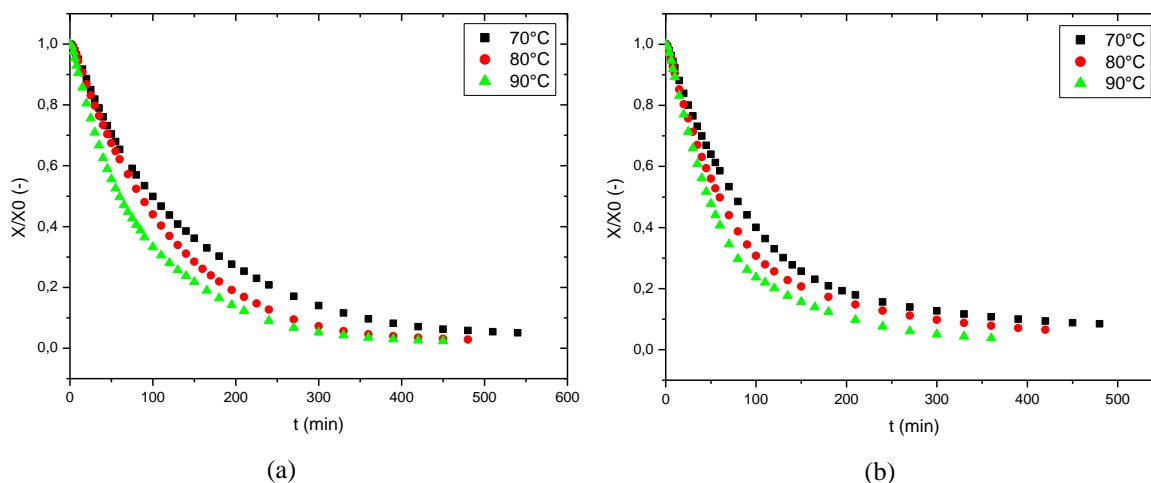


Figura 5: Teor de umidade adimensional em função do tempo: (a) estágio verde e (b) estágio maduro.

As Figuras 6(a) e 6 (b) apresentam os fluxos mássicos de secagem em função do teor de umidade em base seca, nas temperaturas estudadas. Verifica-se que a secagem ocorreu nos períodos de fluxo decrescente, indicando que as resistências internas à transferência de massa governam o processo de secagem das sementes de pinhão-mansão nos dois estádios de maturação.

A migração interna de umidade não consegue suprir o fluxo de evaporação na superfície do material, a qual é exposta à radiação eletromagnética. Comportamentos similares foram obtidos sob toda a faixa operacional empregada. Os fluxos de secagem foram maiores no início do processo, diminuindo gradualmente com a remoção de umidade. Isto porque uma maior quantidade de energia radiante é absorvida pela água localizada inicialmente na superfície das partículas, resultando em maiores taxas²³. Mas com a secagem da superfície do material, a penetração de calor através da camada seca diminui, reduzindo assim o fluxo de secagem.

A partir da Figuras 6 (a) e 6 (b) observa-se também que o fluxo de secagem das sementes aumentou com a temperatura da fonte de aquecimento. O aumento na temperatura da fonte e, conseqüentemente, na intensidade de radiação infravermelho pode ter causado um rápido aumento na temperatura da superfície das sementes, resultando num aumento da pressão de vapor d'água dentro das partículas e, conseqüentemente, em maiores taxas de secagem²⁴.

