



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SECAGEM DE MAMONA DA VARIEDADE BRS
ENERGIA: EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

AUTOR: Evaldo Marcos Ascendino Pereira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande-PB, Maio de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SECAGEM DE MAMONA DA VARIEDADE BRS
ENERGIA: EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

AUTOR: Evaldo Marcos Ascendino Pereira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande-PB, Maio de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P436s Pereira, Evaldo Marcos Ascendino.
Secagem de mamona da variedade BRS energia:
experimentação e simulação / Evaldo Marcos Ascendino Pereira.
– Campina Grande, 2015.
174 f. : color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia,
2015.

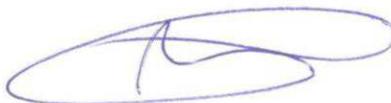
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

1. *Ricinus Communis* L. 2. Dados Experimentais. 3.
Modelagem. 4. Page. 5. CFX. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa.
II. Título.

CDU 633.85(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
IVALDO MARCOS ASCENDINO PEREIRA APRESENTADA AO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 29 de maio de 2015.



**Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima –
Orientador - UFCG/CCT/UAEM**



**Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
Examinador Externo - UEPB/DESA/CCT**



**Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade
Examinador Externo - UFCG/CCT/UAEM**



**Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo
Examinador Interno - UFCG/CCT/UAEM**



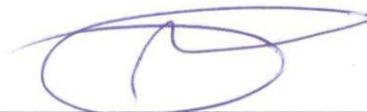
**Prof.ª Dr.ª Josivanda Palmeira Gomes
Examinadora Interna - UFCG/CTRN/UAEA**



**Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento
Examinador Interno - UFCG/CCT/UAEMat**

Campina Grande, 29 de maio de 2015.
PB - Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Evaldo Marcos Ascendino Pereira e aprovada pela banca examinadora em 29 de maio de 2015.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (Orientador)
UFCG/CCT/UAEM

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Francisco Vicente Pereira e a minha mãe Maria de Lourdes Ascendino Pereira por estarem sempre dispostos a prestarem apoio incondicional nos momentos mais difíceis de minha vida, dando confiança, apoio e amor.

À minha esposa Regineide Pereira Melo Ascendino e a minha filha Isabele Ascendino Pereira, por compreenderem a minha ausência nos dias dedicados a este curso, acreditando sempre no meu sucesso pleno.

Aos meus irmãos, Eliane Cristina Ascendino Pereira, Carlos Eduardo Ascendino Pereira, Patrícia Ventura Ascendino Pereira, que sempre se prestaram a ajudar nos momentos necessários e acreditaram em meu desempenho.

Ao meu cunhado Heliouvânio Torres Bandeira, por estar sempre disposto a me ajudar nos momentos que mais preciso.

E a todos os meus familiares que sempre apoiaram essa minha empreitada de estudo e dedicação ao curso que estou concluindo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus por me conceder saúde, disposição, perseverança e sabedoria para concluir mais esta etapa de minha vida.

Ao meu orientador Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela sua valiosa orientação, ensinamentos, dedicação e, principalmente, por ter acreditado na minha capacidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Wilton Pereira da Silva, pelos seus conhecimentos, paciência ao tirar minhas dúvidas, incentivo e, também, em acreditar sempre no meu potencial de execução das atividades a mim propostas.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), localizada na cidade de Campina Grande-PB, nos nomes de Odilon Reny Ribeiro Ferreira da Silva, Valdinei Sofiatti e Waltemilton Vieira Cartaxo, pela atenção, apoio e disponibilização da matéria prima (frutos de mamona da cultivar BRS Energia) para a execução dos experimentos de secagem, indispensáveis aos nossos estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de Bolsa de Pós-Graduação, essencial no alcance dos objetivos deste trabalho de pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, professores doutores Antonio Gilson Barbosa de Lima, Marcelo Bezerra Grilo, Josivanda Palmeira Gomes, José Jefferson da Silva Nascimento, Fernando Fernandes Vieira e Tony Herbert Freire de Andrade, por disponibilizarem seu precioso tempo para a avaliação deste trabalho, contribuindo significativamente para a sua melhoria.

À Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, nas pessoas do Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima e do Professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto pelo apoio e atenção na realização deste trabalho.

A Professora Dr^a Maria Elita Martins Duarte, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos, por ter concedido gentilmente o analisador de propriedades térmicas KD2 para a obtenção dos parâmetros termo-físicos dos frutos de mamona.

A Professora Dr^a Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pela gentileza em tirar nossas dúvidas de como obter as propriedades térmicas dos frutos de mamona.

A Márcia, Daise, Elisabete e Francinalva por ter nos ajudado na obtenção dos parâmetros termo-físicos dos frutos de mamona, bem como estarem sempre disponíveis para tirar nossas dúvidas na hora que mais precisávamos.

Aos meus professores do curso de Engenharia de Processos: Antonio Gilson Barbosa de Lima, Wilton Pereira da Silva, Marcelo Bezerra Grilo, Severino Rodrigues de Farias Neto, Odelsia Leonor Sánchez de Alsina e Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata pelos conhecimentos repassados durante as disciplinas cursadas.

Aos meus amigos do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos da UFCG, especialmente, Aguinaldo Araújo, Iran Rodrigues, João Paulo, José Vieira, Anderson Melchades, Edna Gomes, Maria Verônica, Célia Maria, Fernando José, Francisco Alves, Ivonete Batista, João Carlos, Josedite Saraiva, Jobsan Sueny, Clenilson Ferreira, Acto Cunha, Enivaldo Santos, Tony Herbert, Brauner Coutinho, Leonardo Pereira, José Valério, Antonio Gomes e Brasileiro pela amizade, colaboração e apoio nos momentos necessários.

Aos meus amigos José Vieira da Silva, João Paulo da Silva Santos e Elder Guedes dos Santos pela ajuda dispensada durante os experimentos de secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

Aos meus amigos Leonardo Pereira de Lucena Silva e Tony Herbert Freire de Andrade, pela ajuda dispensada na elaboração da geometria e malha do fruto de mamona no software ANSYS CFX[®], o que contribuiu significativamente para a conclusão deste trabalho.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Se quiser triunfar na vida, faça da perseverança a sua melhor amiga; da experiência, o seu conselheiro; da prudência, o seu irmão mais velho; e da esperança; o seu anjo da guarda”.

Joseph Addison

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Mamona.....	5
2.1.1 Origem da mamona.....	6
2.1.2 Descrição botânica, morfológica e fisiológica da mamoneira...	7
2.1.3 Aspectos gerais da produção de mamona	11
2.2 Propriedades termofísicas de produtos agrícolas.....	17
2.2.1 Calor específico.....	17
2.2.2 Condutividade térmica.....	18
2.2.3 Difusividade térmica.....	19
2.2.4 Analisador de propriedades térmicas KD2.....	19
2.3 Secagem de produtos agrícolas	20
2.3.1 Fundamentos da secagem	20
2.3.2 Fundamentos da migração de umidade em produtos agrícolas.....	27
2.3.3 Modelos matemáticos de secagem	36
2.3.3.1 Modelos empíricos	37

2.3.3.2 Modelos de difusão	38
2.3.4 Equipamentos de secagem.....	43
2.3.4.1 Secadores de leito fixo.....	44
2.3.4.2 Secadores de fluxo contínuo.....	44
2.3.4.3 Secadores por convecção natural.....	49
2.3.4.4 Secador de estufa.....	50
2.4 Fluidodinâmica computacional (CFD).....	51
2.4.1 Introdução à fluidodinâmica computacional.....	51
2.4.2 Etapas do processo em fluidodinâmica computacional.....	51
2.4.3 Construção e tipos de malhas.....	54
3 METODOLOGIA	56
3.1 Material e métodos experimentais.....	56
3.1.1 Material	56
3.1.2 Procedimentos experimentais.....	59
3.1.2.1 Secagem.....	59
3.1.2.2 Análises físico-químicas.....	62
3.1.2.3 Parâmetros termofísicos.....	63
3.2 Metodologia matemática.....	64
3.2.1 Analítica.....	64
3.2.1.1 Parâmetros técnicos.....	64
3.2.1.2 Parâmetros geométricos.....	65
3.2.1.3 Tratamento estatístico dos dados experimentais (Modelo empírico).....	69
3.2.2 Numérica.....	70
3.2.2.1 Geração da geometria e malha do problema.....	71

3.2.2.2 Modelo matemático de difusão.....	73
3.2.2.3 Estimativa do coeficiente de difusão de massa....	76
3.2.2.4 Condições utilizadas na solução numérica	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1 Experimentais.....	78
4.1.1 Propriedades termofísicas dos frutos de mamona “in natura” da cultivar BRS Energia.....	78
4.1.2 Caracterização da mamona da cultivar BRS Energia.....	80
4.1.2.1 Caracterização físico-química dos frutos de mamona “in natura”.....	80
4.1.2.2 Caracterização físico-química dos frutos de mamona após o processo de secagem.....	81
4.1.2.3 Caracterização físico-química das sementes de mamona após o processo de secagem.....	83
4.1.2.4 Secagem de frutos de mamona da variedade BRS Energia.....	91
4.2 Teóricos (Simulados).....	100
4.2.1 Modelo empírico de Page.....	100
4.2.2 Estudo da malha e passo de tempo.....	109
4.3 Modelo de difusão.....	111
4.3.1 Massa.....	111
4.3.2 Calor.....	126
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
5.1 Conclusões.....	136
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	138

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXOS.....	159

RESUMO

PEREIRA, Evaldo Marcos Ascendino, Secagem de Mamona da variedade BRS Energia: Experimentação e Simulação, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2015. 181p. Tese (Doutorado)

Subprodutos à base de óleo de rícino são utilizados na fabricação de vários produtos de base comercialmente importantes, tais como: surfactantes, lubrificantes, tintas, produtos farmacêuticos, cosméticos, poliésteres, polímeros, etc. A mamona tem na sua composição aproximadamente 50% de óleo, com especiais características, tais como elevada viscosidade, estabilidade ao calor e pressão, baixo ponto de congelamento e habilidade para formar substâncias cerosas após tratamentos químicos. A mamona é um candidato potencial para a produção de biodiesel; No entanto, este produto deve ser seco, a fim de reduzir o teor de umidade (10%), para o armazenamento seguro. A secagem é uma operação complexa, que envolve a transferência transiente de calor e de massa, que provoca transformações físicas e químicas do produto, o qual, por sua vez, pode causar alterações na qualidade do mesmo, bem como nos mecanismos de transferência de calor e de massa. Este trabalho apresenta um estudo experimental e numérico da secagem de frutos de mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia"). Um modelo matemático tridimensional transiente é apresentado para prever a transferência de massa e calor e simular a distribuição do teor de umidade e temperatura no interior do sólido, considerando as propriedades termofísicas constantes, utilizando-se o software ANSYS CFX[®]. Para a validação da metodologia numérica foram realizados experimentos de secagem com frutos de mamona da variedade BRS Energia. Nos experimentos, foram usadas temperaturas de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C. Os dados experimentais de secagem foram ajustados ao modelo matemático empírico de Page, apresentando para todos os tratamentos coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99,60% e valores de desvio-padrão da estimativa (SE) inferiores a 0,0165. As cinéticas de secagem de teor de umidade e temperatura obtidos por meio do CFX[®] foram comparados com as cinéticas experimentais de secagem e uma boa aproximação foram obtidas. Coeficientes de massa difusivo foram obtidos para diferentes condições de secagem. Verificou-se que os coeficientes de transporte de massa difusivo tendem a aumentar com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Palavras-chave: *Ricinus communis* L., dados experimentais, modelagem, Page, CFX.

ABSTRACT

PEREIRA, Evaldo Marcos Ascendino, Secagem de Mamona da variedade BRS Energia: Experimentação e Simulação, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2015. 181p. Tese (Doutorado)

Castor oil-based by-products are used in the manufacture of several commercially important commodities like surfactants, coatings, greases, pharmaceuticals, cosmetics, polyesters, polymers, etc . The castor bean has in the compositions approximately 50% oil, with special characteristics such as high viscosity, heat and pressure stability, low freezing point and ability to form waxy substances after chemical treatments. The castor bean is a potential candidate for the production of biodiesel; However, this product must be dried, in order, to reduce moisture content (10%), for safe storage. Drying is a complex operation involving transient transfer of heat and mass that provokes physical and chemical transformations in the product, which, in turn, may cause changes in the quality thereof, as well as the mechanisms of heat and mass transfer. This work presents an experimental and numerical study of castor bean fruits drying (*Ricinus communis* L., variety "BRS Energia"). A three-dimensional transient mathematical model is presented to predict the heat and mass transfer and to simulate the distribution of temperature and moisture content inside the solid, considering the constant thermophysical properties, using ANSYS CFX[®] software. For validation of the numerical methodology were performed drying experiments with castor bean fruits of the variety BRS Energy. In the experiments, were used drying temperatures of 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100°C. The experimental data of drying were adjusted to the empirical mathematical model of Page, presenting for all treatments, coefficients of determination (R^2) greater than 99.60% and standard deviation values of the estimate (SE) lower than 0.0165. The drying kinetics of temperature and moisture content obtained by CFX[®] were compared with the experimental drying kinetics and a good approximation has been obtained. Diffusive mass coefficients were obtained for different drying conditions. It was found that the diffusive mass transport coefficients tend to increase with increasing drying air temperature.

Keywords: *Ricinus communis* L., experimental data, modeling, Page, CFX.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Folhas e frutos da mamoneira.	05
Figura 2.2	Frutos da mamoneira.....	08
Figura 2.3	Esquema ilustrativo do aspecto geral da planta de mamona adaptado de Beltrão (2003)	08
Figura 2.4	Ranking dos principais produtores mundiais de mamona em termos de quantidades produzidas, em toneladas	11
Figura 2.5	Ranking dos principais produtores mundiais de mamona em termos de área colhida, em hectares	12
Figura 2.6	Mapa da produção agrícola da mamona no Brasil	13
Figura 2.7	Curva da taxa de secagem em função da umidade do sólido	21
Figura 2.8	Processo ar forçado sem aquecimento	26
Figura 2.9	Processo ar quente forçado	27
Figura 2.10	Pressões parciais de vapor de água no ar, P_v , e na superfície do grão, P_{vg}	29
Figura 2.11	Secador de leito fixo	44
Figura 2.12	Secador de fluxo contínuo.....	45
Figura 2.13	Esquema dos fluxos de ar durante o processo de secagem	45
Figura 2.14	Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados (a) que também opera de forma contínua (b)	46
Figura 2.15	Secador de fluxos concorrentes.....	47
Figura 2.16	Secador de fluxos contracorrentes	48
Figura 2.17	Secador de fluxos misto ou em cascata.....	49

Figura 2.18	Secador por convecção natural	50
Figura 2.19	Geometrias para construção de malhas (a) hexaédricas, (b) tetraédricas, (c) prismáticas e (d) piramidal	54
Figura 3.1	(a) Plantio da lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (maio 2013) e (b) lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (agosto 2013)	56
Figura 3.2	(a) Lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (setembro 2013) e (b) lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (dezembro de 2013).....	57
Figura 3.3	(a) Colheita das amostras de mamona da cultivar BRS Energia e (b) armazenamento das amostras de mamona da cultivar BRS Energia	57
Figura 3.4	Frutos de mamona da cultivar BRS Energia.....	58
Figura 3.5	Bandeja de tela de arame com tampa utilizada nos experimentos.....	60
Figura 3.6	(a) Bandejas de tela de arame sem tampa utilizadas nos experimentos e (b) bandeja grande de tela de arame utilizada nos experimentos.....	61
Figura 3.7	Amostras de frutos de mamona da cultivar BRS Energia utilizadas nos experimentos	61
Figura 3.8	Desenho esquemático do fruto de mamona, considerando-o como um esferóide tri axial, com suas dimensões características	61
Figura 3.9	Vista interna da estufa de secagem com amostras de frutos de mamona da cultivar BRS Energia.....	62
Figura 3.10	Analisador de propriedades térmicas KD2 (Decagon)	63
Figura 3.11	Geometria do problema.....	71
Figura 3.12	Malha do fruto de mamona usado na simulação.....	72
Figura 3.13	Detalhes da malha do fruto de mamona usado na simulação	72
Figura 3.14	Frutos de mamona.....	73
Figura 4.1	Variação da umidade em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia	85
Figura 4.2	Variação do teor de minerais em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.....	86
Figura 4.3	Variação do teor de proteínas em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.....	86

Figura 4.4	Varição do teor de lipídios em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia	87
Figura 4.5	Varição do teor de acidez total em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.....	87
Figura 4.6	Varição do pH em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.....	88
Figura 4.7	Varição do teor de sódio em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia	88
Figura 4.8	Varição do teor de cálcio em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia	89
Figura 4.9	Varição do teor de carboidratos em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.....	89
Figura 4.10	Varição do teor de energia em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia	90
Figura 4.11	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 40°C e UR 28,03%.	92
Figura 4.12	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 50°C e UR 16,34%.	92
Figura 4.13	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 60°C e UR 10,62%.	93
Figura 4.14	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 70°C e UR 6,24%.	93
Figura 4.15	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 80°C e UR 4,69%.	94
Figura 4.16	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 90°C e UR 2,67%.	94
Figura 4.17	Varição do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 100°C e UR 2,06%.	95

Figura 4.18	Variação do teor de umidade médio adimensional em função do tempo dos frutos de mamona para diferentes temperaturas e umidades de ar de secagem.....	95
Figura 4.19	Variação da temperatura adimensional na superfície dos frutos de mamona em função do tempo para diferentes temperaturas e umidades de ar de secagem.	96
Figura 4.20	Frutos de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 40°C	98
Figura 4.21	Frutos de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 80°C	98
Figura 4.22	Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 40°C	99
Figura 4.23	Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 60°C	99
Figura 4.24	Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 80°C	100
Figura 4.25	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 40°C).....	103
Figura 4.26	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 50°C).....	103
Figura 4.27	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 60°C).....	104
Figura 4.28	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 70°C).....	104
Figura 4.29	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 80°C).....	105
Figura 4.30	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 90°C).....	105
Figura 4.31	Comparação da cinética de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 100°C).....	106
Figura 4.32	Curvas estimadas de Page da cinética de secagem dos frutos de mamona para diferentes temperaturas de ar de secagem	106
Figura 4.33	Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 40°C e b) 50°C.....	107

Figura 4.34	Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 60°C e b) 70°C.....	108
Figura 4.35	Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 80°C e b) 90°C.....	108
Figura 4.36	Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 100°C.....	109
Figura 4.37	Análise da qualidade da malha do fruto de mamona	110
Figura 4.38	Análise do passo de tempo usado na simulação numérica.....	110
Figura 4.39	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 40°C	111
Figura 4.40	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 50°C	112
Figura 4.41	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 60°C	112
Figura 4.42	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 70°C	113
Figura 4.43	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 80°C.....	113
Figura 4.44	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 90°C	114
Figura 4.45	Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 100°C	114
Figura 4.46	Comparação das cinéticas de secagem numérica dos frutos de mamona para sete temperaturas de ar de secagem	117
Figura 4.47	Comparação das cinéticas de secagem numérica dos frutos de mamona para sete temperaturas de ar de secagem	118
Figura 4.48	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 40°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	119
Figura 4.49	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 50°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	120

Figura 4.50	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 60°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	121
Figura 4.51	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 70°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	122
Figura 4.52	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 80°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	123
Figura 4.53	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 90°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	124
Figura 4.54	Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 100°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.....	125
Figura 4.55	Temperatura média dos frutos de mamona versus tempo (em minutos) para sete temperaturas de ar de secagem.	127
Figura 4.56	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 40°C (313,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	128
Figura 4.57	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 50°C (323,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	129
Figura 4.58	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 60°C (333,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	130
Figura 4.59	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 70°C (343,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	131
Figura 4.60	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 80°C (353,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	132
Figura 4.61	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 90°C (363,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	133
Figura 4.62	Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 100°C (373,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais características das cultivares de mamoneira BRS 188 Paraguaçu, BRS 149 Nordestina e BRS Energia	09
Tabela 2.2	Preços nominais de semente e óleo de mamona em Gurajat, Kandla e média geral na Índia, em US\$ por toneladas	12
Tabela 2.3	Preços nominais de óleo de mamona em Rotterdam, em US\$ por tonelada	13
Tabela 2.4	Comparativo de área, produtividade e produção de mamona no Brasil.	14
Tabela 2.5	Preços nominais de mamona, em reais, nas principais praças produtoras do Brasil	15
Tabela 2.6	Conversão do teor de umidade base úmida (%) em base seca (decimal)	32
Tabela 2.7	Modelos matemáticos utilizados para ajustes de isotermas de sorção de teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas	33
Tabela 2.8	Modelos matemáticos modificados empiricamente para ajustes de isotermas de sorção de teor de umidade de equilíbrio	34
Tabela 2.9	Parâmetros da equação de Henderson modificada para diversos produtos agrícolas	35
Tabela 2.10	Parâmetros da equação de Chung-Pfost modificada para diversos produtos agrícolas	36
Tabela 2.11	Equações empíricas para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas	37
Tabela 2.12	Classificação de secadores a partir das suas principais características	43
Tabela 3.1	Parâmetros experimentais do ar de secagem, dos frutos de mamona e tempo final para cada experimento de secagem realizado	68
Tabela 3.2	Condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar ambiente durante os experimentos de secagem dos frutos de mamona.....	68

Tabela 3.3	Condições gerais do problema e da solução numérica no software ANSYS CFX [®]	77
Tabela 4.1	Valores médios dos parâmetros termofísicos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia obtidos experimentalmente	79
Tabela 4.2	Caracterização físico-química dos frutos de mamona “in natura” da cultivar BRS Energia	80
Tabela 4.3	Caracterização físico-química dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem	82
Tabela 4.4	Caracterização físico-química das sementes de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem	84
Tabela 4.5	Dados dimensionais dos frutos de mamona no início do processo de secagem	96
Tabela 4.6	Dados dimensionais dos frutos de mamona no final do processo de secagem	97
Tabela 4.7	Parâmetros estatísticos e do modelo de Page obtidos após ajustes aos dados experimentais do teor de umidade dos frutos de mamona.....	101
Tabela 4.8	Coefficientes de difusão analíticos e numéricos (ANSYS CFX [®]) com as suas respectivas somas dos erros quadrados	115