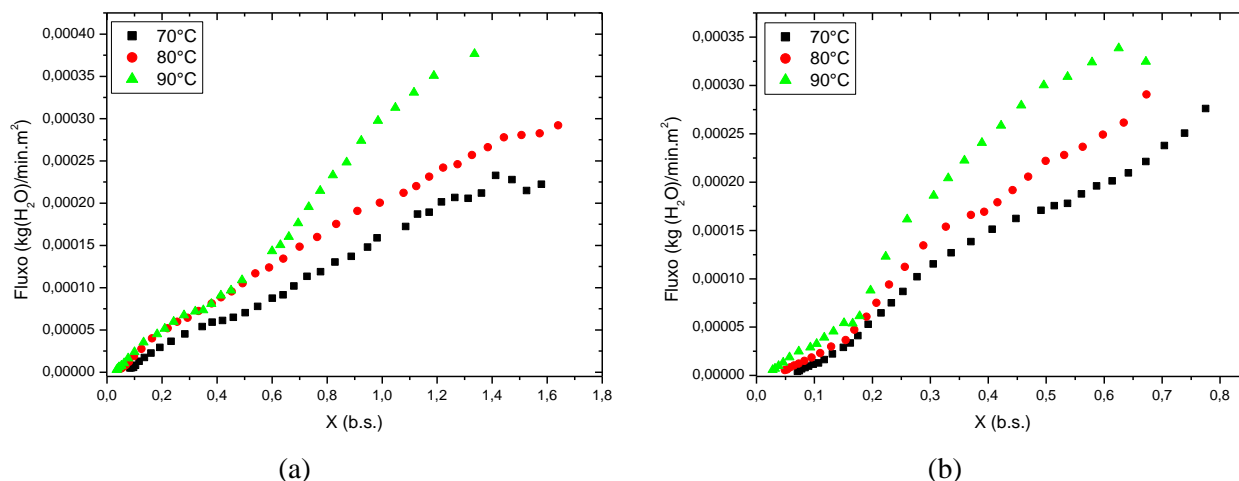


Figura 6: Fluxo mássico de secagem em função do teor de umidade em base seca: (a) estágio verde e (b) estágio maduro.

Os dados obtidos a partir da aplicação da metodologia experimental foram utilizados na avaliação da qualidade do ajuste da solução simplificada do modelo difusivo sem considerar o encolhimento (Equação 5) e do modelo difusivo considerando o encolhimento (Equação 6).

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores estimados do coeficiente de difusão das sementes de pinhão-mansinho nos dois estádios de maturação, juntamente com os valores dos parâmetros estatísticos, que revelam o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais.

Tabela 2: Coeficientes de difusão estimados durante o período de secagem, com e sem encolhimento, para as sementes no estágio verde.

T (°C)	$D_{ef} \times 10^{10} \text{ (m}^2\text{/s)}$					
	S/ Encolhimento	DRM (%)	R^2	C/ Encolhimento	DRM (%)	R^2
70	$5,72 \pm 0,03$	2,44	0,9995	$4,00 \pm 0,02$	0,54	0,9995
80	$7,05 \pm 0,02$	0,72	0,9998	$5,25 \pm 0,07$	3,10	0,9969
90	$8,98 \pm 0,07$	6,98	0,9986	$7,07 \pm 0,07$	7,47	0,9984

Tabela 3: Coeficientes de difusão estimados durante o período de secagem, com e sem encolhimento para as sementes no estágio maduro.

T (°C)	$D_{ef} \times 10^{10} \text{ (m}^2\text{/s)}$					
	S/ Encolhimento	DRM (%)	R^2	C/ Encolhimento	DRM (%)	R^2
70	$6,63 \pm 0,11$	11,81	0,9952	$4,75 \pm 0,10$	9,32	0,9921
80	$8,45 \pm 0,16$	14,80	0,9950	$6,15 \pm 0,17$	13,90	0,9897
90	$11,32 \pm 0,16$	14,67	0,9970	$7,97 \pm 0,17$	13,24	0,9937

Como esperado o encolhimento exerce influência na difusão da umidade no interior do material. Foram observados menores valores de coeficientes difusivos, para os dois estádios de maturação, quando considerado o encolhimento. Estes resultados corroboram o fato de que ao encolher, o material diminui o caminho difusional de umidade no interior das sementes. Através

dos resultados é possível verificar que os valores de difusividade para o estágio maduro são relativamente superiores ao do estágio verde, isto pode ser justificado pelo menor teor de umidade presente nas sementes amarelas.

Os valores de difusividade de umidade efetiva nas sementes de pinhão-mansão, apresentados nas Tabelas 2 e 3, estão próximos dos valores de $3,93 \times 10^{-10}$ a $9,19 \times 10^{-10}$ m²/s obtidos por Resende et al. (2011)²⁵ para o pinhão-mansão seco em convecção para temperaturas entre 30 e 70°C.

A Figura 7 apresenta os valores da difusividade efetiva em função da temperatura para as sementes de pinhão manso em seus diferentes estádios de maturidade. Comparando-se os dois estádios de maturidade, pode-se verificar uma maior difusividade de umidade na semente em estágio maduro. Estes resultados podem estar relacionados à menor quantidade de água livre no estágio maduro comparado ao verde.