NOMENCLATURA

Letras latinas

A_p	Área projetada	$[m^2]$
A_s	Área superficial	$[m^2]$
a	Dimensão característica do produto (eixo maior)	$[m]$
aH^+	Actividade do íons H^+	$[mol/dm^3]$
a_w	Atividade de água no produto	[decimal]
b	Dimensão característica do produto (eixo médio)	$[m]$
c	Dimensão característica do produto (eixo menor)	$[m]$
C	Carbono	$[u]$
c_p	Calor específico à pressão constante	$[J/kgK]$
C_i	Circularidade	$[\%]$
D	Coefficiente de difusão de massa	$[m^2/s]$
D_g	Diâmetro geométrico médio	$[m]$
E_s	Esfericidade	$[\%]$
H	Hidrogênio	$[u]$
k	Condutividade térmica	$[W/m^2K]$
k_1	Constante de secagem	$[-]$
m	Massa do produto	$[kg]$
m_{H_2O}	Massa de água no produto	$[kg]$
m_s	Massa de matéria seca no produto	$[kg]$
M	Teor de umidade do produto	$[kg/kg]$
M_c	Teor de umidade crítica	$[kg/kg]$
\bar{M}	Teor de umidade médio	$[kg/kg]$
M_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio	$[kg/kg]$
M_f	Teor de umidade final	$[kg/kg]$
M_o	Teor de umidade inicial	$[kg/kg]$
\bar{M}^*	Teor de umidade adimensional (razão de umidade)	$[kg/kg]$
$M_{(b.u.)}$	Teor de umidade em base úmida	$[\%]$
$M_{(b.s.)}$	Teor de umidade em base seca	[decimal]
M_m	Teor de umidade na monocamada molecular	$[kg/kg]$
N	Teor de nitrogênio	$[g/mol]$
n	Número de termos da sequência	$[-]$
O	Oxigênio	$[u]$
pH	Potencial de hidrogênio	$[mol/dm^3]$
P_v	Pressão de vapor de água no ar	$[Pa]$

P_{vg}	Pressão parcial de vapor de água na superfície do produto	[Pa]
P_{vs}	Pressão de vapor saturado	[Pa]
R	Constante universal do ar	[J/kg°C]
R^2	Coefficiente de determinação	[-]
r	Coefficiente de correlação	[-]
\tilde{R}	Raio equivalente do produto	[m]
S	Termo fonte da equação de difusão	[-]
SE	Desvio padrão da estimativa	[-]
T	Temperatura do ar	[°C]
t	Tempo	[s]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
\vec{v}	Vetor velocidade	[m/s]
v	Velocidade	[m/s]
V	Volume	[m ³]
V_0	Volume inicial	[m ³]

Letras gregas

ρ	Densidade (massa específica)	[kg/m ³]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
θ	Temperatura do produto	[°C]
θ^*	Temperatura adimensional	[-]
θ_{eq}	Temperatura de equilíbrio	[°C]
θ_o	Temperatura inicial do produto	[°C]
θ_f	Temperatura final do produto	[°C]
$\bar{\theta}$	Temperatura média do produto	[°C]
Φ	Variável de transporte	[-]
Γ^Φ	Coefficiente de transporte	[-]
λ	Coefficiente de transporte	[-]
∇	Gradiente	[-]
$\nabla \cdot$	Divergente	[-]
ψ	Índice de contração volumétrica	[-]
Δ	Variação	[-]
π	Pi	[-]

Superescrito

* adimensional

Subescrito

a ar
b.s. base seca
b.u. base úmida
c crítica

e	equilíbrio
eq	equilíbrio
f	final
H ₂ O	água
m	massa
m _s	massa seca
o	inicial
p	produto
s	seco
v	vapor
vs	vapor saturado
vg	vapor de água
w	água

Abreviações

exp experimental

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EBDA Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola

EMPARN Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A mamona (*Ricinus communis* L.), também conhecida como carrapateira ou rícino, é um produto agrícola pertencente à família das Euforbiáceas, que se desenvolve por boa parte do mundo, principalmente em lugares tropicais. A mamona é oriunda da África tropical e é atualmente cultivada como uma oleaginosa e também como planta ornamental em muitos países da Ásia, América Central e América do Norte, África e Europa (DOAN, 2004). De acordo com dados da FAO (2014), a Índia é o maior produtor mundial de semente de mamona com produção anual de 1,63 milhões de toneladas, enquanto o Brasil ocupa a 4ª posição com produção de aproximadamente 26,0 mil toneladas.

A mamoneira é uma planta oleaginosa de relevante importância econômica para o Brasil, sendo tradicionalmente produzido em pequenas e médias propriedades, gerando emprego e renda, devido às suas inúmeras possibilidades de aplicação na área da indústria, além da perspectiva de potencial energético na produção de biodiesel, tornando-se assim um agronegócio bastante promissor (Goneli *et al.*, 2011). A semente da mamona, em termos médios, segundo Freire *et al.* (2006), é constituída por 65% de amêndoa e 35% de casca; e a sua composição química muda de acordo com a variedade e região de cultivo.

De acordo com Beltrão *et al.* (2001), os frutos de mamona são cápsulas tricocas, geralmente compostos de três grãos, podendo ser lisas ou com estruturas semelhantes a

espinhos, denominadas acúleos. De acordo com sua abertura, durante o amadurecimento, podem ser classificados como deiscentes, com abertura do fruto, e indeiscentes, quando não ocorre abertura.

Goneli *et al.* (2011) relatam que a cultura da mamona vem apresentando um elevado crescimento nos últimos anos, principalmente devido à possibilidade de uso do óleo de mamona como matéria-prima para a produção de biodiesel, com a expansão de novas áreas de plantio e com a adesão de um maior número de produtores e indústrias a esse agronegócio.

Segundo Kumar *et al.* (1997), subprodutos à base de óleo de rícino são utilizados na fabricação de vários produtos de base comercialmente importantes, tais como surfactantes, lubrificantes, tintas, produtos farmacêuticos, cosméticos, poliésteres, polímeros, etc. A mamona tem na sua composição aproximadamente 50% de óleo, com especiais características, tais como elevada viscosidade, estabilidade ao calor e pressão, baixo ponto de congelamento, habilidade para formar substâncias cerosas após tratamentos químicos (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005). O óleo da mamona possui inúmeras aplicações na área industrial, com perspectiva de utilização como fonte energética na produção de biocombustível (SEVERINO *et al.*, 2005). No entanto, este produto tem de ser seco, a fim de reduzir o teor de umidade, para o armazenamento seguro.

A secagem é uma operação complexa, que envolve a transferência transiente de calor e de massa, que provoca transformações físicas ou químicas do produto, o qual, por sua vez, pode causar alterações na qualidade do produto, bem como nos mecanismos de transferência de calor e de massa (MUJUMDAR, 2006).

Resende *et al.* (2008) afirmam que a secagem de produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento. Sendo assim, a secagem constitui uma operação fundamental entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal colhidos com alto teor de água.

Segundo Miranda *et al.* (1999), a secagem é uma operação potencialmente danosa à qualidade das sementes e depende do correto manejo dos teores de água inicial e final das sementes, da temperatura, da umidade relativa, fluxo de ar, da taxa de secagem e do período de exposição ao ar aquecido.

De acordo com Moshkin (1986), no processo de secagem de mamona, são recomendadas temperaturas máximas de 35 a 40°C para a secagem das sementes e de 40 a 50°C para a secagem dos frutos. Ainda segundo o autor, a temperatura suportada pelas sementes de mamona depende da sua umidade inicial e da duração da ação do calor, porém o nível crítico de umidade das sementes de mamona, para um armazenamento seguro, é de 7 - 7,5%. Macedo e Wagner (1984) afirmam que a umidade ideal dos frutos de mamona no final do processo de secagem, seja ele natural ou artificial, é de 10%.

A simulação de secagem é uma técnica rápida, segura e econômica para compreender os fenômenos e mecanismos de transferência de calor e massa. A fim de simular a secagem, alguns investigadores têm utilizado um modelo de difusão líquida, com base no pressuposto de que a transferência de umidade do grão ocorre na fase líquida (CIHAN *et al.*, 2007).

Escassos são os trabalhos na literatura que tratam sobre secagem de frutos de mamona, principalmente o da cultivar BRS Energia. A mamona cultivar BRS Energia foi desenvolvida em rede pela EMBRAPA, EBDA e EMPARN e lançada em 2007. Os frutos são verdes com cera e indeiscentes, enquanto que as sementes pesam entre 0,40 g e 0,53 g com as cores marrom e bege, contendo 48% de óleo (EMBRAPA, 2014a). Sendo assim, considerando a inexistência de dados na literatura de simulação da secagem de mamona utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), o presente estudo tem os seguintes objetivos:

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar experimentalmente a secagem de frutos de mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia") em diferentes condições operacionais.

1.2 Objetivos específicos

O presente estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- ❖ Realizar análises físico-químicas (teor de umidade, minerais, proteínas, lipídios, acidez total, pH, sódio, cálcio, carboidratos e energia) dos frutos e sementes de mamona durante os processos de secagem em diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C);
- ❖ Obter experimentalmente os parâmetros termofísicos (condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e densidade ou massa específica) dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia;
- ❖ Estudar a cinética de secagem em camada fina de frutos de mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia") em diferentes condições de secagem;
- ❖ Ajustar o modelo matemático empírico de Page aos dados experimentais de secagem em camada fina de frutos de mamona da cultivar BRS Energia;
- ❖ Modelar matematicamente e simular a secagem de mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia") (transferência de calor e massa), usando o modelo de difusão e considerando as condições de contorno de Dirichlet na superfície do fruto;
- ❖ Simular e analisar as cinéticas de secagem e aquecimento e as distribuições do teor de umidade e de temperatura no interior do fruto de mamona em diferentes condições de secagem via software CFX;
- ❖ Comparar os resultados numéricos via CFX e experimentais do teor de umidade e temperatura dos frutos de mamona, visando validar a modelagem matemática proposta;
- ❖ Estimar os coeficientes de difusão de massa através dos dados experimentais de secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mamona

A mamona (*Ricinus communis* L.), também conhecida como carrapateira, palma-de-cristo e rícino, é uma oleaginosa de relevante importância econômica e social (KOURI *et al.*, 2006). A mamoneira cultivada no Brasil é um arbusto cuja parte aérea é ramificada, de folhas com coloração verde escura (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Folhas e frutos da mamoneira.

Fonte: Terradagente (2013).

Os tipos comerciais existentes, dependendo das condições ambientais e das variedades, podem variar, em altura, de 1 a 4 m. De acordo com Anthoniser *et al.* (2004), o porte das plantas pode variar desde 80 cm até 8 m de altura. Possui facilidade de adaptação e velocidade de propagação sob diferentes condições climáticas.

2.1.1 Origem da mamona

A mamona é, provavelmente, originária da Etiópia, antiga Abissínia, no continente africano (MOSHKIN, 1986), porém, alguns estudiosos indicam o continente asiático como provável centro de origem (BUZZETTI, 1999). Existem relatos de que sementes dessa espécie foram encontradas em sarcófagos egípcios há mais de 4000 anos, onde acredita-se que este povo utilizava essas sementes para fins medicinais (OPLINGER *et al.*, 1997; OLSNES, 2004).

Alguns autores no Brasil consideram que a espécie tenha sido introduzida durante a colonização portuguesa, com a finalidade de se utilizar o óleo extraído das sementes para iluminação e lubrificação de eixos de carroça (AZEVEDO e BELTRÃO, 2007). O clima tropical, predominante no Brasil, facilitou o seu alastramento. Hoje pode-se encontrar a mamoneira em quase toda extensão territorial, como se fosse uma planta nativa e em cultivos destinados à produção de óleo (AZEVEDO *et al.*, 2003).

De acordo com Goneli (2008), o óleo de mamona apresenta características químicas que o diferem dos demais óleos vegetais, possuindo em sua composição aproximadamente 90% do ácido ricinoleico, um ácido graxo pouco frequente nos óleos vegetais.

Segundo Costa *et al.* (2009), o óleo de mamona era usado desde a era colonial para lubrificar as engrenagens, os mancais dos engenhos de cana-de-açúcar e também como indicador do ponto de fervura da rapadura.

O óleo de mamona pode ser usado na fabricação de tintas e isolantes, como lubrificante na aeronáutica, como base na manufatura de cosméticos e de muitos tipos de drogas farmacêuticas. De acordo com Costa e Ramos (2004), o óleo de mamona é também empregado em vários processos industriais, além de ser utilizado para a produção de biodiesel, combustível alternativo ao óleo diesel mineral (ABREU *et al.*, 2004).

Em todos os países produtores de mamona, esta cultura tem grande importância social por empregar muita mão-de-obra de trabalhadores rurais, principalmente para o plantio, controle de plantas daninhas e colheita. Em média, emprega-se aproximadamente 1 trabalhador rural para cada 4 ha de plantio de mamona (EMBRAPA, 2014b).

2.1.2 Descrição botânica, morfológica e fisiológica da mamoneira

A mamoneira (*Ricinus communis* L.) é pertencente à família Euforbiácea, subfamília Acalyphoideae, tribo Acalypheae, subtribo Ricininae, e ao gênero *Ricinus*, o qual é considerado monotípico. A família Euforbiácea por sua vez, está entre as maiores das Angiospermae, compreendendo cerca de 300 gêneros e 8.000 espécies, distribuídas principalmente nas regiões tropicais e subtropicais do mundo (WEBSTER, 1987; 1994).

A mamoneira é uma planta de hábito arbustivo, com diversas colorações de caule, folhas e frutos tipo racemos (cachos), podendo possuir cera no caule e pecíolo. Os frutos, geralmente, possuem espinhos, podendo as sementes apresentar diferentes tamanhos, formatos e grande variabilidade de coloração (MOREIRA et al., 1996; AZEVEDO et al., 1997a; 1997b; AMORIM NETO et al., 1999).

Segundo Schultz (1963), Vidal e Vidal (1980) e Popova e Moshkin (1986), a mamona é classificada taxonomicamente como:

Subdivisão: Fanerogamae ou Spermatophyta

Filo: Angiospermae

Classe: Dicotyledonae

Suclasse: Archichlamydae

Ordem: Geraniales

Família: Euphorbiaceae

Gênero: *Ricinus*

Espécie: *Ricinus communis*

Conforme descrição botânica de Lorenzi e Matos (2002), a mamoneira apresenta-se como arbusto ou arvoreta, com folhas grandes, classificadas como palmatilobadas (Figura 2.2). Seus frutos são do tipo cápsula tricoca de deiscência explosiva, com saliências espiniformes, contendo três sementes oleaginosas de superfície brilhosa e desenhada com manchas escuras.



Figura 2.2 - Frutos da mamoneira.

Fonte: Wikipédia (2013).

A mamoneira é uma planta que apresenta desenvolvimento com a forma juvenil diferente da adulta, em especial com relação às folhas primárias (cotiledonares) e as demais digitalobadas, denticuladas e de pecíolos longos com 20 a 50 cm de comprimento (BELTRÃO, 2003).

A Figura 2.3 ilustra o esquema geral da planta da mamona, onde a haste principal cresce verticalmente sem ramificação até o surgimento da primeira inflorescência, que tem a denominação após a fecundação das flores de cacho ou racemo.

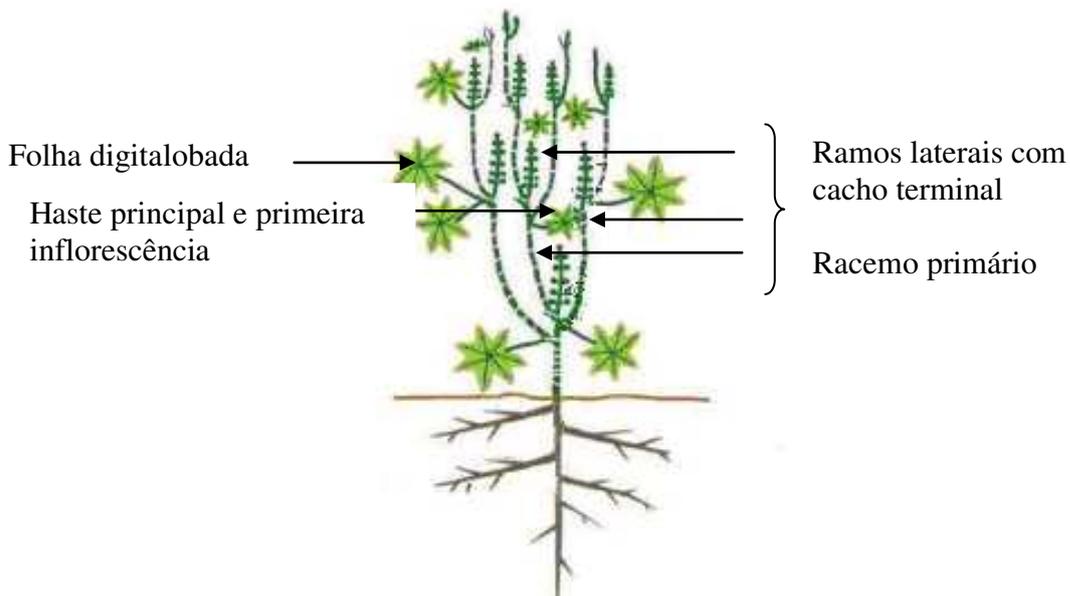


Figura 2.3 - Esquema ilustrativo do aspecto geral da planta de mamona adaptado de Beltrão (2003).

O nó, que aparece no primeiro racemo, é uma importante característica agrônômica que está associado à maturação da planta. O ramo lateral surge, cresce e se desenvolve da axila da última folha, logo abaixo de cada inflorescência.

Conforme relata Carvalho (2005), os cultivares recomendados para plantio em escala comercial devem apresentar características tais como:

- a) produtividade acima de 1.500 kg de bagas por hectare;
- b) produtividade acima de 3.000 kg em regime de irrigação;
- c) resistência ou boa tolerância às pragas e às doenças;
- d) teor de óleo superior a 45% (b.u);
- e) teor de ácido ricinoleico acima de 89%;
- f) frutos semi-indeiscentes.

Existem várias cultivares de mamoneira disponível para o plantio e comercializadas em todo território nacional, tais como: Preta Pernambucana; BRS 188 Paraguaçu; BRS 149 Nordestinas; BRS Energia; IAC-80; IAC-226; AL Guarani; Mirante; Coti; Sangue-de-Boi; Cerradão; Savana; Lyra; EBDA MPA 11; MPB 01 e etc (IBRAGEC, 2014). As cultivares de interesses comerciais mais indicadas para o semi-árido nordestino são a BRS 188 Paraguaçu, BRS 149 Nordestina, BRS Energia e mais as variedades IAC 80 e IAC 226 (IBRAGEC, 2014). A Tabela 1 apresenta as principais características das cultivares de mamoneira: BRS 188 Paraguaçu, BRS 149 Nordestina e BRS Energia.

Tabela 2.1 - Principais características das cultivares de mamoneira BRS 188 Paraguaçu, BRS 149 Nordestina e BRS Energia.

Característica	BRS 188 Paraguaçu	BRS 149 Nordestina	BRS Energia
Ciclo (do plantio à colheita)	230 a 250 dias	230 a 250 dias	120 a 140 dias
Produtividade média	1500 kg/ha (sequeiro) 5000 kg/ha (irrigação)	1500 kg/ha (sequeiro) 5000 kg/ha (irrigação)	1800 kg/ha (sequeiro) 5000 kg/ha (irrigação)
Deiscência dos frutos	Semideiscente	Semideiscente	Indeiscente
Altura média da planta	1,60 m	1,90 m	1,40 m
Cor do caule	Roxo com cerosidade	Verde com cerosidade	Verde com cerosidade
Cor da semente	Preta	Preta	Rajada
Peso médio de 100 sementes	71 g	68 g	55 g
Teor de óleo	48 %	49%	48%

Fonte: IBRAGEC (2014).

Os frutos da mamona são cápsulas globosas, ou bagas, medindo aproximadamente 2,4 cm (SAVY FILHO, 2005). Segundo Mazzani (1983), os frutos de mamona apresentam variações quanto à cor, cerosidade, forma, tamanho, deiscência, caducidade e presença ou ausência de acúleos.

Beltrão *et al.* (2001) afirmam que os frutos de mamona são geralmente compostos de 3 grãos, podendo ser classificados como deiscentes ou indeiscentes de acordo com a abertura destes frutos durante o amadurecimento. A classificação dos frutos de mamona é dita deiscentes, quando ocorre a abertura total dos frutos, e indeiscentes, quando os frutos não se abrem espontaneamente.

A semente de mamona é muito variável na mamoneira, envolvendo diferentes formas e cores, tamanhos e pesos. É composta de tegumento, rafe, micrópila, carúncula, endosperma, coilédones e eixo embrionário. A germinação é do tipo epígea. Segundo Vieira *et al.* (1997), as sementes da mamona contêm elevado teor de óleo, podendo variar de 35 a 55%. No entanto, existem cultivares plantadas comercialmente no Brasil que possuem o teor de óleo variando entre 45% a 50% (FREIRE *et al.*, 2007). O óleo encontrado nas sementes é o principal produto em importância econômica da mamona, pois possui inúmeras aplicações na indústria e recentemente tem sido utilizado no processo de produção de Biodiesel.

De acordo com Beltrão *et al.* (2003), a mamoneira é uma planta de morfologia e fisiologia complexas, de crescimento dicotômico, polimórfica, e de metabolismo fotossintético C3, considerada ineficiente e com elevada taxa de fotorrespiração. Apesar de se adaptar a diferentes comprimentos do dia, a mamoneira é considerada uma espécie heliófila, que precisa de dias longos com fotoperíodo de 12 horas para produzir satisfatoriamente (WEISS, 1983; BELTRÃO *et al.*, 2003).

O clima propício para cultivo é quente e úmido, com temperatura do ar podendo variar de 20°C a 30°C e altitude de 300 m a 650 m. Beltrão e Cardoso (2006) relatam que a mamona é uma espécie resistente à seca e não tolera salinidade. A faixa ideal de precipitação situa-se entre 750 mm e 1500 mm durante o desenvolvimento da planta. A falta de água no solo propicia o baixo peso das sementes e a redução no teor de óleo, até mesmo na fase de maturação dos frutos (HEMERLY, 1981).

2.1.3 Aspectos gerais da produção de mamona

A cultura da mamona tem grande importância econômica e social para o Brasil e para o mundo, principalmente pela perspectiva de potencial energético na produção de biodiesel, tornando-se um agronegócio bastante promissor.

De acordo com Beltrão (2004), na década de 1940, o Brasil era o maior produtor mundial de mamona, atingindo 370 mil hectares de área plantada e cerca de 300 mil toneladas de bagas/ano. Em 1970 a área cultivada chegou a 600 mil hectares e a produção brasileira atingiu maior importância. A partir de 1978, o Brasil passou a ocupar a segunda posição no ranking mundial, em decorrência do forte declínio que ocorreu na produção nacional de mamona. A área colhida e, conseqüentemente, a produção de bagas continuou decaindo durante toda a década de 1990 e o país passou a ocupar a terceira posição, ficando atrás da Índia e da China.

Segundo dados da FAO (2014), em 2012, Índia, China, Moçambique e Brasil ocupam, nesta posição, o ranking dos principais produtores mundiais da mamona em termos de quantidade produzida. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, o ranking dos principais produtores mundiais da mamona em termos de quantidade produzida, bem como de área colhida. Todos os valores utilizados na elaboração destes gráficos foram dados pesquisados no FAO.

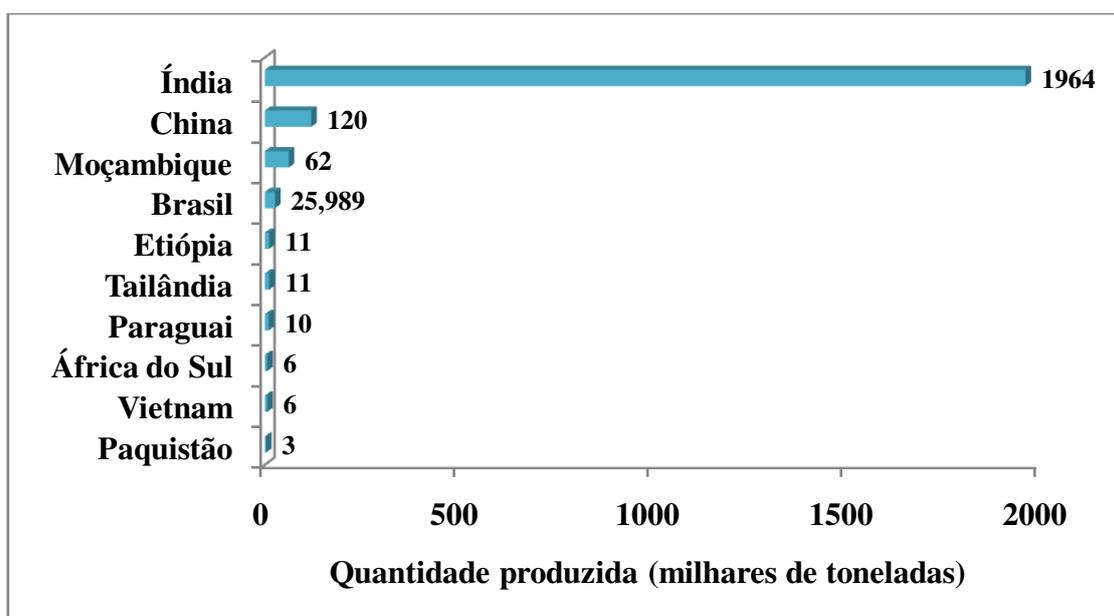


Figura 2.4 - Ranking dos principais produtores mundiais de mamona em termos de quantidades produzidas, em toneladas.

Fonte: FAO (2014).

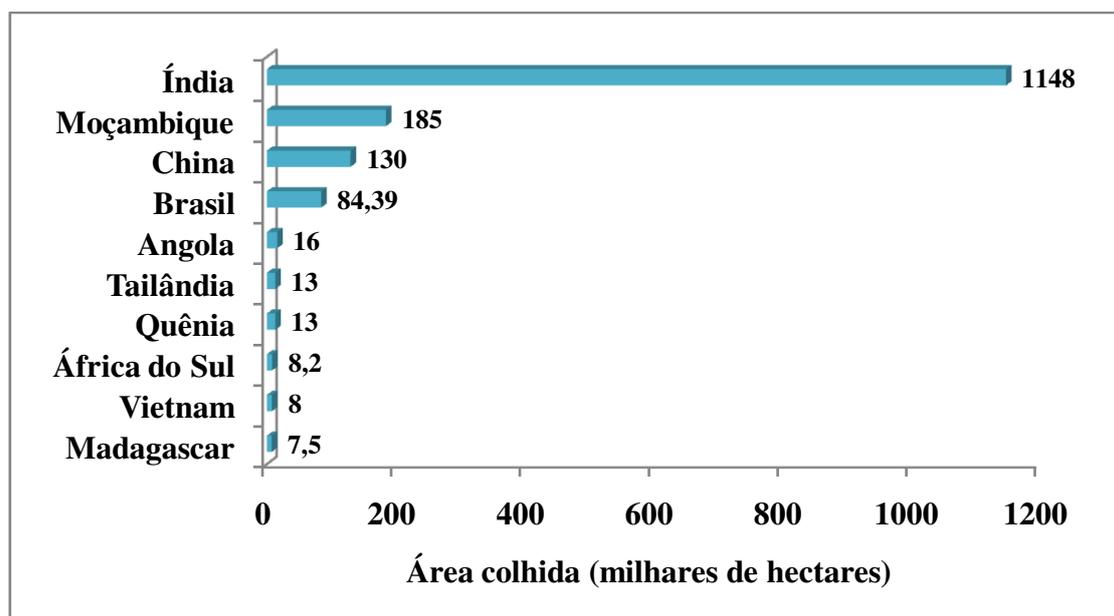


Figura 2.5 - Ranking dos principais produtores mundiais de mamona em termos de área colhida, em hectares.

Fonte: FAO (2014).

Segundo a CONAB (2014), a baga da mamona na Índia se recuperou bastante em relação ao mês anterior, passando de US\$647,50 por tonelada para US\$687,65/t, principalmente causado por movimentos especulativos que apostaram no aumento dos preços para os próximos meses. A Tabela 2.2 mostram os preços nominais de semente e óleo de mamona, em US\$ por toneladas, em Gurajat, Kandla e média geral na Índia.

Tabela 2.2 - Preços nominais de semente e óleo de mamona em Gurajat, Kandla e média geral na Índia, em US\$ por toneladas:

Produto/ localidade	Mês					
	ago/13	set/13	out/13	nov/13	dez/13	jan/14
Baga (US\$/t)/ Gujarat	584,45	596,29	593,1	629,5	712,56	676,29
Óleo (US\$/t)/ Kandla	1210	1217,5	1238	1281	1547,7	1406,25
Óleo (US\$/t)/ Índia	1205,1	1238,3	1220	1295	1467,3	1366,7
Produto/ localidade	Mês					
	fev/14	mar/14	abr/14	mai/14	jun/14	jul/14
Baga (US\$/t)/ Gujarat	658,60	664,83	684,76	647,50	687,65	708,98
Óleo (US\$/t)/ Kandla	1353,75	1435,00	1428,33	1390,00	1462,50	1420,01
Óleo (US\$/t)/ Índia	1316,39	1336,09	1355,16	1360,68	1374,48	1466,25

Fonte: The Solvent Extractors' Association of India (2014).

Já os preços de Rotterdam, Holanda, seguiram esse mesmo movimento, mas de forma mais tímida que as vistas na Índia (CONAB, 2014). A Tabela 2.3 mostram os preços nominais de óleo de mamona, em US\$ por toneladas, em Rotterdam, no período de janeiro de 2012 a junho de 2014.

Tabela 2.3 - Preços nominais de óleo de mamona em Rotterdam, em US\$ por tonelada.

Mês	Valor	Mês	Valor	Mês	Valor
Bolsa de Rotterdam					
jan/12	1923,33	jan/13	1675	jan/14	1726,25
fev/12	1875,03	fev/13	1665,53	fev/14	1700,00
mar/12	1865	mar/13	1677,89	mar/14	1715,00
abr/12	1755,56	abr/13	1650	abr/14	1680,00
mai/12	1607,89	mai/13	1604,17	mai/14	1633,50
jun/12	1472,37	jun/13	1574,75	jun/14	1675,00
jul/12	1575	jul/13	1485	jul/14	1690,22
ago/12	1670,45	ago/13	1493	ago/14	1677,57
set/12	1680,14	set/13	1477,11	set/14	1719,50
out/12	1727,5	out/13	1475,24	out/14	1735,61
nov/12	1700	nov/13	1456,25	nov/14	1751,75
dez/12	1608,16	dez/13	1488,24	dez/14	1752,52

Fonte: CONAB (2014).

No Brasil, o estado da Bahia é o maior produtor nacional da mamona, responsável por 84,98% do total produzido pelo país. Já o estado do Ceará ocupa a segunda posição do ranking nacional, com produção de 5,6 mil toneladas e o estado de Pernambuco ocupa a terceira posição, com uma produção de 1,6 mil toneladas, para a safra 2013/2014 (CONAB, 2014). A Figura 2.6 ilustra as diferentes regiões brasileiras responsáveis pela produção agrícola da mamona.

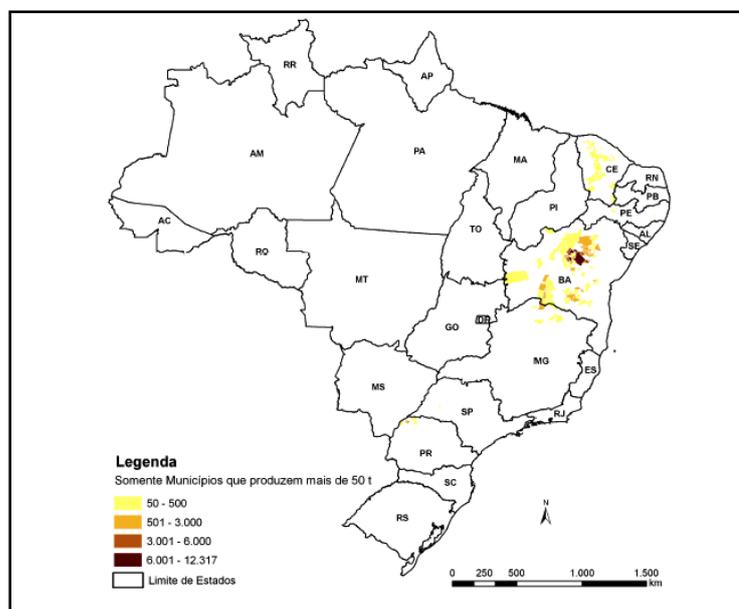


Figura 2.6 - Mapa da produção agrícola da mamona no Brasil.

Fonte: CONAB/IBGE (2014).

Já o quadro 1 apresenta o calendário de plantio e colheita da mamona nas diferentes regiões do Brasil.

Quadro 1 – Calendário de plantio e colheita da mamona nas diferentes regiões do Brasil.

UF/Região	23/09 a 21/12			21/12 a 20/03			20/03 a 21/06			21/06 a 23/09		
	Primavera			Verão			Outono			Inverno		
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Nordeste												
PI			P	P					C	C	C	
CE	C					P	P	P		C	C	C
RN								P				C
PE	C			P	P	P	P				C	C
BA	C	P/C	P/C	P						C	C	C
Sudeste				P								
MG		P	P			C	C	C	C			
SP	P	P	P				C	C				
Sul												
PR				P					C	C		

Legenda; P- Plantio; C – Colheita; P/C- Plantio e colheita.

Fonte: CONAB (2014).

A demanda pela mamona no Brasil é crescente, pois há interesse da Petrobrás em processar a mamona em biodiesel, porém a oferta da oleaginosa ainda é reduzida. A Tabela 2.4 mostra dados comparativos de área de cultivo, produtividade e produção de mamona no Brasil em relação às safras de 2012/2013 e 2013/2014.

Tabela 2.4 - Comparativo de área, produtividade e produção de mamona no Brasil.

REGIÃO/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil ton)		
	Safra 12/13 (a)	Safra 13/14 (b)*	VAR. % (b/a)	Safra 12/13 (c)	Safra 13/14 (d)	VAR. % (d/c)	Safra 12/13 (e)	Safra 13/14 (f)	VAR. % (f/e)
	NORDESTE	84,4	100,6	19,2	163	590	262,5	13,8	59,2
PI	1,0	0,7	(30,0)	75	767	922,7	0,1	0,5	400,0
CE	12,8	13,2	3,0	140	425	203,6	1,8	5,6	211,1
PE	1,4	4,9	249,5	267	334	25,1	0,4	1,6	300,0
BA	69,2	81,8	18,2	166	630	279,5	11,5	51,5	347,8
SUDESTE	2,1	2,5	19,0	694	506	(27,1)	1,5	1,3	(13,3)
MG	2,0	2,4	20,0	630	450	(28,6)	1,3	1,1	(15,4)
SP	0,1	0,1	-	1.980	1.848	(6,7)	0,2	0,2	-
SUL	0,9	0,2	(77,8)	600	622	3,7	0,5	0,1	(80,0)
PR	0,9	0,2	(78,0)	600	622	3,7	0,5	0,1	(80,0)
NORTE/NORDESTE	84,4	100,6	19,2	163	590	262,5	13,8	59,2	329,0
CENTRO-SUL	3,0	2,7	(10,0)	666	515	(22,7)	2,0	1,4	(30,0)
BRASIL	87,4	103,3	18,2	180	588	226,6	15,8	60,6	283,5

Fonte: CONAB (2014).

Nota: Estimativa em julho/2014.

*(b/a) significa a variação percentual ocorrida da safra 12/13(a) para a safra 13/14(b).

A partir dos dados da tabela anterior (Tabela 2.4), observa-se que o estado da Bahia apresentou uma retomada na produção de mamona passando de 11,5 mil toneladas para 51,5 mil toneladas na safra 2013/2014 em relação à safra do ano anterior, um aumento de produção de 347,8%, haja vista que a Bahia sofreu uma quebra de safra passada, principalmente pela seca na região. O maior percentual de aumento de produção de mamona foi para o estado do Piauí, passando de 0,1 mil toneladas para 0,5 mil toneladas, aumento de 400%. Já o estado do Pernambuco, a produção de mamona passou de 0,4 mil toneladas para 1,6 mil toneladas, aumento de 300%.

Na Tabela 2.5 são apresentados os valores nominais, em reais, recebidos pelo produtor de mamona nas praças de Irecê/BA, Matias Cardoso/MG e Tauá/CE. Portanto, o cuidado deve ser especial ao comparar os preços mais antigos com os mais recentes, devido à inflação acumulada no período.

Tabela 2.5 - Preços nominais de mamona, em reais, nas praças produtoras do Brasil.

	Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	2008	72,2	76,2	72,8	74,4	77,8	83,8	67,2	59,75	68,8	72,2	59,8	61,5
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2009	63,5	49,5	50,0	51,4	55,0	52,3	52,4	69,50	72,2	74,5	69,5	69,2
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2010	70,0	70,0	71,4	70,8	72,8	73,8	74,3	77,00	80,0	69,8	60,2	62,6
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2011	62,6	68,8	82,0	93,6	96,2	109,0	103,0	95,50	86,6	93,6	84,8	81,4
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2012	97,5	97,6	101,8	108,4	114,5	117,9	118,7	123,2	116,9	104,6	95,5	99,8
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		-	-	73,4	81,6	88,9	85,9	84,8	88,2	87,8	90,0	90,0	90,0
1	2013	99,8	114,4	116,9	121,9	120,8	114,7	121,6	128,7	140,8	148,8	141,9	118,2
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89,1	89,9
3		90,0	90,00	90,0	90,0	90,0	101,1	101,1	101,1	101,8	111,0	111,0	111,4
1	2014	126,5	130,4	126,7	115,9	95,5	90,5	85,1	84,97	89,6	96,0	88,5	79,2
2		90,0	90,00	90,0	110,4	83,1	83,3	84,0	84,00	79,7	72,0	72,0	72,0
3		110,4	110,4	110,4	83,9	96,5	90,0	90,0	90,00	82,9	79,7	79,7	79,7

Fonte: CONAB (2014).

¹Praça de Irecê; ²Praça de Tauá; ³ Praça de Matias Cardoso.

A partir dos dados da Tabela 2.5, verifica-se que os preços nominais mensais recebidos no mês de junho de 2014, se comparados ao mês de maio, seguiram a

tendência de queda em duas das três praças estudadas. Em Matias Cardoso/MG, os preços ficaram 1,03% abaixo do mês passado e 5,24% em relação a junho de 2013. Em Irecê/BA, o preço voltou a baixar, passando de R\$ 95,50 para R\$ 90,50, caindo 5,24%, resultado de não se ter sinais de seca na Bahia. Em comparação com junho do ano anterior, os preços nominais tiveram queda de 23,14%; descontando-se ainda a inflação, a queda é de 28,04%. Em Tauá/CE, houve aumento de 0,28% em relação ao mês anterior, ou seja, abaixo da inflação.

Considerando os preços mínimos em vigor da mamona de R\$55,80 para as praças aqui vistas, constata-se que em nenhuma destas o preço está sequer perto do mínimo definido para a cultura da mamona, com apenas o Estado do Piauí que o valor está em R\$57,00.

Os principais consumidores de óleo de mamona são os países desenvolvidos que utilizam este produto como insumo para a indústria química, principalmente Estados Unidos, França, Alemanha e China (EMBRAPA, 2014b). Praticamente toda a produção da mamona no Brasil é industrializada, obtendo-se como produto principal o óleo e como subproduto a torta de mamona, que tem grande capacidade de restauração de terras esgotadas. A extração do óleo é feita a partir do grão completo (integral com a casca) ou descascado por meio de máquinas apropriadas. O método utilizado para extrair o óleo pode ser por prensagem a frio ou a quente, ou extração por solvente (FREIRE, 2001).

O óleo de mamona apresenta características químicas que o diferem dos demais óleos vegetais. Ele pode ser empregado em vários processos industriais, como a fabricação de corantes, anilinas, desinfetantes, germicidas, óleos lubrificantes de baixa temperatura, colas e aderentes, base para fungicidas e inseticidas, tintas de impressão e vernizes, além de nylon e matéria plástica, em que tem bastante importância (COSTA e RAMOS, 2004).

Além dos usos citados anteriormente, o óleo de mamona pode ser utilizado para a produção de biodiesel, combustível alternativo ao óleo diesel mineral. O biodiesel é proveniente de fontes naturais renováveis tais como óleos vegetais e gordura animal e tem grande apelo ambiental, especialmente por diminuir as emissões de gases como CO₂ e SO_x e partículas de hidrocarbonetos durante sua combustão quando comparado aos combustíveis fósseis (ABREU *et al.*, 2004).

De acordo com Freire (2001), a elevada demanda industrial pelo óleo de mamona deve-se ao fato de, em muitas de suas aplicações, não se poder substituí-lo por outros óleos vegetais, em geral, usados na alimentação.

2.2 - Propriedades termofísicas de produtos agrícolas

O conhecimento dos valores das propriedades termofísicas de produtos agrícolas é de suma importância para prever e/ou simular o comportamento de grãos e a quantidade de energia requerida quando submetidos a diferentes condições de secagem, aquecimento ou resfriamento.

De acordo com Mohsenin (1980), grande parte das alterações internas de um produto que ocorrem durante as diversas etapas do processamento pode ser identificada conhecendo-se as suas principais propriedades térmicas: calor específico, condutividade e difusividade térmica. Estas características, próprias de cada produto, podem ser influenciadas pelo teor de água, temperatura e a massa específica aparente (CHANG, 1986).

2.2.1 - Calor específico

O calor específico de um material pode ser definido como a quantidade de energia térmica (J) necessária para elevar a temperatura em um grau Celsius por unidade de massa (INCROPERA *et al.*, 2008). Segundo Mohsenin (1980), o calor específico aumenta com a elevação da temperatura e quanto mais alta a temperatura, maior é o calor específico.

Em outras palavras, o calor específico é definido como a quantidade de calor que ganha ou perde determinada massa de produto para sofrer determinada mudança de temperatura. No entanto, para definir completamente calor específico deve-se especificar as condições segundo as quais o calor é transferido para o sistema.

De acordo com Alvarado (2001), quando não existe mudança de fase o calor específico é a quantidade de calor que ganha ou perde um quilograma de produtos agrícolas para produzir uma mudança de temperatura requerida, conforme a expressão abaixo:

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta t} \quad (2.1)$$

em que:

C_p : calor específico (kJ/kg°C);

Q : quantidade de calor (kJ);

m : massa (kg);

Δt : variação da temperatura (°C).

2.2.2 - Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade termofísica do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoar sob influência de um gradiente de temperatura, descrita pela equação de Fourier da condução de calor (INCROPERA *et al.*, 2008), isto é:

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

em que:

q_x : taxa de fluxo de calor (w);

A : área de transferência de calor normal ao fluxo de calor (m²);

k : constante de proporcionalidade da condutividade térmica (W/m·K);

$\Delta T/\Delta x$: gradiente de temperatura ao longo da direção do fluxo de calor (K/m).

A condutividade térmica depende principalmente da composição do produto, incluindo a presença de espaços vazios e do grau de homogeneidade estrutural (ARAÚJO *et al.*, 2004), a qual varia com o tipo de material, temperatura e teor de umidade, uma vez que os materiais biológicos não são homogêneos e variam na composição química e no conteúdo de água ocasionando variações na condutividade térmica.

Segundo Park *et al.* (1997), os valores numéricos da condutividade térmica podem variar de acordo com a composição química, estrutura física, estado, massa, temperatura e teor de umidade do material. De acordo com Santos (2005), a condutividade térmica é considerada uma das propriedades físicas mais importantes de um material, em que sua determinação experimental apresenta algumas dificuldades e requer alta precisão na determinação dos fatores necessários para o seu cálculo.

2.2.3 - Difusividade térmica

A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Materiais com elevadas difusividades térmicas responderão rapidamente às mudanças nas condições térmicas a eles impostas, enquanto que materiais com reduzidas difusividades térmicas responderão mais lentamente, levando assim mais tempo para atingir uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA *et al.*, 2008).

A difusividade térmica (α) é obtida por meio da razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, cuja unidade de medida é $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, isto é:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.3)$$

em que:

k: condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_p : calor específico do produto ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

ρ : densidade ou massa específica (kg m^{-3}).

De acordo com Pabis *et al.* (1988), a velocidade de difusão do calor para dentro ou fora do material é dependente da difusividade térmica do produto. Estudos realizados por Kazarian & Hall (1965) confirmam que a magnitude da difusividade térmica influencia a cinética de secagem de grãos agrícolas.

2.2.4 - Analisador de propriedades térmicas KD2

Os parâmetros termofísicos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, tais como condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica podem ser obtidos experimentalmente utilizando-se de um analisador de propriedades térmicas KD2.

O analisador de propriedades térmicas KD2 é um medidor de propriedades térmicas portátil para campo e/ou laboratório. De acordo com o fabricante (Decagon), a análise sofisticada de dados é baseada em mais de 30 anos de experiência em pesquisa de calor e transferência em massa em alimentos, fármacos e outros materiais porosos.

O princípio de funcionamento da sonda KD2 baseia-se na metodologia de fio quente, em que os valores de k (condutividade térmica) e α (difusividade térmica) são obtidos através da solução da equação de condução de calor em coordenadas cilíndricas em um meio homogêneo (FONTANA *et al.*, 2001).

2.3 Secagem de produtos agrícolas

2.3.1 Fundamentos da secagem

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo, ou também, por congelamento a vácuo, conhecida como liofilização, que permite armazenar alimentos por muito mais tempo. O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente, tendo como parâmetro principal para se obter um ótimo processo de secagem a sua taxa de secagem. Portanto, a secagem de produtos agrícolas pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e ar de secagem (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999).

No caso de secagem utilizando ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar para o produto sob o efeito da diferença da temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial do vapor de água existente entre o ar e a água da superfície do produto determina a transferência de matéria (massa) para o ar na forma de vapor de água (PARK *et al.*, 2007).