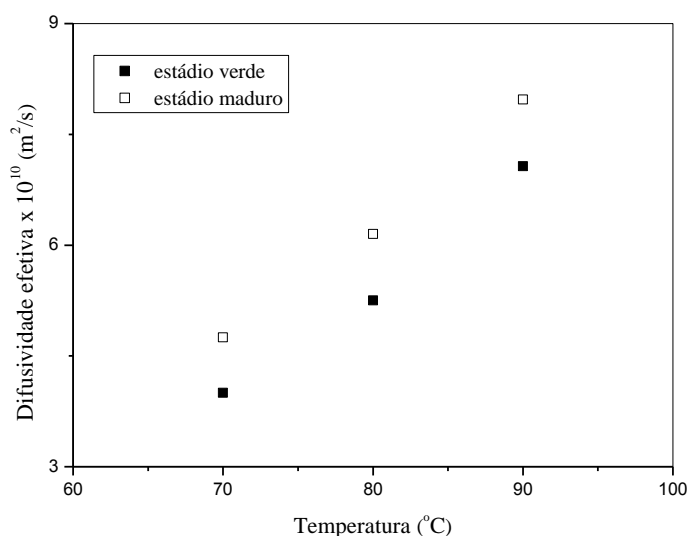


Figura 7: Difusividade de umidade efetiva em função da temperatura, nos diferentes estádios de maturação das sementes, levando-se em consideração o encolhimento.

O ajuste da equação de Arrhenius aos dados de difusividade efetiva estimados, sem e com a consideração do encolhimento, permitiu a obtenção dos valores de energia de ativação (E), os quais são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de energia de ativação para cada estágio sem e com encolhimento.

Estádio de Maturação		Energia de Ativação (kJ.mol ⁻¹)	R ²
Verde	S/Encolhimento	23,49 ± 7,94	0,9994
	C/Encolhimento	29,51 ± 1,18	0,9992
maduro	S/Encolhimento	27,66 ± 1,88	0,9977
	C/Encolhimento	26,74 ± 3,82	0,9999

Os valores de energia de ativação encontrados para a difusão no pinhão-mansão foram relativamente superiores ao valor de 15,25 kJ mol, encontrado por Resende et al. (2011)²⁵, também para o pinhão-mansão. No entanto, os autores não informam qual o estágio de maturação utilizado nos estudos, além do fato de que a secagem convectiva foi utilizada ao invés da IV. Carvalho et al. (2010)²⁶ determinaram uma energia de 20 kJ/mol para o resíduo da goiaba seca via radiação IV. No entanto, outros estudos de secagem convectiva de diferentes materiais apresentaram valores de energia de ativação bem superiores ao do pinhão-mansão seco via radiação IV: 40,4 kJ.mol⁻¹ para frutos do açaí¹⁷; 37,01 kJ.mol⁻¹ para trigo parbolizado²⁷; 35,2 kJ.mol⁻¹ para a palma²⁸ e 57 kJ.mol⁻¹ para a uva²⁹.

4. CONCLUSÕES

A cinética da secagem IV das sementes de pinhão-mansão, tanto no estádio verde quanto no maduro, foi caracterizada pela presença apenas do período de taxa decrescente, mostrando que as resistências internas à transferência de massa governam o processo.

O aumento temperatura da fonte IV causou um rápido aumento na temperatura da superfície das sementes, resultando num aumento da pressão de vapor dentro do material e, portanto, em maiores taxas de secagem.

A transferência de massa na secagem IV das sementes de pinhão-mansão foi descrita pela segunda lei de FICK da difusão, com e sem a consideração do encolhimento, com desvios relativos médios inferiores a 14%. Negligenciar o encolhimento das sementes levou a uma superestimativa do coeficiente de difusão.

As difusividades de umidade efetivas foram maiores nas sementes que se encontravam no estádio de maturidade maduro. A dependência da difusividade mássica efetiva com a temperatura foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Prof^ª. Dr^ª. Renata Mann do Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Sergipe (DEA/UFS) por ter cedido às sementes de pinhão-mansão para a realização desta pesquisa.