Em outras palavras, quando ocorre o fluxo de ar quente por entre a massa de grãos contidos no interior da câmara de secagem, ocorre a transferência de energia do ar para os grãos pelo processo de convecção. Essa energia é rapidamente distribuída para o interior do grão, aquecendo toda a matéria e vaporizando parte da água contida no grão, aumentando a pressão parcial de vapor no interior do mesmo e provocando, conseqüentemente, um gradiente de pressão entre o grão e o ar.

Por outro lado, o ar aquecido possui maior poder de absorção de vapor de água. Devido ao gradiente de pressão parcial de vapor e a diferença de concentração de vapor de água entre a superfície do grão e o ar, ocorre, portanto, a transferência de vapor de água entre o grão e o ar. Em seguida, o vapor é levado juntamente com o ar para fora da câmara. Uma vez retirada a umidade da superfície do grão, acentua-se novamente o gradiente de pressão e de concentração de vapor entre o interior e a superfície do grão, provocando nova migração da umidade do centro para a superfície, dando continuidade ao processo.

Observa-se que no início do processo de secagem a quantidade de calor e massa transferida é mais acentuada, diminuindo ao longo do tempo. Portanto, a transferência de calor diminui à medida que a temperatura dos grãos se aproxima da temperatura do

ar de secagem na entrada da câmara, tornando o gradiente de temperatura pequeno. Já a diminuição do teor de umidade dos grãos ao longo do tempo, faz com que o gradiente de umidade e de pressão de vapor entre os grãos e o ar também diminua, de forma que quando o teor de umidade se aproxima da umidade de equilíbrio, a transferência de massa se torna praticamente desprezível.

A secagem pode ser dividida em período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente (Figura 2.7). Analisando a referida Figura, verificam-se os dois períodos de secagem:

I) **Período de taxa de secagem constante:** No período de taxa de secagem constante, representado pelo segmento B-C, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água pura evaporando. No caso do sólido ser poroso, a maior parte da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. De acordo com Park *et al.* (2007), a pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. Já a temperatura do produto, por sua vez, é também constante e é igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. Ainda segundo os autores, este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

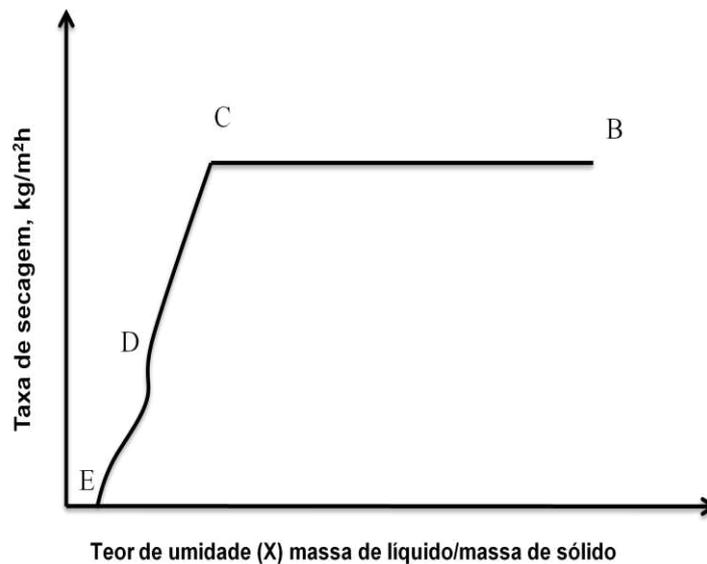


Figura 2.7 - Curva da taxa de secagem em função da umidade do sólido.
Fonte: Geankoplis (1983).

Na secagem de produtos agrícolas, o período de taxa constante só tem relativa importância quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando o potencial de secagem do ar é muito baixo (baixa temperatura e alta umidade relativa do ar). O fim do período de taxa constante ocorre quando a migração interna de água para a superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre na superfície. O valor da umidade deste ponto é denominado umidade crítica (M_c). Segundo Chirife (1983), os valores de umidade crítica não são somente característicos de cada material, mas também depende de outros fatores que controlam a migração (interna/externa) tais como espessura do material e condições do ar, velocidade, temperatura e umidade relativa.

II) Período de taxa de secagem decrescente: No período de taxa decrescente de secagem, representado pelo intervalo C-E, observa-se que quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir, ocorre o abaixamento progressivo da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a velocidade de secagem também diminui, até que, ao final desse período, o produto estará em equilíbrio com o ar (igualdade de pressões parciais de vapor) e a velocidade de secagem torna-se nula (PARK *et al.*, 1999).

Segundo Park *et al.* (2007), durante o processo de secagem, a umidade no interior do sólido movimenta-se até a superfície por meio de diferentes mecanismos. Os mecanismos mais importantes são:

Difusão líquida: ocorre devido à existência do gradiente de concentração de umidade dentro do produto.

Difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura necessário para vaporizar a água líquida contida no produto.

Escoamento de líquido e de vapor: ocorre devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura. Todas estas considerações, tais como: teor de umidade inicial do material, teor de umidade final que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), modo como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte de água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

Portanto, cada mecanismo pode predominar num dado período do processo de secagem, sendo substituído por outro no período seguinte. Os mecanismos mais comuns, ou que predominam sobre os demais, são os de difusão, para os materiais amorfos, e de capilaridade, para os porosos. Em sólidos relativamente homogêneos,

como amorfos e fibrosos, a umidade se move em direção à superfície principalmente por difusão. De acordo com Okada *et al.* (1987), o processo por difusão, na secagem, acontece no período de taxa decrescente.

Segundo Bortolaia (2011), a secagem é o processo que consiste na retirada de água dos grãos por evaporação até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura. Observa-se que a secagem de um sólido depende de sua estrutura, teor de umidade inicial, teor de umidade da superfície exposta, bem como dos parâmetros de secagem como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.

Puzzi (1986) afirma que secagem é a operação que tem por finalidade reduzir o teor de umidade do produto até um nível adequado à sua estocagem por um período prolongado, sendo a principal operação no sentido de se obter um produto de boa qualidade.

De acordo com Hall (1980), a redução do teor de água dos grãos envolve simultaneamente processos de transferência de calor e massa, o que pode alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem.

Cavalcanti Mata (2002) afirma que a secagem de sementes pode ser definida como um processo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que pode ser realizada por convecção ou por condução. O processo de secagem é aplicado para reduzir o teor de umidade de produtos agrícolas. Desse modo, é reduzida disponibilidade de água para: (i) o desenvolvimento de fungos e bactérias, o que evita o surgimento de grãos ardidos e micotoxinas, (ii) a realização do processo de respiração dos grãos que provoca perda de peso e gera calor e (iii) a execução de reações bioquímicas que promovem a auto-degeneração do produto.

Segundo Fiorezi (2003), a remoção da água deve ser feita em um nível tal que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado de modo a preservar a aparência, as qualidades nutritivas e a viabilidade das sementes.

Lima *et al.* (2013), afirma que a secagem é um processo importante pelos seus vários benefícios na produção e comercialização de produtos agrícolas, dos quais pode-se citar: a antecipação da colheita, redução da perda dos grãos ainda na lavoura pelos ataques das pragas, armazenamento por longos períodos de tempo, mantendo excelência na qualidade do produto, além de impedir o desenvolvimento de microorganismos e

insetos, permitindo também a formação de estoques e propiciando ao produtor melhores preços no período de entressafra.

Para a maioria dos autores, a secagem é a operação mais importante no beneficiamento de grãos, a qual tem por objetivo reduzir a umidade até níveis que permitam a conservação de sua qualidade (MENEGETTI, 2008). Dentre eles, percebe-se alguns pontos de vistas convergentes em afirmarem que a secagem artificial é realizada a partir de secadores específicos construídos para esse fim, onde o ar é forçado a passar pela massa de grãos, possibilitando a secagem de grandes quantidades de grãos em curtos espaços de tempo (AOSANI, 2007). Obviamente a intensidade da secagem é dependente das condições de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.

A secagem de sementes tem a finalidade de se retirar o excesso de umidade até atingir níveis adequados que permitam obter elevada qualidade com alta porcentagem de germinação, vigor, longevidade e que possam ter um bom desempenho frente a ataque de insetos e doenças (RAZERA, 1975). Portanto, a secagem inadequada, bem como atrasos e/ou demora no processo, podem causar perdas irreversíveis na qualidade física e fisiológica da semente (MAIA, 1995).

A secagem dos frutos de mamona, etapa intermediária entre a colheita e a obtenção das sementes para o processamento, pode ser realizada de forma natural ou artificial (Silva *et al.*, 2014a).

A secagem natural caracteriza-se pela utilização dos raios solares como fonte de calor, podendo ser processada em terreiros (os mais aconselhados são os de alvenaria), encerrados, nas condições dos campos de cultivo, etc. Geralmente não são empregados artifícios para o aumento da taxa de secagem como: o aquecimento do ar e/ou o aumento de velocidade do ar. Esse processo é o mais utilizado para secagem de mamona no Brasil, sendo recomendada para pequenas produções e feita expondo-se os frutos ao sol, após o seu desprendimento do cacho, em terreiros cimentados ou de alvenaria (Silva *et al.*, 2014a). Os frutos são colocados em camadas finas e uniformes com de 5 a 10 cm de espessura, por um período de 4 a 15 dias, dependendo da região. Durante o dia recomendam-se fazer o revolvimento várias vezes, para uniformizar a secagem e, à tardinha, amontoá-los e cobri-los com lona plástica, para evitar a umidade da noite. O mesmo procedimento deve ser adotado se houver ameaça de chuva (Silva *et al.*, 2014a).

O sistema de secagem natural é amplamente utilizado em nosso meio, por apresentar as seguintes vantagens:

- ✚ aparentemente não exige conhecimento técnico;
- ✚ as instalações são simples e baratas;
- ✚ usa fonte natural de energia;
- ✚ nossas condições climáticas são favoráveis.

Por outro lado, apresenta alguns inconvenientes graves, tais como:

- ✚ é um processo lento, que demanda tempo;
- ✚ dependência das condições climáticas;
- ✚ exige muita mão-de-obra, por serem quase todas as operações manuais;
- ✚ apresenta baixo rendimento.

De acordo com Silva *et al.* (2014a), a principal desvantagem do processo de secagem natural para mamona é o alto tempo de processamento e a exposição do produto a intempéries.

Na secagem artificial são empregados artifícios para aumentar a taxa de secagem, os quais encontram-se disponibilizados em equipamentos denominados secadores, que utilizam a energia calorífica e/ou mecânica (aquecimento ou movimentação do ar).

A secagem artificial de mamonas é recomendada para produções em áreas superiores a 50 hectares e consiste na utilização de secador mecânico para a retirada da umidade dos frutos. A temperatura ideal de secagem é de 50 a 55°C. A umidade ideal dos frutos é de 10%, quando acontece a deiscência das cápsulas. Os secadores artificiais apresentam como benefício, em relação à secagem em terreiro, o controle do processo e a possibilidade de uso contínuo (Silva *et al.*, 2014a).

De acordo com Brooker *et al.* (1992), a secagem artificial permite uma série de vantagens que são descritas abaixo:

- ❖ Colheita prematura, que reduz as perdas de campo devido a perdas naturais;
- ❖ Planejamento da época da colheita para fazer melhor uso da mão-de-obra, porque a colheita dependente do conteúdo de água do grão no campo;
- ❖ Armazenamento por tempo longo sem deterioração;

- ❖ Permite aos agricultores armazenar o produto e em poucos meses depois da colheita, conseguir alto preço, podendo se obter um aumento no preço de 25 a 100%;
- ❖ Mantém a viabilidade das sementes, pois devido a remoção da umidade, evita-se a possibilidade de aquecimento do produto com subsequente redução ou destruição da germinação;
- ❖ Permite ao agricultor vender um produto de melhor qualidade.

Existem vários métodos de secagem artificial, dentre eles pode-se destacar:

- a) **Ar forçado sem aquecimento:** é um secador que faz o uso somente do ar atmosférico, que é insuflado através da utilização de ventiladores. Normalmente são utilizados os próprios silos de armazenamento (Figura 2.8).

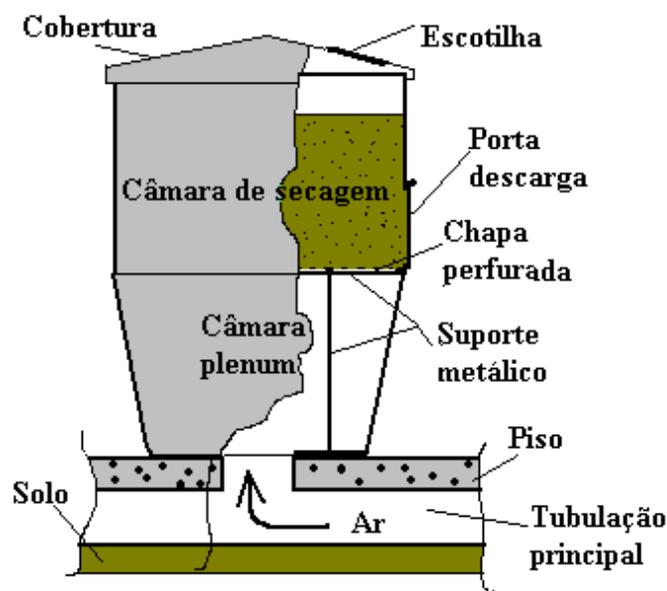


Figura 2.8 - Processo ar forçado sem aquecimento.

Fonte: Arf e Bolonhezi (2012).

- b) **Ar forçado com aquecimento suplementar:** é um processo bastante parecido com o anterior, apenas aumentando a temperatura do ar insuflado em 5,5 a 8,5°C. Utilizado até que as sementes atinjam 14 - 15% de umidade, a partir daí pode utilizar apenas o ar forçado sem aquecimento.

- c) **Ar quente forçado:** este tipo de secador funciona ao mesmo tempo com os dois elementos da secagem, ou seja, a temperatura e a movimentação do ar (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Processo ar quente forçado.

Fonte: Arf e Bolonhezi (2012).

2.3.2 Fundamentos da migração de umidade em produtos agrícolas

Numa economia que está se tornando cada vez mais globalizada, a distribuição de produtos agrícolas e de outros produtos biológicos está crescendo, e normalmente processos de secagem são necessários para assegurar estabilidade durante o armazenamento e o transporte, uma vez que o teor de umidade é reduzido e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para:

- i) o desenvolvimento de fungos e bactérias, que causam degradação microbológica,
- ii) o processo de respiração dos alimentos, que provoca perda de peso e gera calor, e
- iii) a ocorrência de reações bioquímicas que promovem a auto-degradação do produto.

De acordo com Lasseran (1979) e Park (1988), a água no interior da semente pode estar ligada de diferentes formas nas estruturas orgânicas das sementes:

- ❖ “água livre”, é a água fracamente retida e ocupa os espaços intergranulares;
- ❖ “água de adsorção”, é a água que é retida e adsorvida na superfície sólida, mantendo algumas substâncias dissolvidas nas células, tais como o amido, açúcares e ácidos;
- ❖ “água de absorção”, é a água que está fortemente retida e atraída por forças capilares nos interstícios do material sólido; está ligada à matéria de forma eletromagnética;
- ❖ “água de constituição”, é a água que está quimicamente ligada às moléculas das sementes, sendo parte integrante da estrutura celular.

Já segundo Park *et al.* (2007), a água contida no produto pode estar de duas formas:

- ✚ Água livre, que é a água que está simplesmente adsorvida no material, e a mais abundante. É fracamente ligada ao substrato e funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e as reações químicas;
- ✚ Água ligada, que é a água da constituição, fazendo parte da estrutura do produto, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Dependendo da natureza da amostra, requer temperaturas diferentes para a sua remoção, que freqüentemente não é total e em alguns casos não é eliminada nem a temperaturas que carbonizam parcialmente a amostra. A água ligada não é removida na maioria dos métodos de determinação de teor de umidade.

Ainda segundo Lasseran (1979), para sementes de milho a uma temperatura de 15°C, as relações de umidade com as forças que as retém na semente são: água livre acima de 27% de umidade, água adsorvida entre 13 a 27%, água absorvida entre 5 a 13% e de constituição abaixo de 5%.

Durante o processo de secagem, normalmente são removidas a água livre e a adsorvida, pois envolvem para sua retirada, um baixo nível de energia, chamado de calor latente de vaporização. Como é um processo de eliminação de líquido por evaporação, é necessário o fornecimento de calor para tal procedimento e um sorvedor para remover o vapor de água que se forma na superfície do produto a ser seco (BIAGI *et al.*, 1992).

A presença de água livre no produto torna-o inapto para o armazenamento, pois pode haver desenvolvimento de fungos e bactérias. Este tipo de água é facilmente evaporado no processo de secagem.

Observa-se que a água apresenta moléculas em estado contínuo de rápido movimento. Porém, segundo Gonçalves (1974), quando a temperatura da água em estado líquido se eleva, ocorre um aumento no deslocamento de suas moléculas, o que acarreta no rompimento das ligações de pontes de hidrogênio entre estas, transformando-se em vapor de água.

O termo geral sorção é usado para denotar a interação entre a água e a substância adsorvedora. Os termos gerais adsorção e dessorção são usados especialmente para denotar o processo de ganho e perda de água por sorção, respectivamente. Na Figura 2.10 é apresentado um ambiente (ar) com uma determinada temperatura, T , e umidade relativa, UR , constantes, sob o qual é colocado um grão qualquer.

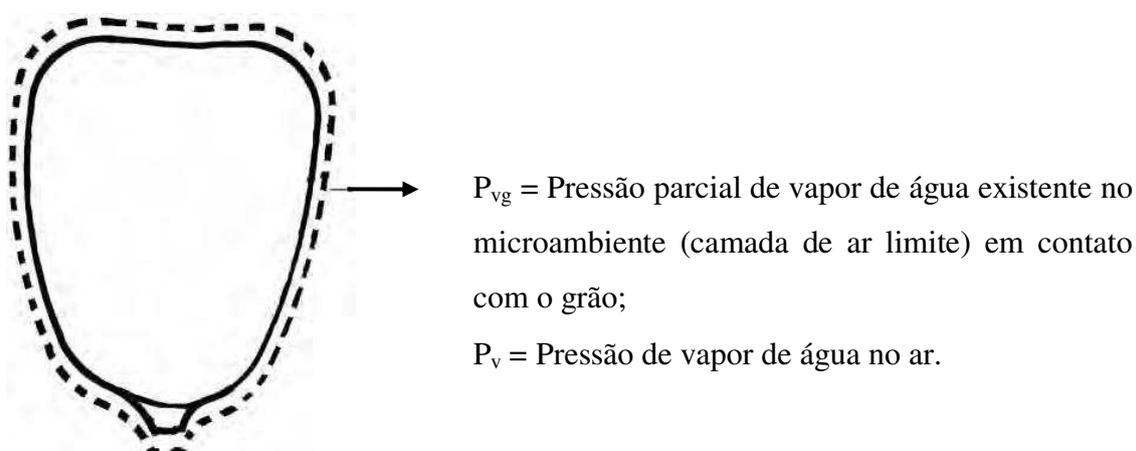


Figura 2.10 - Pressões parciais de vapor de água no ar, P_v , e na superfície do grão, P_{vg} .
Fonte: Puzzi (1986).

A umidade relativa do ar do ambiente, representado na Figura 2.10, é dada pela seguinte expressão:

$$UR = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (2.4)$$

em que:

UR - Umidade relativa do ar, %;

P_v - Pressão de vapor de água presente no ar, (Pa);

P_{vs} - Pressão de vapor de água presente no ar saturado à temperatura de bulbo seco, (Pa).

Quando a pressão parcial de vapor de água presente no ar é igual à pressão parcial de vapor de água na superfície do grão, $P_v = P_{vg}$, diz-se então que o grão está em equilíbrio higroscópico com o ar que o envolve. Logo não ocorre troca recíproca de umidade (água) entre o ar e o grão.

No processo de secagem, a relação entre a pressão parcial de vapor de água existente no microambiente (camada de ar limite) em contato com o grão e a pressão de vapor de água saturado presente no ar à temperatura de bulbo seco é definida atividade de água. Isto é:

$$a_w = \frac{P_{vg}}{P_{vs}} \quad (2.5)$$

em que:

a_w - Atividade de água no grão, em decimal.

Os grãos de mamona, assim como a maioria dos produtos agrícolas, possuem a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente. Se o teor de umidade aumenta, o risco de desenvolvimento de fungos torna-se maior, comprometendo a qualidade do produto. No entanto, a redução do teor de umidade promove perdas econômicas devido à perda de massa do produto (YAZDANI *et al.*, 2006).

No equilíbrio higroscópico, a atividade de água dos grãos é numericamente igual à umidade relativa do ar (BROOKER *et al.*, 1992). Nesse caso, o teor de umidade do grão é igual ao teor de umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar. Ou seja:

$$a_w = UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.6)$$

Uma definição importantíssima, principalmente para o processo de secagem, é o teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}), que é o teor de umidade de um material higroscópico depois de exposto a um ambiente sob condições de temperatura e umidade relativa controladas, após um longo período de tempo.

O teor de umidade de equilíbrio é útil na determinação da perda ou ganho de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa, relacionando-se diretamente com os processos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas (GHODAKE *et al.*, 2007).

De acordo com Silva (2007), o teor de umidade de equilíbrio representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Logo, um material está higroscopicamente em equilíbrio com o ambiente onde se encontra quando a pressão de vapor de água correspondente ao teor de umidade do material for igual à pressão de vapor de água do ar no ambiente que o circunda.

Um dos importantes parâmetros do material a ser seco é o teor de umidade do produto, definido como a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria. Segundo Silva (2007), o teor de umidade é a quantidade de água que pode ser removida do material sem alterações da estrutura molecular do sólido.

O teor de umidade do produto pode ser representado em base úmida (b.u.) ou em base seca (b.s.). O primeiro é usado na comercialização e o segundo em cálculos específicos.

O teor de umidade na base úmida é a relação entre a quantidade de massa de água e a quantidade de massa total do produto.

$$M_{(b.u.)} = \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{ms}} \right) \cdot 100 \quad (2.7)$$

em que:

$M_{(b.u.)}$ é teor umidade em base úmida, (%);

m_{H_2O} é a massa da água contida no produto, (kg);

m_{ms} é a massa de matéria seca do produto, (kg).

O teor de umidade em base seca, $M_{(b.s.)}$, é a relação entre a quantidade de massa de água e a quantidade de massa de matéria seca contida no produto.

$$M_{(b.s.)} = \left(\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \right) \quad (2.8)$$

em que:

$M_{(b.s.)}$ é teor umidade em base seca, decimal.

O teor de umidade em base úmida pode ser transformado para a base seca e vice-versa. De acordo com Silva (1995), a mudança de base úmida para base seca ou vice-versa, podem ser obtidas por meio das seguintes equações:

❖ De base úmida para base seca.

$$M_{(b.s.)} = [M_{(b.u.)} / (100 - M_{(b.u.)})] \cdot 100 \quad (2.9)$$

❖ De base seca para base úmida.

$$M_{(b.u.)} = [M_{(b.s.)} / (100 + M_{(b.s.)})] \cdot 100 \quad (2.10)$$

em que:

$M_{(b.u.)}$ é teor umidade em base úmida, (%);

$M_{(b.s.)}$ é teor umidade em base seca, (%).

A Tabela 2.6 apresenta algumas conversões diretas de base úmida para base seca.

Tabela 2.6 - Conversão do teor de umidade em base úmida (%) para base seca (decimal).

M					
b.u.	b.s.	b.u.	b.s.	b.u.	b.s.
8	0,087	15	0,176	22	0,282
9	0,099	16	0,190	23	0,299
10	0,111	17	0,200	24	0,316
11	0,123	18	0,220	25	0,333
12	0,136	19	0,234	26	0,351
13	0,150	20	0,250	27	0,370
14	0,163	21	0,265	28	0,389

Fonte: Silva *et al.* (2005).

Em geral, é comum expressar o teor de umidade em base úmida, em porcentagem, uma vez que é uma variável cujo valor está entre 0 e 100 %. Já o teor de

umidade em base seca é geralmente expresso em decimal, uma vez que essa variável pode assumir qualquer valor entre zero e infinito.

Diversos modelos teóricos, semiteóricos e empíricos têm sido propostos para expressar o teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas. No entanto, os modelos teóricos não conseguem prever, com precisão, o teor de umidade de equilíbrio de grãos, em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar. A Tabela 2.7 contém os modelos mais comuns utilizados para prever o teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas (CORRÊA *et al.*, 1998; PARK *et al.*, 2001; RESENDE *et al.*, 2006; PARK *et al.*, 2007; COSTA *et al.*, 2013).

Tabela 2.7 - Modelos matemáticos utilizados para ajustes de isotermas de sorção de teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo
LANGMUIR	$\frac{M_{eq}}{M_m} = \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w}$
BET (Brunauer, Emmet e Teller)	$M_{eq} = \frac{(M_m \cdot C \cdot a_w) \cdot (1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1})}$
BET linearizado	$\frac{a_w}{(1 - a_w) \cdot M_{eq}} = \frac{1}{M_m \cdot C} + \frac{a_w \cdot (C - 1)}{M_m \cdot C}$
GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)	$M_{eq} = \frac{M_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$
CHEN	$a_w = \exp\left[\frac{k + A \cdot \exp(B \cdot M_{eq})}{T}\right]$
CHEN e CLAYTON	$a_w = \exp\left[\frac{A \cdot T^B \cdot \exp(-C \cdot T^D \cdot M_{eq})}{T}\right]$
CHUNG e PFOST	$\ln(a_w) = -\frac{A}{R \cdot T} \cdot \exp\left[\frac{B \cdot M_{eq}}{T}\right]$
HALSEY	$a_w = \exp\left(\frac{-A}{M_{eq}^B}\right)$
OSWIN	$M_{eq} = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^B$
HENDERSON	$1 - a_w = \exp\left[\frac{k \cdot M_{eq}^n}{T}\right]$
AGUERRE	$Y \cdot \ln(a_w) = k_1 \cdot k_2^{M_{eq}}$
PELEG	$M_{eq} = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2}$

Sendo A, B, C, D, n, K, k, k₁, k₂, n₁, n₂ constantes das equações.

em que:

M_{eq} - Teor de umidade de equilíbrio, $kg \cdot kg^{-1}$;

M_m - Teor de umidade na monocamada molecular, $kg \cdot kg^{-1}$;

a_w - Atividade de água, adimensional;

T - Temperatura, °C;

R - Constante universal dos gases; e $Y = \left(\frac{1}{380,5} - \frac{1}{T} \right) - 1$.

O modelo de Henderson e o de Chung-Pfost são os que melhor expressam o teor de umidade de equilíbrio em grãos, para faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa. No entanto, modificações empíricas melhoraram substancialmente esses modelos, tornando aplicáveis em faixas mais amplas de temperaturas e umidades relativas (NAVARRO e NOYES, 2001). A Tabela 2.8 contém alguns modelos modificados empiricamente utilizados para prever o teor de umidade equilíbrio.

Tabela 2.8 - Modelos matemáticos modificados empiricamente para ajustes de isotermas de sorção de teor de umidade de equilíbrio.

Designação do modelo modificado	Modelo
HENDERSON	$M_{eq} = 0,01 \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-K(T + C)} \right]^{\frac{1}{N}}$
CHUNG & PFOST	$M_{eq} = -\frac{1}{B} \cdot \ln \left[-\frac{(T + C)}{A} \cdot \ln(UR) \right]$
HALSEY	$UR = \exp \left[-\frac{\exp(A + B \cdot T)}{(M_{eq})^C} \right]$
OSWIN	$UR = \left[-\left(\frac{(A + B \cdot T)}{M_{eq}} \right)^C + 1 \right]^{-1}$
GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)	$M_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot UR}{(1 - B \cdot UR) \cdot (1 - B \cdot UR + B \cdot C \cdot UR)}$

Sendo A, B, C, N, K, constantes das equações.

em que:

M_{eq} - Teor de umidade de equilíbrio, $kg \cdot kg^{-1}$;

UR – Umidade relativa, em decimal;

T - Temperatura, °C;

Goneli (2008), estudando a higroscopicidade de grãos de mamona da variedade Guarani, concluiu que o modelo de Halsey Modificado apresentou os melhores resultados para dessorção e adsorção, sendo o modelo recomendado para a representação do teor de umidade de equilíbrio dos grãos de mamona, obtido por dessorção e adsorção. Já Oliveira *et al.* (2013), relatam que modelo de Oswin apresentou estatisticamente o melhor ajuste aos dados experimentais do teor de umidade de equilíbrio para grãos de milho. Costa *et al.* (2013), constataram através de parâmetros estatísticos que os modelos de Copace e Oswin Modificado são os que melhor representam a higroscopicidade dos frutos de crambe.

As Tabelas 2.9 e 2.10 contém os valores dos parâmetros dos modelos de Henderson e Chung-Pfost modificados, respectivamente, para diversos produtos agrícolas.

Tabela 2.9 - Parâmetros da equação de Henderson modificada para diversos produtos agrícolas.

Produto	Parâmetros		
	K	C	N
Cevada	$2,2919 \times 10^{-5}$	195,267	2,0123
Feijão	$2,0899 \times 10^{-5}$	254,23	1,8812
Milho	$8,6541 \times 10^{-5}$	49,810	1,8634
Amendoim em grão	$65,0413 \times 10^{-5}$	50,561	1,4984
Amendoim em casca	$6,6587 \times 10^{-5}$	23,318	1,5362
Arroz em casca	$1,9187 \times 10^{-5}$	51,161	2,4451
Sorgo	$0,8532 \times 10^{-5}$	113,725	2,4757
Soja	$50,3633 \times 10^{-5}$	43,016	1,3628
Trigo (durum)	$2,5738 \times 10^{-5}$	70,318	2,2110
Trigo (hard)	$2,3007 \times 10^{-5}$	55,815	2,2857
Trigo (soft)	$1,2299 \times 10^{-5}$	64,346	2,5558
Mandioca	$0,2892 \times 10^{-5}$	64,3551	1,7267
Cacau	$4,1942 \times 10^{-5}$	0,0	2,7296
Feijão preto	$3,7198 \times 10^{-5}$	273,16	1,6260

Fonte: Navarro e Noyes (2001).

Tabela 2.10 - Parâmetros da equação de Chung-Pfost modificada para diversos produtos agrícolas.

Produto	Parâmetros		
	A	B	C
Cevada	761,74	19,889	91,323
Feijão	671,78	14,964	120,098
Milho	312,31	16,958	30,205
Amendoim em grão	254,98	29,243	33,892
Amendoim em casca	521,99	17,903	12,354
Arroz em casca	594,65	21,733	35,703
Sorgo	1099,68	19,644	102,849
Soja	138,45	14,967	24,576
Trigo (durum)	921,69	18,077	112,350
Trigo (hard)	529,45	17,609	50,998
Trigo (soft)	725,89	23,607	35,662

Fonte: Navarro e Noyes (2001).

2.3.3 Modelos matemáticos de secagem

Sabe-se que existem diversos processos de secagem que têm sido descritos e modelados matematicamente por muitos pesquisadores ao longo de muitas décadas. Para fazer uma correlação dos dados experimentais da secagem de um produto a um modelo matemático, os estudiosos da área de secagem vêm difundindo uma série de modelos que representam a cinética de secagem para cada tipo de produto. Alguns desses modelos também possibilitam prever a distribuição de umidade no interior do produto, em qualquer instante de tempo.

A utilização de modelos matemáticos na secagem de produtos agrícolas é de fundamental importância, pois com tais modelos torna-se possível a simulação matemática da operação de secagem e com isso o estudo do comportamento das variáveis relacionadas ao processo (LEITE *et al.*, 2005).

2.3.3.1 Modelos empíricos

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma correlação direta entre o teor de umidade médio do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. De acordo com Silva (2007), os modelos empíricos geralmente descrevem bem a cinética de secagem, mas não possibilitam visualizar a distribuição de umidade no interior do produto, em um instante de tempo previamente especificado. O modelo que tem sido mais testado em estudos de cinética de secagem de produtos agrícolas é o modelo proposto por Thompson *et al.* (1968). Outra limitação que possui os modelos empíricos é que eles não são adequados para descrever a cinética de secagem intermitente (BAINI E LANGRISH, 2007). Mesmo apresentando algumas limitações, os modelos empíricos são bastante encontrados na literatura. A Tabela 2.11 apresenta algumas equações empíricas referentes a esses modelos.

Tabela 2.11 - Equações empíricas para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Designação do Modelo	Modelo
Newton	$\bar{M}^* = \exp(-k \cdot t)$
Page	$\bar{M}^* = \exp(-k \cdot t^n)$
Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Dois Termos	$\bar{M}^* = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Wang Sing	$\bar{M}^* = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2)$
Midilli	$\bar{M}^* = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Aproximação de difusão	$\bar{M}^* = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$
Thompson	$t = a \cdot \ln(\bar{M}^*) + b \cdot [\ln(\bar{M}^*)]^2$

Fonte: Elaboração própria.

em que:

\bar{M}^* = teor de umidade adimensional (razão de umidade), sendo $\bar{M}^* = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$;

t = tempo de secagem (h);

k, k_0 e k_1 = constantes de secagem;

a, b, n = coeficientes dos modelos.

Corrêa *et al.* (2007) utilizaram 12 modelos matemáticos para descrever o processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Com base em parâmetros estatísticos, os autores concluíram que a metade dos modelos testados representava bem a cinética de secagem. Dentre estes, o modelo clássico de Page foi selecionado, pela sua simplicidade e pelo seu uso disseminado no meio científico, para descrever a cinética de secagem dos produtos vegetais.

Já Resende *et al.* (2008), modelaram matematicamente, através do modelo de Page, dados experimentais de cinética de secagem para duas variedades de feijão (preto e vermelho). Os autores, além de concluírem que segundo a técnica de identidade de modelos não é possível utilizar um único modelo de Page com os mesmos coeficientes “k” e “n” para representar a secagem dos feijões preto e vermelho, observaram que os coeficientes de difusão efetivos para as duas variedades aumentaram com o aumento da temperatura de ar secagem.

Ao testar 10 modelos matemáticos para prever o processo de secagem de grãos de mamona da variedade Guarani, Goneli (2008) constatou através de parâmetros estatísticos que os modelos de Page, Henderson e Pabis, e Midilli foram os que melhor representaram o fenômeno de secagem dos grãos de mamona. Porém, o modelo de Page, por apresentar um número menor de parâmetros, foi escolhido para representar a cinética de secagem dos grãos de mamona da variedade Guarani em camada fina.

2.3.3.2 Modelos de difusão

Define-se a difusão como sendo um dos mecanismos de transporte em que a transferência de energia ou matéria ocorre pelo movimento molecular devido à existência de um gradiente de temperatura ou de concentração, estando o meio em estado estacionário. Estes processos podem ser representados pelas equações de difusão térmica (lei de Fourier) ou difusão mássica (Lei de Fick), que são equações decorrentes da equação geral de transporte (equação de conservação), dependendo do problema que se esteja trabalhando.

Para melhor entendimento, considere a equação de transporte:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.11)$$

em que

Φ é a variável dependente de interesse;

λ e Γ^Φ são coeficientes de transporte;

\vec{v} é o vetor velocidade do meio;

S^Φ é o termo fonte;

t é o tempo.

Na Equação (2.11), o primeiro termo representa a variação de uma grandeza no decorrer do tempo, conhecido como termo transiente. O segundo termo, denominado termo advectivo, indica a variação da grandeza com a posição num meio movendo-se com uma velocidade \vec{v} dentro do volume de controle. Já o terceiro termo, representa a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão, chamado de termo difusivo. Por fim, o último termo, denominado de termo fonte, dá a taxa de geração da grandeza dentro do volume de controle.

Para obter-se a equação de difusão, basta tomar como nulos o termo advectivo, o que para isso é bastante admitir que $|\vec{v}| = 0$, e o termo de geração da grandeza Φ ($S=0$).

Logo, a equação de difusão, muito utilizada para descrever o transporte de água em meios porosos, pode ser escrita da seguinte forma (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; BIRD *et al.*, 2001):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) \quad (2.12)$$

Para se resolver a Equação (2.12) analiticamente, com o objetivo de descrever um processo de secagem, devem ser definidas as condições iniciais e de contorno e serem estabelecidas as seguintes hipóteses:

- ❖ o mecanismo de transporte de massa ou calor no interior do sólido é somente a difusão;
- ❖ a distribuição inicial de umidade ou temperatura deve ser uniforme;
- ❖ as dimensões do sólido não variam durante a difusão;

- ❖ os coeficientes convectivos de transferência de massa ou calor são constantes durante a difusão;
- ❖ a difusividade efetiva da massa ou térmica não variam durante a difusão;
- ❖ o sólido é considerado homogêneo e isotrópico.

As soluções analíticas da equação difusão, considerando as hipóteses acima, podem ser obtidas para algumas geometrias utilizando o método de separação de variáveis.

Se a variável de interesse é a temperatura, obtém-se a equação de difusão de calor, substituindo $\Phi = \theta$ e $\Gamma^\Phi / \lambda = \alpha = k/\rho c_p$, isto é, $\lambda = \rho c_p$ e $\Gamma^\Phi = k$, onde α é a difusividade térmica, k é a condutividade térmica, ρ é a densidade, θ é a temperatura e c_p é o calor específico do material à pressão constante. Logo, a equação de difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fourier), assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho c_p \theta)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla \theta) \quad (2.13)$$

Considerando ρ e c_p constantes, a Equação (2.13) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla \theta) \quad (2.14)$$

Já a equação de difusão de massa é obtida da Equação 2.12, assumindo que $\lambda = 1$, $\Phi = M$ e $\Gamma^\Phi / \lambda = D$, onde D é o coeficiente de difusão de massa e M é o teor de umidade do produto, em base seca (b.s.). A equação da difusão de massa no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fick) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.15)$$

O coeficiente de difusão de massa é uma importante propriedade de transporte, usado no cálculo e modelagem de várias operações que envolvem movimento da

umidade interna, como a desidratação, secagem, embalagem e armazenamento. Este é definido como a taxa de transferência de uma substância que se difunde através de um espaço com gradiente de concentração, por unidade de área. Pode-se entender esta propriedade como a facilidade com que a água é removida do produto.

O mecanismo de transporte de água no interior do sólido é geralmente descrito pela teoria da difusão líquida. No entanto, de acordo com Carmo (2004), existem outros tipos de mecanismos de difusão, dos quais pode-se citar:

- ❖ Teoria da condensação-evaporação, considera que nesse mecanismo, o vapor de água no interior do produto é condensado perto da superfície, com a taxa de condensação igual à taxa de evaporação;
- ❖ Teoria capilar, que se refere ao fluxo de um líquido através dos interstícios e sobre a superfície de um sólido, devido a atrações moleculares entre o líquido e o sólido;
- ❖ Teoria de Luikov considera que os fluxos de água devido à difusão tanto de vapor quanto de líquido, são devido a gradientes de temperatura, de concentração de umidade e de pressão no interior do sólido;
- ❖ Teoria de Krischer enfatiza que, durante a secagem, o fluxo de umidade pode acontecer no estado líquido, por capilaridade, ou no estado de vapor devido ao gradiente de concentração de vapor;
- ❖ Teoria de Philip e De Vries considera que, em meios porosos, a água é movida através da difusão de vapor e por capilaridade.

Na literatura são reportados diversos trabalhos que utilizam o modelo difusivo para descrever o processo físico de transferência de calor e massa, considerando as diversas formas geométricas dos corpos objetos de estudo.

Lima (1999) obteve soluções analíticas e numéricas da equação de difusão bidimensional para sólidos esferoidais prolatos, com propriedades termofísicas constantes ou variáveis e condições de contorno convectiva ou de equilíbrio, com ou sem encolhimento, usando o método de volume finito. Na solução numérica utilizou malhas ortogonais, geradas por expressões analíticas, válidas somente para elipsóides. O referido autor encontrou resultados consistentes com dados experimentais da literatura ao estudar a secagem de bananas, variedade “nanição”.

Hacihafizoğlu *et al.* (2008) utilizaram o modelo da difusão líquida, aplicada a sólidos esferoidais prolatos, para simular a secagem de arroz em casca. A solução da equação de difusão foi ajustada aos dados experimentais e, ao compararem os resultados experimentais com os obtidos analiticamente para as formas esferoidais, esféricas e cilíndricas, concluíram que a geometria esferoidal prolata teve uma melhor concordância do que as outras geometrias.

Já Silva *et al.* (2008) realizaram uma simulação numérica da difusão da água em sólidos cilíndricos, considerando que os coeficientes de transporte e o raio do cilindro variavam durante o processo. A modelagem matemática desenvolvida foi aplicada para simular a secagem de bananas e arroz em casca, usando dados experimentais obtidos da literatura. Os autores concluíram que, ao considerar a difusividade de massa variável, os resultados são melhores que os obtidos supondo tal parâmetro constante.

Silva *et al.* (2009) utilizaram a equação de difusão de massa em coordenadas esférica para a determinação da difusividade efetiva de feijão de corda. Os autores ainda desenvolveram um otimizador que funciona adequadamente, e não faz precisa de valores iniciais para a determinação da difusividade, o que é uma vantagem em relação à análise de regressão não-linear e outros otimizadores que necessitam de uma definição de um intervalo de valores de D para a minimização.

Saykova *et al.* (2009) realizaram um estudo analítico para prever o coeficiente de difusão efetivo para placas retangulares e sólidos na forma de paralelepípedos a partir de curvas experimentais obtidas na secagem de materiais biológicos. A modelagem matemática baseou-se na lei de Fick tridimensional em coordenadas cartesianas, empregando condições de contorno de 1º tipo ou de Dirichlet. Os autores ainda estenderam as soluções analíticas unidimensionais obtidas para sistemas bi e tridimensionais pelo princípio da superposição.

Farias (2011) aplicou os modelos difusivos uni e bidimensionais para descrever a cinética de secagem e estimar os coeficientes de transporte difusivo e convectivo utilizando o Método dos Mínimos Quadrados. O autor obteve resultados que revelaram que os parâmetros temperatura e forma geométrica têm efeitos significativos nas cinéticas de secagem, aquecimento e encolhimento da banana prata. O autor ainda observou que os coeficientes de transporte de massa difusivo e convectivo tendem a aumentar com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Silva (2012a) apresentou soluções para a equação de difusão com condição de contorno do terceiro tipo, ao estudar o fenômeno da difusão transiente de massa em sólidos com formas cilíndricas e elipsoidais. A autora ainda desenvolveu ferramentas analíticas (otimizador acoplado à solução analítica) e numéricas para a descrição da difusão de massa em produtos com as formas mencionadas. Essas ferramentas desenvolvidas foram usadas para descrever o processo de secagem de bananas inteiras e em pedaços cilíndricos de vários comprimentos.

2.3.4 Equipamentos de secagem

Os equipamentos utilizados no processo de secagem são chamados de secadores. Esses equipamentos são construídos e comercializados sobre diversas formas para atender os mais variados produtores. Os secadores podem ser classificados de várias maneiras, de acordo com suas características específicas (Tabela 2.12).

Tabela 2.12 - Classificação de secadores a partir das suas principais características.

Classificação	Sistema de secagem
Quanto ao tipo de fabricação	Móveis ou fixos (silos secadores, de torre)
Quanto ao sistema de carga	Intermitente ou contínuo
Quanto à ventilação	Insuflação de ar ou aspiração do ar
Quanto ao fluxo de ar	Concorrente, contracorrente, cruzado ou misto
Quanto à torre de secagem	Calhas paralelas, cruzadas, colunas e câmara descanso
Quanto ao sistema de descarga	Bandeja mecânica, pneumática, de eclusas rotativas
Quanto ao combustível	Líquido, sólido ou gasoso
Ar da fornalha	Direto e indireto
Grau de automação	Secagem com controle manual e automatizada

Fonte: Weber (1995).

A seguir são apresentados os conceitos de alguns secadores utilizados na secagem de grãos e que, possivelmente, podem ser utilizados no processo de secagem de grãos e sementes de mamona.

2.3.4.1 Secadores de leito fixo

A secagem em secadores de leito fixo consiste basicamente em se forçar um fluxo de ar quente através da massa de grãos que permanece em repouso. A secagem neste tipo de secador se processa da base para o topo da camada de grãos, em um secador de fundo falso perfurado, e do centro para a periferia, em secador de tubo central perfurado (sementes). De acordo com Oro (1999), a troca de umidade que acontece entre os grãos e o ar ocorre em uma região chamada zona de secagem, que se move no sentido da camada inferior para a superfície da massa.

Geralmente, os secadores de leito fixo apresentam-se em forma de silos secadores, podendo assim também ser usado para armazenar os produtos agrícolas depois da sessão de secagem. A Figura 2.11 ilustra um secador de leito fixo.

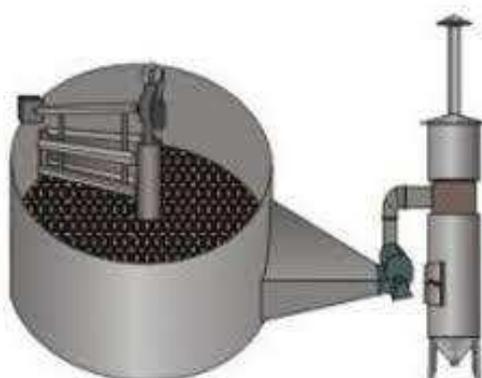


Figura 2.11 - Secador de leito fixo.

Fonte: Polidryer (2014).

2.3.4.2 Secadores de fluxo contínuo

Os secadores de fluxo contínuo são secadores em que os grãos são submetidos a uma corrente de ar, enquanto eles fluem continuamente através do secador. Puzzi (1986) afirma que nos secadores de fluxo contínuo os grãos fluem de modo a oferecer pouca resistência à passagem do ar quente.