-
1. Srivastava A.; Prasad R. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, v. 4, p. 111-133, 2000.
 2. Jongschaap, R. E. E.; Corré W. J.; Bindraban P. S.; Brandenburg, W. A. Claims and facts on *Jatropha curcas* L.: global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation programme. Plant Research International, Wageningen, Netherlands, 42p, 2007.
 3. Heller J. Physic nut—*Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 66 p, 1996.
 4. Oliveira, V. D. Variabilidade genética de pinhão-mansão cultivado em dois agroecossistemas de Sergipe. Dissertação de Mestrado – PEQ, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.
 5. Arruda F. P.; Beltrão N. E.; Andrade A. P.; Pereira W. E.; Severino L. S. Cultivo do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas*, Campina Grande, PB. v.8, n. 1, p. 789-799, 2004.
 6. Nunes C. F. Caracterização de frutos, sementes e plântulas e cultivo de embriões de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 78p. 2007.
 7. Kaushik N.; Kumar K.; Kumar S.; Kaushik N.; Roy S. Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) accessions. *Biomass & Bioenergy*, v.31, p.497-502, 2007.
 8. Singh R. N.; Vyas D. K.; Srivastava N. S. L.; Narra M. S. Experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. *Renewable Energy*, v.33, p.1868-1873, 2008.
 9. Carels N. *Jatropha curcas*: A Review. In: Kader, J.C.; Delseny, M. (Eds.). *Advances in Botanical Research*, v.50, p.39-86, 2009.
 10. Doymaz I.; Pala M. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, v.60, p.125-130, 2003.
 11. Mujumdar A. S. Innovation and globalization in drying R & D. In: 15th International Drying Symposium (IDS 2006), Budapest, Hungary. Gödöllo : Szent István, Vol. A, pp. 3-17, 2006.
 12. Niamnuy C.; Nachaisin M.; Poomsa N.; Devahastin S. Kinetics modeling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. *Food Chemistry*, v. 133, n. 3, p. 946 – 952, 2012.
 13. Barbosa Neto A. M.; Marques L. G.; Prado M. M.; Sartori D. J. M. Mass Transfer in Infrared Drying of Gel-Coated Seeds. *Advances in Chemical Engineering and Science*, v. 4, n. 1, p. 39-48, 2014.
 14. Boudhrioua N.; Bahloul N.; Ben I. B.; Slimen N. K. Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial Crops and Products*, v. 2, n. 2/3, p. 412–419, 2009.

15. Ratti C.; Mujumdar A. S. Infrared Drying, Handbook of Industrial Drying, Marcell Dekker, 2a ed., vol. 1, pp. 567-588, 1995.
16. Santos L. D. M.; Prado M. M. Estudo da Secagem de Moringa oleifera. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010, Foz do Iguaçu. Anais do XVIII COBEQ, 2010. v. 1, 2010.
17. Barbosa Neto A. M.; Marques L. G.; Prado M. M. Drying characteristics of Açaí (*Euterpe oleracea*). In: 11th International Congress on Engineering and Food, 2011, Atenas. Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food, 2011. v. 1. p. 1-7, 2011.
18. Gely M. C.; Giner S. A. Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars. *Biosystems Engineering*, v. 96, n. 2, p. 213-222, 2007.
19. Arévalo-Pinedo A.; Murr F. E. X. Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*, v. 76, p. 562-567, 2006.
20. Souraki B. A.; Mowla, D. Axial and radial moisture diffusivity in cylindrical fresh green beans in a fluidized bed dryer with energy carrier: Modeling with and without shrinkage. *Journal of Food Engineering*, v. 88, p. 9-19, 2008.
21. Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Defesa Vegetal. Regras para análise de sementes. 365 p., 1992.
22. Khir R.; Pan Z.; Salim A.; Hartsough B. R. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *Food Science and Technology-LWT*, v. 44, n. 4, p. 1126-1132, 2011.
23. Santos C. J. R. Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido. Dissertação de Mestrado – PEQ, Unit, Aracaju, 2009.
24. Fasina O.; Tyler B.; Pickard M.; Zheng G.; Wang N. Effect of infrared heating on the properties of legume seeds. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 36, p.79-90, 2001.
25. Resende O.; Ullmann R.; Siqueira V. C.; Chaves T. H.; Ferreira, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha Curcas L.*) durante a secagem. *Engenharia Agrícola*, v.31, n.6, p.1123-1135, 2011.
26. Carvalho A. S.; Freitas L. S.; Prado M. M.; Marques L. G. Evaluation of infrared drying as pretreatment operation for lycopene extraction from guava by-products: case study – drying kinetics. In 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 2010. CD-Room.
27. Goneli A. L. D.; Corrêa P. C.; Resende O.; Reis Neto S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.
28. Falade K. O.; Abbo E. S. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 724-730, 2007.
29. Ramos I. N.; Miranda J. M. R.; Brandão T. R. S.; Silva C. L. M. Estimation of water diffusivity parameters on grape dynamic drying. *Journal of Food Engineering*, v. 97, p. 519-525, 2010.