Segundo Park *et al.* (2007), os secadores de fluxo contínuo se subdividem em vários grupos, de acordo com o modo de escoamento: secadores de fluxo concorrente, secadores de fluxo contracorrente, secadores de fluxo cruzado, secadores em cascata e secadores com promotores de mistura. Durante o processo de secagem os grãos sempre seguirão um único fluxo, que é fluxo na direção vertical, do alto da torre de secagem

para baixo (Figura 2.12). De acordo com Weber (2005), o ar de secagem e de resfriamento pode seguir diferentes fluxos: cruzado, concorrente, contracorrente e misto. A Figura 2.13 apresenta esquematicamente os diversos fluxos de ar durante o processo de secagem.

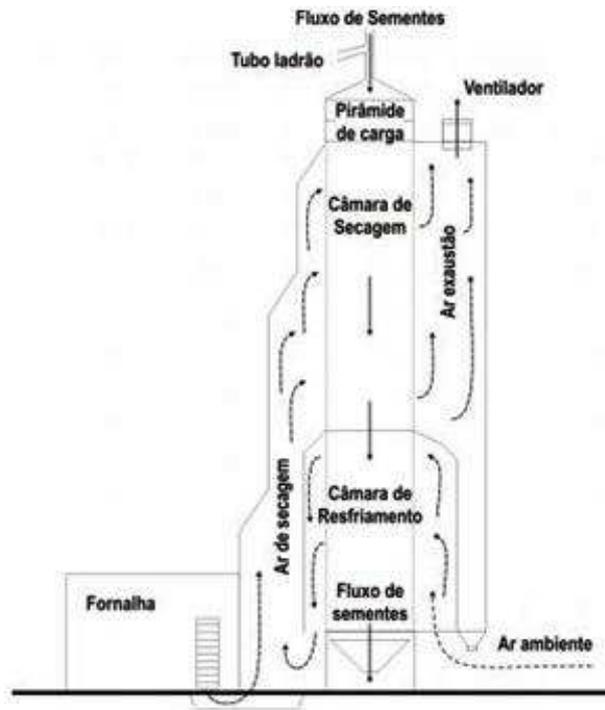


Figura 2.12 - Secador de fluxo contínuo.

Fonte: seednews.inf.br (2010).

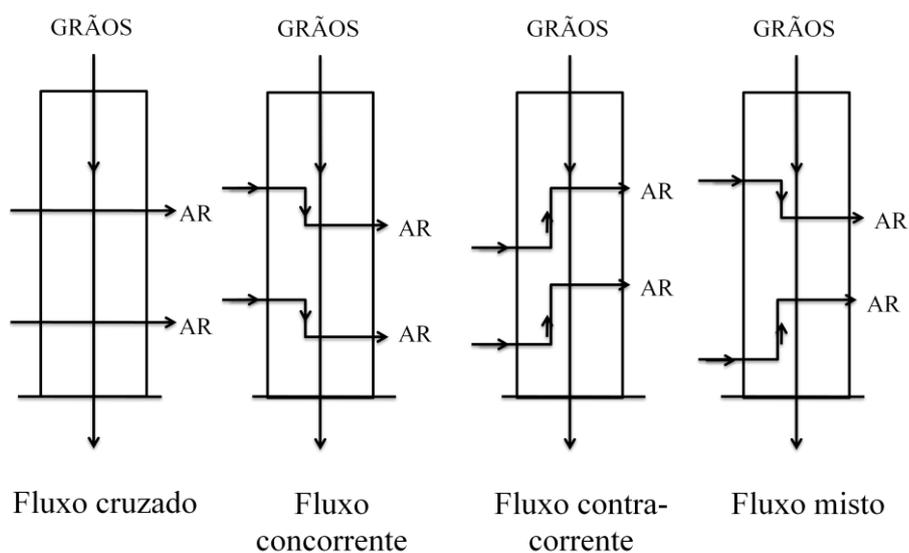


Figura 2.13 - Esquema dos fluxos de ar durante o processo de secagem.

Fonte: Weber (2005).

a) Secadores de fluxo cruzado

Nos secadores de fluxos cruzados o ar quente incide perpendicularmente a massa de grãos. Esses secadores são os mais utilizados em todo mundo por serem de simples construção e operação, e por apresentarem menor custo inicial em relação a outros modelos de secadores. Segundo Stevens e Thompson (1976), os secadores de fluxo cruzado são mais populares pela simplicidade de construção e baixo custo. No Brasil, os modelos existentes geralmente são de baixa capacidade e trabalham de forma intermitente, processando um lote de produto de cada vez.

Neste tipo de secador, o produto úmido é colocado em uma moega superior e por gravidade desce pelo secador, onde é secado até uma determinada umidade, resfriado e descarregado na parte inferior.

Os secadores de fluxos cruzados com recirculação do produto possuem as desvantagens de maior risco de superaquecimento do produto, alto consumo de energia, desuniformidade quando trabalhando de forma contínua ou em camada fixa e baixa eficiência de secagem. A Figura 2.14 abaixo mostra o esquema de funcionamento dos secadores de fluxos cruzados (a) e um modelo que pode trabalhar também de forma contínua (b).

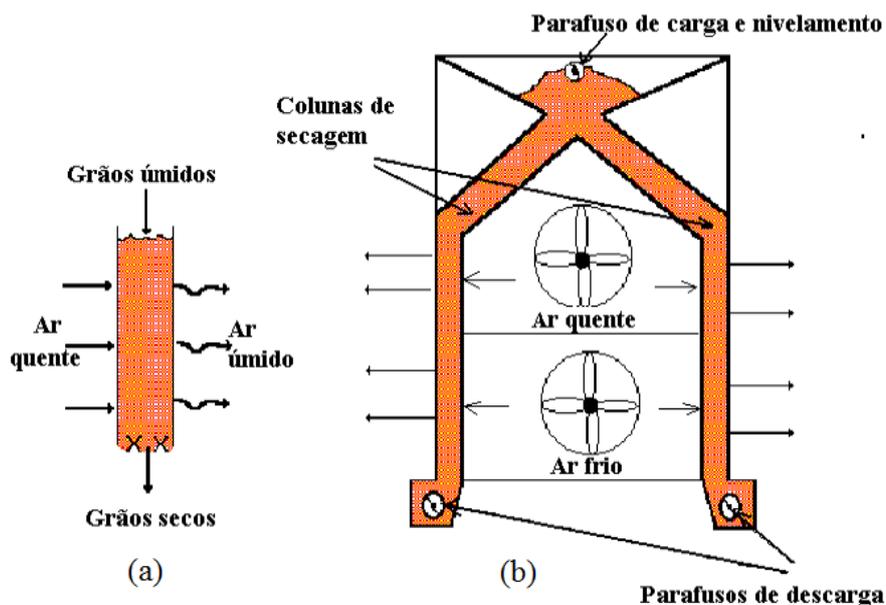


Figura 2.14 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados (a) que também opera de forma contínua (b).

Fonte: Silva *et al.* (2000).

b) Secadores de fluxo concorrente

Na secagem em fluxo concorrente, ar e grão fluem no mesmo sentido. O ar mais quente encontra o grão mais úmido, e a alta taxa de evaporação causa rápido resfriamento desse ar. Isso possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as utilizadas em secagem de fluxos cruzados. Segundo Walker e Bakker-Arkema (1978), os secadores de fluxo concorrente parecem ter as melhores condições para realizar a secagem com altas temperaturas, sem causar danos aos grãos.

Os secadores de fluxo concorrente possuem apenas um estágio, sendo que o resfriamento do produto é feito em fluxo contra-corrente. Este tipo de secador ainda não é muito utilizado no mercado nacional. De acordo com Segundo Silva *et al.* (2000), os secadores de fluxo concorrente são caracterizados pela alta eficiência energética e pela boa qualidade final do produto (Figura 2.15). As desvantagens dos secadores de fluxo concorrente são o elevado custo para a sua fabricação e o alto risco de incêndios por causa do uso das altas temperaturas.

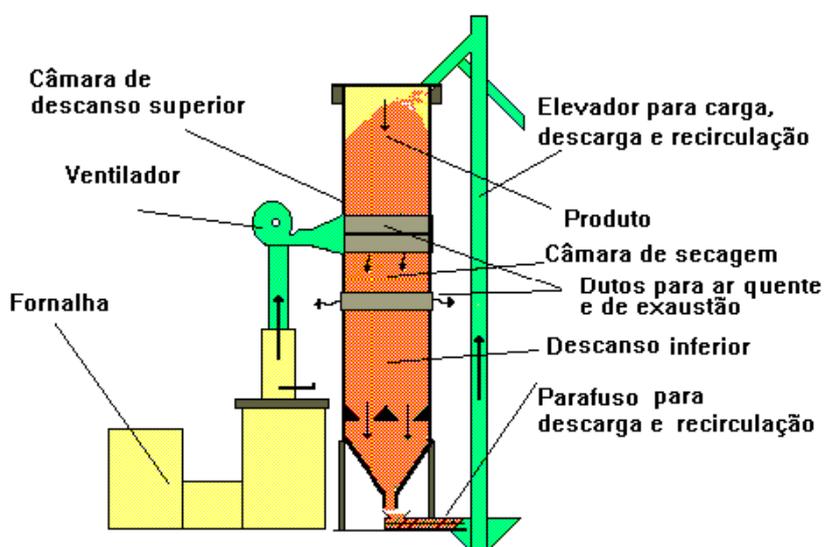


Figura 2.15 – Secador de fluxos concorrentes.

Fonte: Silva *et al.* (2000).

c) Secadores de fluxo contracorrente

Nos secadores de fluxo contracorrente o ar aquecido é forçado a passar pela massa de grãos em sentido contrário ao fluxo de grãos. Nesse tipo de secador, à medida que o produto vai descendo pela coluna de secagem sua temperatura vai sendo

aumentada gradualmente, atingindo o valor máximo no final da coluna de secagem que coincide com o ponto de entrada do ar aquecido. É conveniente neste tipo de secador trabalhar no sistema de seca-aeração, pois os grãos apresentam elevada quantidade de energia armazenada na forma de calor sensível.

Silva *et al.* (2000) relatam que os secadores de fluxo contracorrente apresentam as vantagens de alta eficiência energética, menor tempo de exposição ao ar de secagem e menores susceptibilidade a danos mecânicos. A desvantagem deste tipo de secador é o maior custo de manutenção quando em sistema com silo. A Figura 2.16 mostra um secador com sistema de fluxo contracorrente.

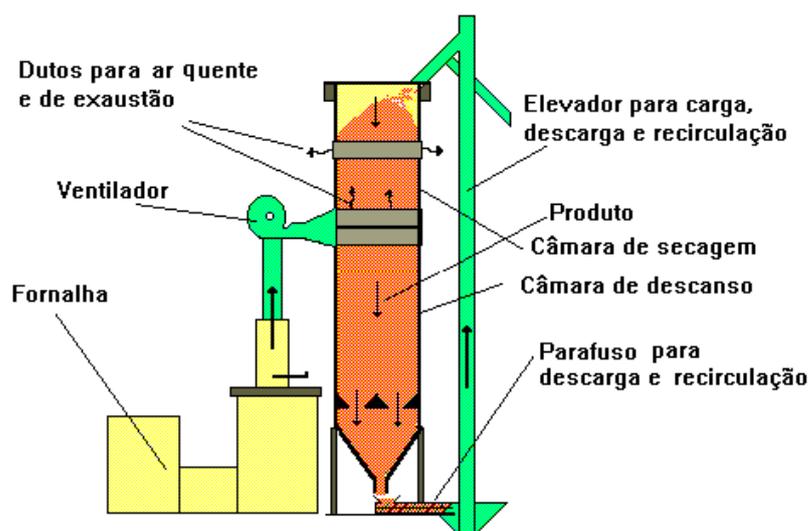


Figura 2.16 – Secador de fluxos contracorrentes.

Fonte: Silva *et al.* (2000).

d) Secadores de fluxo misto

Num secador de fluxo misto, o processo de secagem ocorre através da mistura de fluxos de ar em sentido contracorrente, concorrente e cruzado. De acordo com Bortolaia (2011), neste sistema de secagem, a intensidade do fluxo cruzado é relativamente menor em relação aos fluxos concorrentes e contracorrentes.

Os secadores de fluxo misto, também conhecido como em cascata, é formado por uma série de calhas invertidas, em forma de V, dispostas em linhas alternadas ou cruzadas dentro da estrutura do secador (Figura 2.17). Nele o produto move-se para baixo, sob a ação gravitacional e sobre as calhas invertidas. O ar de secagem entra numa linha de calhas e

sai nas outras adjacentes, superiores ou inferiores. Deste modo, o produto ora move-se no mesmo sentido do ar (concorrente), ora em sentido contrário (contracorrente), ora em sentido perpendicular (cruzado), resultando assim em uma secagem mais uniforme.

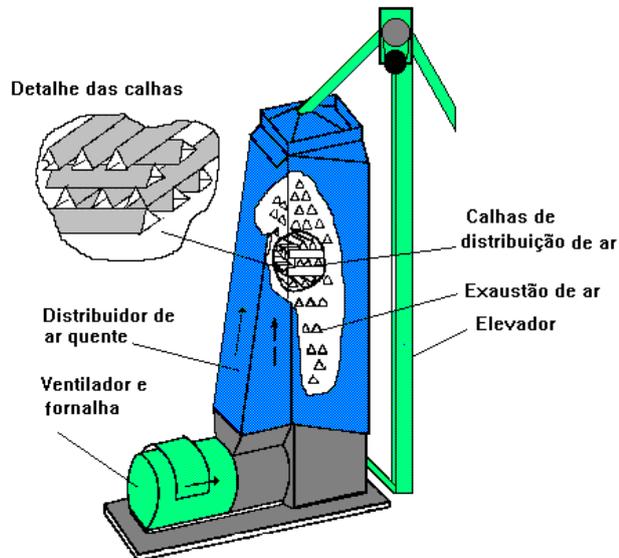


Figura 2.17 - Secador de fluxos misto ou em cascata.

Fonte: Silva *et al.* (2000).

Os secadores de fluxo misto possuem as vantagens de alta eficiência energética e elevada capacidade de produção, porém possuem as desvantagens de alto custo inicial e maior possibilidade de poluição do meio ambiente.

2.3.4.3 Secadores por convecção natural

Os secadores por convecção dispensam o uso de ventiladores, pois o ar que atravessa a massa do produto se movimenta em função do gradiente de pressão produzido pela diferença de temperatura entre ar de secagem e o ar ambiente. Eles podem ser construídos com materiais e mão-de-obra locais e são adequados para o pequeno produtor.

Os secadores por convecção utilizam trocadores de calor, que transferem o calor recebido dos gases de combustão de uma fornalha para o ar de secagem que entra lateralmente, por meio de aberturas na parte inferior das paredes do secador (Figura

2.18). Neles as condições de secagem podem ser controladas pela temperatura e umidade do ar aquecido, além de ser uma alternativa para secagem de produtos em propriedades sem eletrificação.

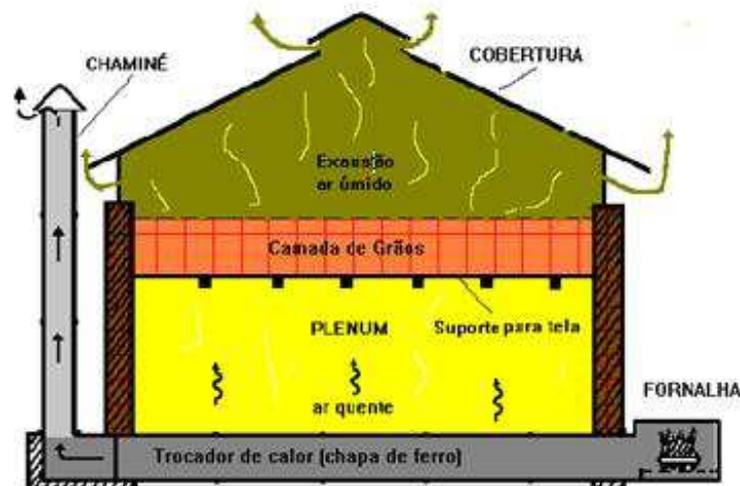


Figura 2.18 – Secador por convecção natural.

Fonte: Silva *et al.* (2000).

De acordo com Silva *et al.* (2000), os secadores por convecção natural possuem as vantagens de dispensa do uso de ventiladores, baixo custo inicial e mão-de-obra pouca especializada, porém possuem as desvantagens de baixa eficiência térmica, desuniformidade de temperatura e fluxo de ar e risco de contaminação do produto pela fumaça, caso ocorra perfurações no trocador de calor.

2.3.4.4 Secador de estufa

No processo de secagem utilizando secador tipo estufa, o produto é espalhado uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo tela (de metal ou plástico). A circulação de ar no secador é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento do ar de entrada.

No secador de estufa, a transferência de calor ocorre por meio de convecção, através da troca de calor entre um fluido, no caso o ar, e um sólido. Desta forma, o ar, aquecido por uma fonte de energia, transfere calor para a superfície sólida do produto a ser seco. Posteriormente, ocorre a transferência de calor por condução entre a superfície aquecida e o centro do material devido ao gradiente de temperatura entre as partes.

Os tipos de secadores de estufas existentes são: simples sem circulação de ar forçado, simples com circulação e renovação de ar forçado e a vácuo. A velocidade de secagem de um produto através de estufas com ventilação forçada depende das características do produto a ser secado e das propriedades termodinâmicas do escoamento de ar de secagem. De acordo com Ferreira (2004), produtos pequenos apresentam maiores velocidades de secagem do que os produtos maiores.

Segundo Dias (2013), a secagem convencional em estufa é a mais utilizada, porém a transferência de calor por convecção para a superfície do produto a ser seco e por condução para o seu interior é lenta devido à difusividade térmica dos materiais, gerando assim um grande consumo de energia. Ainda de acordo com Dias (2013), os fatores a serem observados no processo de secagem em estufa são:

- ✚ Temperatura de secagem;
- ✚ Umidade relativa e movimentação do ar dentro da estufa;
- ✚ Vácuo da estufa;
- ✚ Tamanho das partículas e espessuras da amostra;
- ✚ Número e posição das amostras na estufa;
- ✚ Formação de crosta seca na superfície da amostra.

2.4 Fluidodinâmica computacional (CFD)

2.4.1 Introdução à fluidodinâmica computacional

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e de simulações computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções numéricas para os sistemas de equações diferenciais de conservação de grandezas físicas que descrevem um dado escoamento. A origem de tais equações vem da Teoria de Fenômenos de Transporte. Assim, pode-se resumir CFD como o conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos.

O CFD é a análise de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP's) que envolvem problemas de escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, bem como outros processos, com a finalidade de obter soluções numéricas para o cálculo de

pressões, velocidade, temperatura, entre outras variáveis, através de simulações computacionais.

Atualmente a metodologia do CFD é utilizada frequentemente no projeto de aeronaves, automóveis, embarcações, turbomáquinas, sendo que sua aplicação também se estende as áreas de meteorologia, oceanografia, biologia, medicina, engenharia biomédica, entre outras (SHAW,1992).

De acordo com TU *et al.* (2008), atualmente, as indústrias de médio e grande porte estão cada vez mais buscando soluções através do uso extensivo da CFD no desenvolvimento e na otimização de seus produtos, uma vez que usando esta ferramenta pode-se prever o desempenho de um novo equipamento antes de o mesmo ser fabricado ou implementado.

Os últimos avanços tecnológicos no processamento de dados em computadores e na manipulação de imagens em três dimensões têm permitido a solução de problemas complexos em reduzida escala de tempo com robustez e precisão adequadas, tornando a atividade de projeto e simulação rápida e eficiente.

Diversas são as razões para a crescente utilização da CFD na indústria, como também no meio acadêmico, dentre os quais podemos citar:

- A necessidade de prever o desempenho de equipamentos;
- O custo e/ou a impossibilidade de se realizar experimentos;
- Os avanços na velocidade computacional e no armazenamento;
- Avanços nos algoritmos de solução.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), os códigos que fazem parte do CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos que solucionam os problemas de fluidodinâmica. De forma a fornecer fácil acesso ao seu poder de solução numérica todos os pacotes comerciais de CFD incluem uma sofisticada interface para que o usuário possa introduzir os parâmetros do problema e analisar seus resultados.

A análise através de simulação computacional e métodos aproximados (métodos numéricos) para prever o comportamento do sistema é utilizada em virtude da dificuldade ou impossibilidade de obter soluções analíticas ou realizar experimentos, que podem onerar o custo final do produto. Além disso, o desenvolvimento crescente das ferramentas computacionais e da capacidade de processamento dos computadores

têm tornado a simulação baseada em métodos numéricos uma opção segura e rápida na obtenção de problemas nas mais diversas áreas.

2.4.2 Etapas do processo em fluidodinâmica computacional

Num processo de simulação computacional (em CFD), existem basicamente três etapas distintas que devem ser seguidas durante o processo, conforme mostradas detalhadamente abaixo:

- ❖ **Pré - processamento:** Esta etapa consiste na entrada de dados que irá alimentar o programa computacional. Nele ocorre a definição da geometria ou domínio computacional do problema, a geração da malha, a seleção dos fenômenos físicos e químicos que serão modelados, a definição das propriedades do fluido, a especificação das condições de contorno apropriadas para a fronteira do domínio e os parâmetros para se obter a solução numérica.
- ❖ **Processamento:** Nesta etapa ocorre a solução numérica do problema, ou seja, as equações fundamentais de transporte (massa, quantidade de movimento, energia e equações de estado) são resolvidas numericamente obtendo-se a solução do problema.
- ❖ **Pós-processamento:** É nesta etapa que os resultados são visualizados e interpretados. Nele também podem ser realizados outros cálculos a partir dos resultados obtidos, tais como o de valores médios das variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, tensão de cisalhamento, etc), além da representação dos perfis destas variáveis através de gráficos e superfícies de contorno. Campos vetoriais e linhas de corrente também podem ser visualizados e efeitos de turbulência podem ser previstos.

Versteeg e Malalasekera (2007) relatam que com a crescente popularidade das estações de trabalho na engenharia, com capacidade de processamento gráfico superiores, os pacotes de CFD são fornecidos com ferramentas versáteis para visualização das informações. Nestes pacotes é possível a visualização de:

- ✓ Domínio da geometria e da malha;
- ✓ Desenho dos vetores;
- ✓ Trajetória da partícula;
- ✓ Desenhos em 2D e 3D;
- ✓ Manipulação visual dos resultados (rotacionar, transladar, redimensionar, etc.);
- ✓ Escala por cores dos resultados em contornos sombreados ou linhas.

2.4.3 Construção e tipos de malhas

Numa simulação usando o CFD, o processo de construção da malha é o mais importante, visto que as características da malha irão influenciar diretamente na qualidade dos resultados obtidos, bem como o tempo necessário para obtê-los. À medida que se trabalha com geometrias mais complicadas o processo de geração de uma malha computacional se torna também mais complicado.

Na construção da malha computacional, existem diferentes geometrias sobre as quais uma malha poderá ser construída, sendo ela tanto bidimensional quanto tridimensional (Figura 2.19).

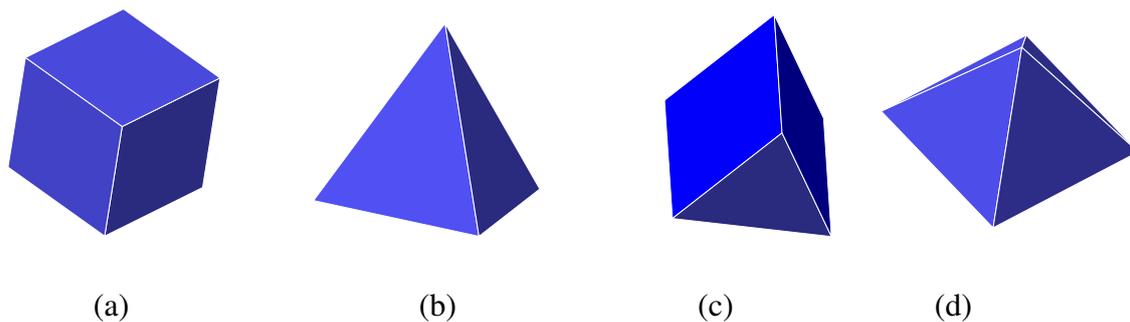


Figura 2.19 - Geometrias para construção de malhas (a) hexaédrica, (b) tetraédrica, (c) prismática e (d) piramidal.

Dependendo da forma como a malha é arranjada na geometria, pode-se ter uma malha estruturada ou não estruturada. As malhas estruturadas são organizadas através de um sistema de coordenadas globais, logo apresentam uma regularidade na distribuição espacial de seus pontos. Maliska (2004) relata que quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais, diz-se

que a malha é estruturada, uma vez que cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos.

Matematicamente, as malhas estruturadas geram matrizes de coeficiente diagonais, quando são geradas segundo uma lei de formação. Não havendo essa lei de formação, a matriz de coeficiente que representa a malha não será do tipo diagonal, sendo a malha geometricamente estruturada ou não. De acordo com Maliska (2004), as malhas estruturadas possuem as vantagens de permitir fácil ordenação e, como consequência, obter matrizes diagonais que permitem *solvers* mais fáceis de ser resolvidos e mais eficientes.

Já as malhas não estruturadas são caracterizadas pela ausência de regularidade na distribuição espacial dos pontos, o que as tornam mais adaptáveis a qualquer tipo de geometria. Elas têm a característica de se adaptarem aos limites do domínio, permitindo uma construção quase perfeita do mesmo.

Segundo Maliska (2004), as malhas não estruturadas são mais versáteis, com mais facilidade para adaptatividade e extremamente mais aptas a discretizar geometrias irregulares com cantos e saliências. Além disso, em muitos problemas, apenas as malhas não estruturadas conseguem discretizar adequadamente o domínio. Sendo assim, a grande vantagem do uso da malha não estruturada é que, em geometrias complexas, consegue-se gerar uma malha com relativa facilidade.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Material e métodos experimentais

3.1.1 Material

A matéria-prima investigada neste trabalho é a mamona (*Ricinus communis* L.) da cultivar BRS Energia, cultivada pela Embrapa algodão (Campina Grande/PB) na fazenda da EMEPA-PB, no município de Lagoa Seca - PB. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram uma visão da lavoura de mamona da cultivar BRS Energia plantada em Lagoa Seca-PB, desde o plantio, passando pelo início da floração, até chegar ao estágio de maturação e colheita dos frutos de mamona, no período de maio de 2013 a janeiro de 2014.



Figura 3.1- (a) Plantio da lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (maio 2013) e (b) lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (agosto 2013).



(a)

(b)

Figura 3.2 - (a) Lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (setembro 2013) e (b) lavoura de mamona da cultivar BRS Energia (dezembro de 2013).

A cultura foi monitorada durante seu ciclo para que fossem obtidos produtos com a máxima qualidade, a fim de evitar influência de agentes externos sobre os resultados. Os frutos foram colhidos manualmente com o auxílio de uma tesoura de poda e armazenados em uma caixa térmica de isopor de 21 litros (Figura 3.3).



(a)

(b)

Figura 3.3 – (a) Colheita das amostras de mamona da cultivar BRS Energia e (b) armazenamento das amostras de mamona da cultivar BRS Energia.

Após serem armazenadas na caixa de isopor, as mamonas foram imediatamente transportadas até a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para serem feitas as análises posteriores. Ao chegar a UFCG, os frutos de mamona foram retirados dos cachos e limpos para que fosse realizado o processo de secagem, apresentando um teor

de água que variou de 11,23% a 28,71% (b.u.) para todos os experimentos. Na Figura 3.4, é apresentada uma amostra dos frutos de mamona selecionados para os experimentos.



Figura 3.4 - Frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

Os equipamentos listados a seguir foram utilizados para a determinação dos parâmetros de secagem:

a) Paquímetro digital da marca Méssen, com precisão de 0,01 mm. Usado para coletar as medidas geométricas dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia;

b) Balança eletrônica digital Marte, modelo AL 500 e precisão 0,001 g. Usada para realizar as pesagens das amostras de mamona da cultivar BRS Energia durante o processo de secagem;

c) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM modelo 320E, com controlador digital de temperatura. Usada para realizar a secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia;

d) Termômetro infravermelho (Pirômetro) com mira laser e escala de -50 à 1000°C, modelo TI-890. Usado para obter as medidas de temperatura superficial dos frutos de mamona durante o processo de secagem;

e) Termohigrômetro de fabricação da ICEL Manaus, modelo HT - 208. Usado para obter a temperatura ambiente e umidade relativa ambiente durante as secagens dos frutos de mamona;

f) Termo anemômetro digital portátil de palhetas Kimo, modelo AMI 300. Usado para obter a velocidade do ar dentro da estufa de secagem;

3.1.2 Procedimentos experimentais

3.1.2.1 Secagem

Todos os experimentos de secagem foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande - PB, no período de Novembro de 2013 a janeiro de 2014.

A secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia em camada fina, foi realizada utilizando-se o método da secagem convectiva, um dos mais utilizados na agroindústria, por meio de uma estufa com circulação de ar e controlador digital de temperatura.

Inicialmente foram medidas as dimensões (comprimento, largura e espessura), massa, temperatura da superfície dos frutos de mamona, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Em seguida, as amostras foram levadas ao interior da estufa onde se realizava a secagem. Nesse processo, a temperatura interna da estufa era fixada na temperatura desejada (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C) através do controlador de temperatura.

Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura, massa dos frutos de mamona, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Em princípio foram feitas 6 medições de 5 em 5 minutos, depois foram realizadas 6 medições de 10 em 10 minutos. Em seguida, as medições passaram a ser de 30 em 30 minutos até que se atingisse o nível de umidade próximo da umidade de equilíbrio, onde se encerrava as medições. Logo após esse procedimento, mantinham-se as amostras no interior da estufa nas mesmas condições de secagem por um período de 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio. Na sequência, alterava-se a temperatura no interior da estufa para 105°C e mantiveram-se as amostras no interior da mesma por mais um período de 24 horas para a obtenção da massa do produto seco.

As amostras foram dispostas no interior da estufa da seguinte forma: uma amostra de frutos de mamona foi colocada em uma bandeja de tela de arame fino com tampa e 3 amostras em bandejas de tela de arame fino sem tampa, sendo duas pequenas e uma grande. As duas bandejas pequenas continham 30 frutos de mamona e a bandeja grande continha em média 500 gramas de frutos de mamona. No final de cada período de

secagem (5, 10 e 30 minutos) eram feitas as medições de massa e temperatura da superfície dos frutos de mamona, bem como a temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Ao término de cada etapa de secagem, além de se fazer as medições anteriores para a amostra da bandeja com tampa, eram realizadas as medições das dimensões (comprimento, largura e espessura) dos 30 frutos de mamona colocados no início do processo nas outras duas bandejas de tela de arame fino sem tampa. Além disso, pesava-se a amostra da quarta bandeja grande de tela de arame fino sem tampa.

No final de cada processo de secagem, retirava-se as sementes contidas nos frutos de mamona, que foram colocados nas duas bandejas pequenas de tela, para se obter o teor de água final das mesmas. Em seguida, foram encaminhadas amostras secas de frutos e sementes de mamona, contidas na bandeja grande de tela, para o Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba, situado em João Pessoa-PB, para posteriores análises físico-químicas.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram as bandejas utilizadas nas secagens dos frutos de mamona para as temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C.



Figura 3.5 - Bandeja de tela de arame com tampa utilizada nos experimentos.

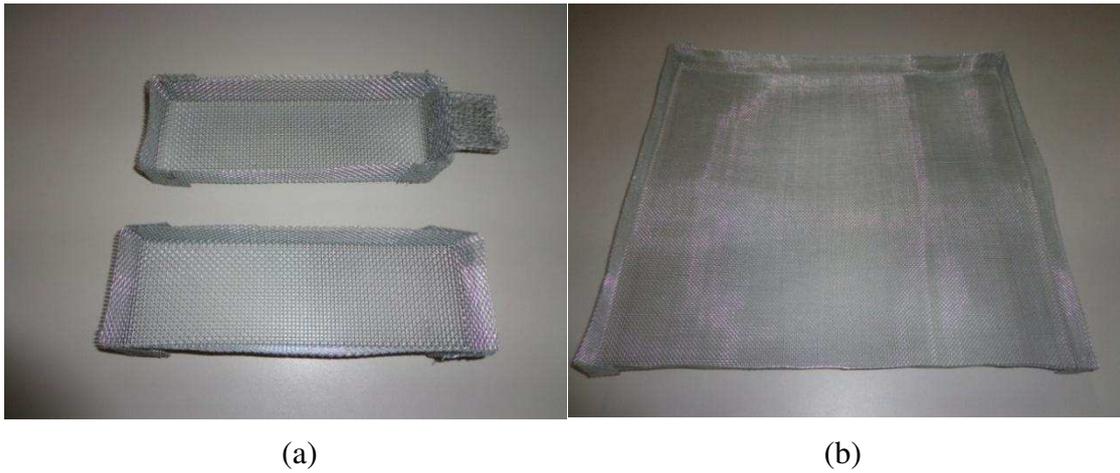


Figura 3.6 - (a) Bandejas de tela de arame sem tampa utilizadas nos experimentos e (b) bandeja grande de tela de arame utilizada nos experimentos.

As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram amostras de frutos de mamona da cultivar BRS Energia utilizadas e as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento (a), da largura (b) e da espessura (c), respectivamente.



Figura 3.7 - Amostras de frutos de mamona da cultivar BRS Energia utilizadas nos experimentos.

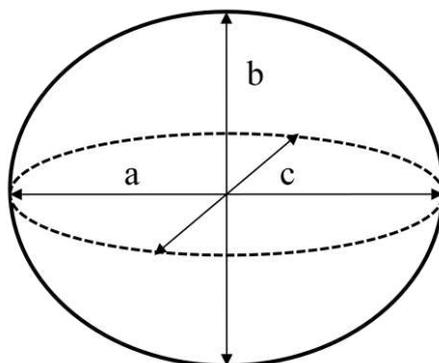


Figura 3.8 - Desenho esquemático do fruto de mamona, considerando-o como um esferóide triaxial, com suas dimensões características.

em que:

a: comprimento ou maior eixo, mm;

b: largura ou eixo médio, mm; e

c: espessura ou eixo menor, mm.

As medidas das dimensões características, eixos ortogonais (Figura 3.8), foram obtidas com o auxílio de um paquímetro digital com precisão 0,01 mm. Na obtenção dessas medidas, desconsideraram-se os espinhos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

A Figura 3.9 mostra uma visão frontal interna do produto (mamona) dentro da estufa de secagem.



Figura 3.9 - Vista interna da estufa de secagem com amostras de frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

3.1.2.2 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas dos frutos de mamona *inata* e dos frutos e sementes secos de mamona da cultivar BRS Energia, tais como: teor de umidade, minerais, proteínas, lipídios, acidez total, pH, cálcio, carboidratos e energia foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

As análises dos frutos e sementes secos de mamona foram realizadas após o processo de secagem, nas temperaturas de ar de 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100°C. A metodologia empregada pelo Laboratório de Tecnologia de Alimentos nas análises físico-químicas dos frutos de mamona *inatura* e dos frutos e sementes secos de mamona foram os métodos físico-químicos através do IAL (2008).

3.1.2.3 Parâmetros termofísicos

Para obtenção dos parâmetros termofísicos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, tais como condutividade térmica (k), calor específico (c_p) e difusividade térmica (α), utilizou-se de um analisador de propriedades térmicas KD2, conforme mostra a Figura 3.10. Esses parâmetros foram obtidos no Laboratório de Medidas Físicas da Unidade Acadêmica de Engenharia de alimentos, da Universidade Federal de Campina Grande-PB.



Figura 3.10 - Analisador de propriedades térmicas KD2 (Decagon).

Fonte: aqualab.decagon.com.br

O analisador de propriedades térmicas KD2 utiliza o método de fonte de calor linear transiente para medir a condutividade térmica, resistividade, difusividade e calor específico. Segundo o fabricante do KD2, o aparelho possui as seguintes características em relação à exatidão nas análises das propriedades térmicas:

- a) ± 5 a $\pm 10\%$ para condutividade / resistividade térmicas;
- b) $\pm 10\%$ para calor específico;
- c) $\pm 10\%$ para difusividade térmica.

3.2 Metodologia matemática

3.2.1 Analítica

3.2.1.1 Parâmetros técnicos

Após o processo de secagem de todas as amostras dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, a partir das dimensões e massa dos frutos de mamona, foram feitos cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são importantes para a obtenção dos resultados e discussão do presente trabalho.

❖ Massa de água

O cálculo da quantidade de água em cada amostra de frutos de mamona (m_{H_2O}), em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa inicial dos frutos de mamona (m_o) e na massa dos frutos de mamona seco (m_s), da seguinte forma:

$$m_{H_2O} = m_o - m_s \quad (3.1)$$

❖ Teor de umidade em base úmida

O cálculo do teor de umidade em base úmida de cada amostra ($M_{(b.u.)}$), em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água dos frutos de mamona (m_{H_2O}) e na massa dos frutos de mamona úmida ($m = m_{H_2O} + m_s$), da seguinte forma:

$$M_{(b.u.)} = m_{H_2O} / (m_{H_2O} + m_s) \quad (3.2)$$

❖ Teor de umidade em base seca

O cálculo do teor de umidade em base seca de cada amostra ($M_{(b.s.)}$), em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água dos frutos de mamona (m_{H_2O}) e na massa dos frutos de mamona seca (m_s), da seguinte forma:

$$M_{(b.s.)} = m_{H_2O}/m_s \quad (3.3)$$

❖ Teor de umidade adimensional

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada amostra (\bar{M}^*), em cada tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_o) e do teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}) em base seca, da seguinte forma:

$$\bar{M}^* = (M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq}) \quad (3.4)$$

❖ Temperatura adimensional

O cálculo da temperatura adimensional de cada amostra (θ^*), em cada tempo de medição, foi feito com base na temperatura da superfície dos frutos de mamona (θ), da temperatura inicial (θ_o) e da temperatura de equilíbrio (θ_{eq}), da seguinte forma:

$$\theta^* = (\theta - \theta_{eq}) / (\theta_o - \theta_{eq}) \quad (3.5)$$

3.2.1.2 Parâmetros geométricos

Para a forma e o tamanho dos frutos de mamona, considerando-os como esferóides tri-axiais, foram analisados a esfericidade, circularidade, volume, área projetada e área superficial, a partir das medidas das dimensões características, eixos ortogonais, em trinta repetições, obtidas por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. As dimensões características foram determinadas conforme descrito no item 3.1.2.1.

❖ Esfericidade

A esfericidade (E_s) dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, em porcentagem (%), foi calculada utilizando-se a expressão seguinte, proposta por Mohsenin (1986):

$$E_s = \left[\frac{(abc)^{1/3}}{a} \right] \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde: a, b, c são as dimensões característica do fruto de mamona (Figura 3.18).

❖ Circularidade

A circularidade (C_i) dos frutos e grãos de mamona, em porcentagem (%), foi determinada pela seguinte expressão (MOHSEININ, 1986):

$$C_i = \left(\frac{b}{a} \right) \cdot 100 \quad (3.7)$$

❖ Volume

O volume (V) dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, no início e no final do processo de secagem, foi determinado como proposto por Mohsenin (1986), a partir de suas dimensões características, de acordo com a seguinte expressão:

$$V = \frac{\pi (abc)}{6} \quad (3.8)$$

❖ Área projetada

A área projetada (A_p), em mm^2 , dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia foi determinada pela seguinte expressão:

$$A_p = \frac{\pi ab}{4} \quad (3.9)$$

❖ Área superficial

A área superficial (A_s), em mm^2 , dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, foi calculada pela semelhança a uma esfera de mesmo diâmetro geométrico médio (D_g), usando a seguinte expressão (TUNDE-AKINTUNDE e AKINTUNDE, 2004):

$$A_s = \pi D_g \quad (3.10)$$

onde D_g é o diâmetro geométrico médio dos frutos de mamona, determinado pela seguinte expressão (MOHSENIN, 1986):

$$D_g = (abc)^{1/3} \quad (3.11)$$

❖ Índice de contração volumétrica

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

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (3.12)$$

em que:

ψ : índice de contração volumétrica, decimal;

V : volume em cada teor de água, m^3 ; e

V_0 : volume inicial, m^3 .

Para o acompanhamento da redução da massa dos frutos de mamona, foram realizadas medições das dimensões (comprimento, largura e espessura) de 30 frutos de mamona no início e no fim do processo de secagem, por meio de um paquímetro digital da marca Méssen, com precisão de 0,01 mm.

Para essas medições, desconsideraram-se os espinhos que são característicos desta variedade analisada. O índice de contração volumétrica unitária dos frutos de mamona foi determinado de acordo com a Equação 3.12. Para a determinação do volume dos frutos de mamona, foi utilizada a Equação 3.8, de acordo com a Figura 3.8.

A Tabela 3.1 apresenta para cada experimento os dados dos frutos de mamona e do ar de secagem utilizado na estufa, além do tempo final de cada secagem.

Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar de secagem, dos frutos de mamona e tempo final para cada experimento de secagem realizado.

Ar			Frutos de mamona									t (min)
T (°C)	UR (%)	v (m/s)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	M _o (b.s.)	M _f (b.s.)	M _{eq} (b.s.)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	θ _{eq} (°C)	
40	28,03	0,040	17,80	17,17	16,02	0,162	0,037	0,033	27,5	38,6	40	1.500
50	16,34	0,050	16,97	16,05	15,02	0,309	0,033	0,031	27,5	44,8	50	1.230
60	10,62	0,060	23,52	22,60	21,75	0,403	0,024	0,023	26,8	51,8	60	1.140
70	6,24	0,070	19,75	18,62	17,90	0,126	0,022	0,021	27,5	60,7	70	960
80	4,69	0,080	17,41	16,01	15,02	0,279	0,011	0,009	27,7	72,9	80	900
90	2,67	0,090	18,69	17,67	16,78	0,233	0,0077	0,006	27,8	78,3	90	840
100	2,06	0,100	17,59	16,98	15,97	0,131	0,0027	0,0005	28,4	89,5	100	900

Durante a secagem dos frutos de mamona foram monitoradas a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar ambiente, por meio de um termohigrômetro digital, conforme mostram os dados da tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Condições médias de temperatura ambiente e umidade relativa do ar ambiente durante os experimentos de secagem dos frutos de mamona.

Número de experimentos	Temperatura do ar de secagem (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar ambiente (%)
1	40	26,4 ± 0,33	60,1 ± 3,21
2	50	26,2 ± 0,27	59,1 ± 2,88
3	60	26,2 ± 0,23	62,2 ± 2,15
4	70	26,5 ± 0,23	56,3 ± 4,21
5	80	26,9 ± 0,09	62,4 ± 2,20
6	90	26,5 ± 0,28	54,1 ± 3,66
7	100	27,1 ± 0,24	58,2 ± 2,52

3.2.1.3 Tratamento estatístico dos dados experimentais (Modelo empírico)

Os dados experimentais da secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, para as temperaturas de ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, foram ajustados ao modelo matemático de Page, utilizado frequentemente para a representação da secagem de produtos agrícolas, de acordo com a Equação (3.13):

$$\bar{M}^* = \exp(-k_1 \cdot t^n) \quad (3.13)$$

em que:

t = tempo de secagem (min);

k₁ = constante de secagem;

n = coeficiente do modelo.

O modelo matemático de Page foi ajustado por meio de análise de regressão não linear simples, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 7.0. Para se estimar os parâmetros dos modelos de regressão linear simples e não linear, utilizar-se o método dos mínimos quadrados, que consiste em adotar estimativas aos parâmetros, de tal forma, que esses valores minimizem a soma dos quadrados dos desvios (erros).

Para se conhecer a qualidade de ajuste do modelo, foram obtidos os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (R²) e o desvio padrão da estimativa (SE).

O coeficiente de correlação de Pearson (r), que mede o grau de correlação entre duas variáveis, foi obtido por meio da seguinte expressão matemática:

$$r_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)}} \quad (3.14)$$

em que:

x_i : i-ésimo valor observado da variável independente x ;
 \bar{x} : valor médio da série x_i ;
 y_i : i-ésimo valor observado da variável dependente y ;
 \bar{y} : valor médio da série y_i ;
 n : número de elementos de cada série x_i e y_i .

Já o coeficiente de determinação (R^2), que indica percentualmente o quanto um modelo consegue explicar os valores observados, foi obtido utilizando a seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.15)$$

O desvio padrão da estimativa (SE) foi calculado a partir da seguinte expressão:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (3.16)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n : número de observações experimentais;

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

3.2.2 Numérica

Para se resolver um problema usando um pacote computacional (CFD), certas etapas devem ser cumpridas: A primeira etapa é a obtenção de um modelo geométrico que seja compatível com o fenômeno físico real a ser simulado. Após a elaboração da

geometria do problema, deve-se realizar a geração da malha, a partir da geometria elaborada.

A segunda etapa, é justamente para se fazer a seleção dos fenômenos físicos ou físico-químicos que deverão ser modelados, a definição das propriedades do fluido, bem como a especificação das condições inicial e de contorno e os parâmetros para se obter a solução numérica do problema. Em seguida, deve-se realizar a solução numérica do problema por meio da resolução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

Por fim, realiza-se a análise, visualização e apresentação dos resultados obtidos nas simulações. Esta etapa inclui desde a obtenção de um valor pontual de um parâmetro até complexas sequências animadas.

3.2.2.1 Geração da geometria e malha do problema

Para a geração da geometria (Figura 3.11), utilizada para se fazer a malha do fruto de mamona da variedade BRS Energia, utilizou-se o software Inventor Autodesk® (2012), a partir das dimensões médias de 30 frutos de mamona. As medidas das dimensões dos frutos de mamona foram obtidas utilizando um paquímetro digital da marca Méssen com resolução de 0,01 mm. As dimensões médias utilizadas na geração da geometria do problema foram: $a = 19,75$ mm, $b = 18,62$ mm e $c = 17,90$ mm, respectivamente para o eixo maior, eixo médio e eixo menor (Figura 3.8).

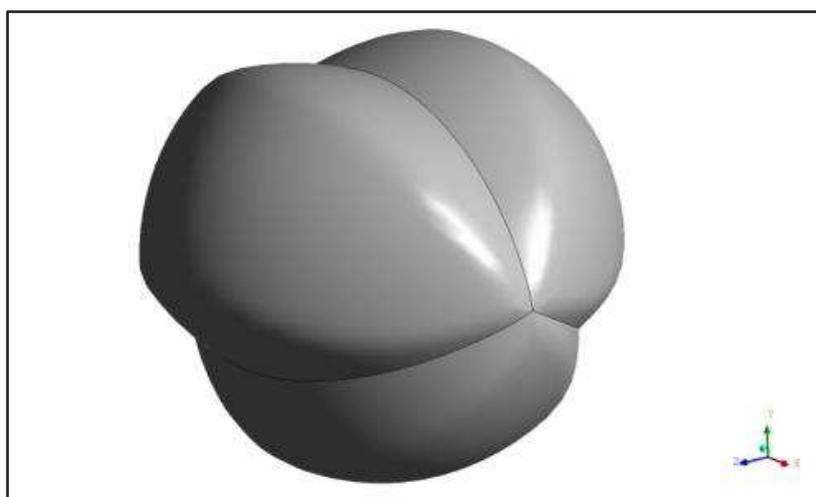


Figura 3.11- Geometria do problema.

A malha numérica (Figura 3.12) foi criada no módulo ANSYS ICEM CFD® *release* 12.1, a partir da geometria elaborada no software Inventor Autodesk®. A malha gerada no software ICEM CFD, a partir da geometria do fruto de mamona, têm 33.826 elementos e 33.800 nós. A Figura 3.13 mostra os detalhes da malha do fruto de mamona BRS Energia usada na simulação numérica.

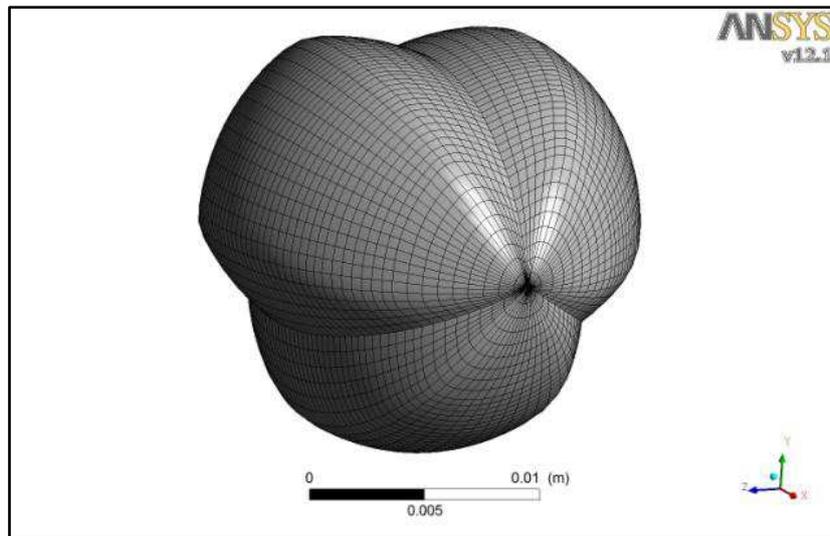


Figura 3.12 - Malha do fruto de mamona usado na simulação.

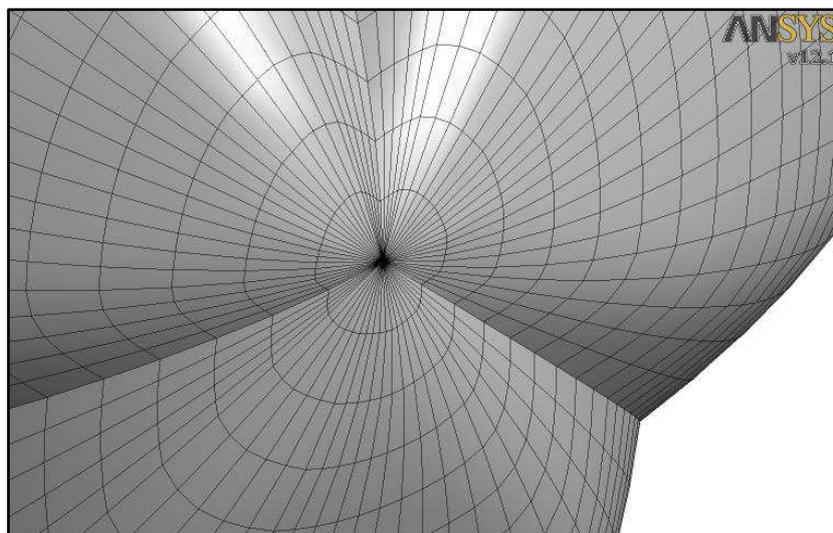


Figura 3.13 - Detalhes da malha do fruto de mamona usado na simulação.

Após a geração da malha, realizou-se um teste de análise de qualidade de malha, com dados de teor de umidade para a temperatura de ar de secagem de 60°C, para uma malha com 38.826 elementos, e outra, com 82.656 elementos. Em seguida, foi realizado um teste de refinamento do passo de tempo (Δt) para a malha com 38.826 elementos.

Após a elaboração e escolha da malha numérica, criou-se um arquivo com todas as informações da malha geométrica, na qual posteriormente foi anexado ao ANSYS CFX[®] *realese* 12.1 para a inclusão dos dados de entrada do processo, tais como: modelo matemático (que corresponde a um conjunto de dados embutidos no próprio pacote computacional aplicativo), fluido (no caso a temperatura do ar de secagem), condições de contorno, dados iniciais como, por exemplo, umidade inicial e final do fruto de mamona, etc.

3.2.2.2 Modelo matemático de difusão

No presente trabalho, adotou-se o modelo de difusão transiente para análise de transferência de massa e transferência de calor no interior do fruto de mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia") durante o processo de secagem, para diferentes temperaturas de ar de secagem (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C).

A solução da equação geral de difusão transiente para transferência de massa e para transferência de calor possibilitou a obtenção da distribuição de umidade e temperatura no interior do fruto de mamona, respectivamente.

Na modelagem matemática, o fruto da mamona (*Ricinus communis* L., variedade "BRS Energia") (Figura 3.14) foi considerado como um esferóide triaxial, com dimensões característica conforme ilustra a Figura 3.8. Por causa da forma complexa do fruto, uma solução numérica para o processo foi admitido como mais apropriada, devido à complexidade para a obtenção da solução analítica das equações governantes que descrevem o fenômeno físico.



Figura 3.14 - Frutos de mamona.

Para o modelo matemático da transferência de calor e massa que ocorre no fruto de mamona da variedade BRS Energia foram adotadas as seguintes considerações para solução do problema físico:

- a) O fruto de mamona é considerado homogêneo e com propriedades termo-físicas constantes durante o processo;
- b) A variação volumétrica do fruto de mamona durante o processo de secagem foi desconsiderada;
- c) Os coeficientes de difusão de massa e calor são constantes para uma dada temperatura e independe do teor de umidade;
- d) O mecanismo de transporte de umidade no interior do fruto de mamona é apenas por difusão líquida;
- e) Os campos de temperatura e teor de umidade são uniformes no início da secagem;
- f) A solução das equações de transferência de calor e massa não são acopladas.

O modelo matemático consiste da equação de difusão em três dimensões. A equação geral de difusão utilizada pelo software ANSYS CFX[®] aplicada para um potencial genérico Φ é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) \quad (3.17)$$

onde Φ é o potencial de interesse, λ e Γ^Φ são propriedades de transporte, e t é o tempo.

Para um modelo matemático bem apresentado, foram utilizadas as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \Phi_e, \text{ para a superfície do sólido, } t \geq 0. \\ \Phi = \Phi_i, \text{ para o interior do sólido, } t = 0. \end{array} \right.$$

Para descrever a difusão de massa no interior do fruto de mamona, utilizou-se a Equação 3.17, assumindo que $\Phi = M$ e $\Gamma^\Phi / \lambda = D$, onde D é o coeficiente de difusão de massa e M é o teor de umidade dos frutos de mamona, em base seca (b.s.). A equação da difusão de massa no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fick) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (3.18)$$

A transferência de calor no interior do fruto de mamona é também dada pela Equação 3.17, substituindo $\Phi = \theta$ e $\Gamma^\Phi / \lambda = \alpha = k / \rho c_p$, isto é, $\lambda = \rho c_p$ e $\Gamma^\Phi = k$, onde α é a difusividade térmica, k é a condutividade térmica, ρ é a densidade, θ é a temperatura e c_p é o calor específico do material à pressão constante. Assim sendo, a equação da difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fourier) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial (\rho c_p \theta)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla \theta) \quad (3.19)$$

Considerando ρ e c_p constantes, a Equação (3.19) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla \theta) \quad (3.20)$$

A difusividade térmica indica como o calor se difunde através de um material. Essa propriedade permite prever a velocidade de penetração de calor no interior do material, sendo de fundamental importância para o cálculo do processamento térmico.

3.2.2.3 Estimativa do coeficiente de difusão de massa

O valor da difusividade de massa inicialmente utilizada na Equação (3.18), para as simulações no software ANSYS CFX[®], foi obtido ajustando a solução analítica da equação de transporte de massa baseado na lei de Fick, considerando 200 termos da série, aos dados de secagem dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, considerado como uma esfera. Para obtenção desse valor inicial da difusividade de massa, utilizou-se o software Prescribed considerando a geometria do fruto de mamona como sendo uma esfera.

A solução analítica da equação de difusão de massa baseada na 2ª lei de Fick, com coeficiente de difusão constante, para geometria esférica, é descrita por Crank (1992), conforme mostra a equação abaixo:

$$\frac{\bar{M}-M_e}{M_0-M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2\pi^2 Dt}{\tilde{R}^2}\right) \quad (3.21)$$

onde \bar{M} é o teor de umidade médio e \tilde{R} é o raio da esfera equivalente do fruto de mamona.

O raio equivalente (\tilde{R}) foi determinado por comparação do volume real do fruto de mamona (V) com o volume da esfera equivalente do fruto de mamona como segue:

$$\tilde{R} = \left(\frac{3}{4\pi} V\right)^{1/3} \quad (3.22)$$

O valor da difusividade de massa real, para cada temperatura de ar de secagem (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C), foi obtido pelo método de tentativa e erro minimizando o erro dos quadrados mínimos entre dados experimentais e numéricos do teor de umidade médio utilizando ANSYS CFX[®].

3.2.2.4 Condições utilizadas na solução numérica

Na Tabela 3.3 são apresentadas as condições gerais do problema e da solução numérica utilizadas no software ANSYS CFX[®], para a realização das simulações.

Tabela 3.3 - Condições gerais do problema e da solução numérica no software ANSYS CFX[®].

Condições de contorno	Prescrita
Processo difusivo	Transiente
Método numérico	Volume Finitos baseados em elementos finitos
Condições do modelo	Ambientes (a 25°C e 1 atm)
Esquema de advecção	High resolution
Critério de convergência	Resíduo médio quadrático (RMS) normalizado igual a 10^{-8}
Esquema transiente	Second Order Backward Euler
Passo de tempo (Δt)	10 s
Tempo total de processo (t)	25 h

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho de pesquisa, buscar-se-á inicialmente apresentar as propriedades termofísicas dos frutos de mamona e analisar os parâmetros físico-químicos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia in natura, bem como os parâmetros físico-químicos dos frutos e sementes de mamona após o processo de secagem. Posteriormente, ajustar-se-á os dados experimentais das cinéticas de secagem dos frutos de mamona ao modelo matemático empírico de Page, além de se comparar as cinéticas de secagem experimentais com as cinéticas de secagem estimadas. Em seguida, ilustrar-se-á as cinéticas de secagem simuladas dos frutos de mamona, além de se comparar as cinéticas de secagem simuladas usando o modelo matemático da difusão líquida com as cinéticas de secagem experimentais. Por fim, ilustrar-se-á as distribuições de teor umidade e de temperatura no interior dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, em diferentes planos yz. Todos os resultados foram obtidos nas temperaturas de ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C.

4.1 Experimentais

4.1.1 Propriedades termofísicas dos frutos de mamona in natura da cultivar BRS Energia

Após serem realizadas diversas medidas experimentais utilizando o analisador de propriedades térmicas KD2, foram obtidos os seguintes valores médios para condutividade térmica (k), calor específico (c_p) e difusividade térmica (α) para frutos de mamona da cultivar BRS Energia, que foram usados nas simulações numéricas utilizando o software ANSYS CFX[®] (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Valores médios dos parâmetros termofísicos dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia obtidos experimentalmente.

Parâmetros térmicos	Valores médios dos parâmetros
Condutividade térmica	$k = 0,5267 \text{ W/(m. K)}$
Calor específico	$c_p = 3,64775 \text{ kJ/(kg.K)}$
Difusividade térmica	$\alpha = 8,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

A partir do volume e da massa dos frutos de mamona in natura da cultivar BRS Energia, obtidos experimentalmente utilizando o método do deslocamento de massa por pesagens, obteve-se o valor médio da densidade ou massa específica dos frutos de mamona, que foi igual a $\rho = 800,00 \text{ kg/m}^3$. Este resultado também foi usado nas simulações numéricas utilizando o software ANSYS CFX[®].

Souza (2013), utilizando o método das misturas obteve o valor médio do calor específico para torta de mamona in natura igual a $0,55 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$. Já Costa (2006) obteve os valores médios do calor específico do óleo de mamona das cultivares BRS-149 Nordestina e BRS-188 Paraguaçu, variando de $0,1214$ a $0,2647 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e de $0,1262$ a $0,24631 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ respectivamente, para a faixa de temperatura de -196 a -5°C .

Goneli (2008) obtiveram valores experimentais da massa específica aparente e unitária para os grãos de mamona da variedade Guarani variando de 478 a 401 kg/m^3 e de 902 a 682 kg/m^3 , respectivamente, para o teor de água do produto variando de $0,51$ a $0,09$ (decimal b.s.). Já Siqueira *et al.* (2012) encontraram valores de massa específica aparente para os frutos de pinhão-manso durante a secagem, para quatro condições de ar, que variaram entre $425,3$ e $272,9$; $454,2$ e $277,1$; $445,8$ e $247,0$; $460,9$ e $256,7 \text{ kg m}^{-3}$, para as temperaturas de 45 , 60 , 75 e 90°C , respectivamente.

Araújo *et al.* (2014) obtiveram valores de massa específica aparente para grãos de amendoim variando de 598 a 544 kg/m^3 , para uma faixa de teor de água de $0,56$ a $0,04$ (decimal b.s.), respectivamente. Os mesmo autores observaram que a massa específica unitária dos grãos de amendoim apresenta variações em seus valores na ordem de 966 a 885 kg/m^3 , para a faixa de teor de água de $0,56$ a $0,04$ (decimal b.s.), respectivamente. Silva *et al.* (2014b) obtiveram valores médios para a massa específica aparente para grãos de amendoim variando de $542,37$ a $754,37 \text{ kg/m}^3$, para a faixa de teor de água de $4,7$ a $10,3\%$ (b.u.).

4.1.2 Caracterização da mamona da cultivar BRS Energia

A caracterização dos frutos de mamona in natura e dos frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem, nas temperaturas de ar de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, foram realizadas utilizando os Métodos Físico-químicos para Análise de Alimentos do Instituto Adolfo Lutz, conforme constam laudos das referidas análises realizadas no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) (Anexos). A caracterização e composição química dos frutos de mamona in natura e dos frutos e sementes de mamona foi constituída pelas análises de umidade, minerais, proteínas, lipídios, acidez total, pH, sódio, cálcio, carboidratos e energia.

4.1.2.1 Caracterização físico-química dos frutos de mamona “in natura”

A Tabela 4.2 apresenta os resultados médios da caracterização físico-química dos frutos de mamona in natura da cultivar BRS Energia com os respectivos desvios padrões. A umidade média encontrada nos frutos de mamona in natura foi 15,45% (b.u.).

Tabela 4.2 - Caracterização físico-química dos frutos de mamona “in natura” da cultivar BRS Energia.

Parâmetro	Média ± desvio padrão
Umidade (%)	15,45 ± 0,07
Minerais (%)	4,17 ± 0,20
Proteína (%)	12,93 ± 0,04
Lipídios (%)	30,28 ± 0,27
Acidez total (%)	4,99 ± 0,02
pH	6,51 ± 0,00
Sódio (mg/100g)	396,79 ± 7,41
Cálcio (mg/100g)	363,00 ± 3,27
Carboidratos (%)	37,16 ± 0,20
Energia (kcal/100g)	472,96 ± 2,32

Por falta de dados na literatura em relação à caracterização físico-química de frutos de mamona in natura da cultivar BRS Energia, comparações com outras variedades de mamona foram realizadas a seguir.

Silva (2012b), desenvolvendo um sistema de secagem solar para oleaginosa, obteve os seguintes valores médios para a caracterização físico-química da mamona in natura, tipo nativa, para umidade (80,91%), minerais totais (0,99%), proteína totais (2,72%), gorduras totais (4,31%), carboidratos (11,07%), energia (93,98 Kcal/100g), pH (6,21), acidez total titulável (0,21%), sódio (39,49mg/100g) e cálcio (145,77 mg/100g).

Melo *et al.* (2006), analisando a composição físico-química de sementes de genótipos de mamonas BRS-149 Nordestina , CSRD-2 e CSRN-142 obtiveram teores de umidades variando de 4,02 a 3,66%, teores de lipídios variando de 42,92 a 50,92%, teores de proteínas entre 22,80 e 26,24% e teores de carboidratos variando de 18,52 a 25,72%.

Já Souza (2013), realizando a caracterização físico-química da torta de mamona in natura, obteve valores médios de teor de umidade de 7,91%, teor de proteína de 26,53%, pH igual a 6,27, teor de acidez igual a 2,94%, teor de carboidratos igual a 52,05% e energia igual a 341,49 kcal/100g. Chambi *et al.* (2014) encontraram também para torta de mamona os seguintes valores médios para Umidade (8,8%), Proteína (39,5%), Cinza (10,3%), Fibras (28,8%), Gordura (3,0%) e Extrato livre de nitrogênio (18,4%).

4.1.2.2 Caracterização físico-química dos frutos de mamona após o processo de secagem

A Tabela 4.3 apresenta os resultados médios mais os seus respectivos desvios padrões para cada parâmetro da caracterização físico-química dos frutos de mamona, após o processo de secagem, nas temperaturas de ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. A umidade média encontrada nos frutos de mamona após o processo de secagem variou de 3,28 a 5,90%, enquanto o percentual de minerais apresentou valores variando de 3,04 a 7,21%. Já os percentuais de proteínas estiveram entre 14,41 e 17,80%, enquanto os lipídios variaram de 28,64 a 47,32%. A acidez total e o pH variaram de 2,24 a 14,49% e 5,51 a 6,51, respectivamente. Já o sódio e o cálcio apresentaram valores variando de 75,06 a 334,41 e 150,11 a 454,47 mg/100g, enquanto os percentuais de carboidrato e energia variaram de 26,55 a 44,38 % e 497,50 a 596,81 kcal/100g, respectivamente.

Tabela 4.3 - Caracterização físico-química dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem.

Parâmetros	Temperaturas (°C)						
	40	50	60	70	80	90	100
Umidade (%)	4,40 ± 0,08	4,24 ± 0,01	3,28 ± 0,08	4,21 ± 0,05	5,25 ± 0,12	5,90 ± 0,05	4,50 ± 0,12
Minerais (%)	6,26 ± 0,14	3,64 ± 0,05	3,68 ± 0,13	7,21 ± 0,03	4,69 ± 0,20	3,04 ± 0,12	4,60 ± 0,00
Proteína (%)	16,45 ± 0,12	14,88 ± 0,06	14,41 ± 0,05	15,56 ± 0,06	16,19 ± 0,06	17,80 ± 0,03	16,33 ± 0,31
Lipídios (%)	35,05 ± 0,05	41,52 ± 0,26	38,44 ± 0,28	28,64 ± 0,06	47,32 ± 0,27	37,40 ± 0,21	44,76 ± 0,15
Acidez total (%)	2,36 ± 0,05	5,35 ± 0,08	9,41 ± 0,03	2,24 ± 0,02	14,49 ± 0,01	9,92 ± 0,03	5,17 ± 0,00
pH	5,61 ± 0,00	6,51 ± 0,00	5,97 ± 0,01	6,13 ± 0,00	5,96 ± 0,00	5,69 ± 0,00	5,51 ± 0,00
Sódio (mg/100g)	334,41 ± 3,38	133,60 ± 0,02	149,22 ± 0,18	287,44 ± 0,47	76,46 ± 0,42	75,06 ± 1,14	151,96 ± 0,37
Cálcio(mg/100g)	454,47 ± 3,23	279,00 ± 2,05	382,00 ± 3,77	253,73 ± 0,53	288,13 ± 0,85	150,11 ± 0,89	314,81 ± 1,82
Carboidratos (%)	37,84 ± 0,17	35,71 ± 0,25	40,18 ± 0,53	44,38 ± 0,09	26,55 ± 0,52	35,87 ± 0,16	29,81 ± 0,19
Energia (kcal/100g)	532,65 ± 0,31	576,07 ± 0,14	564,36 ± 0,57	497,50 ± 0,09	596,81 ± 1,30	551,25 ± 1,24	587,37 ± 0,80

A partir da Tabela 4.3, observa-se que a umidade média final dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, após o processo de secagem, não decresceu linearmente com o aumento da temperatura do ar de secagem. Provavelmente isso se deve ao fato de se ter sido utilizadas diferentes amostras de mamona in natura com teores de umidade distintos para cada temperatura de ar de secagem.

4.1.2.3 Caracterização físico-química das sementes de mamona após o processo de secagem

A Tabela 4.4 apresenta os resultados médios mais os seus respectivos desvios padrões para cada parâmetro da caracterização físico-química das sementes de mamona após o processo de secagem. A umidade média encontrada nas sementes de mamona após o processo de secagem variou de 2,96 a 3,71%, enquanto o percentual de minerais apresentou valores variando de 1,71 a 4,64%. Já os percentuais de proteínas estiveram entre 16,96 e 18,49%, enquanto os lipídios variaram de 38,39 a 53,05%. A acidez total e o pH variaram de 2,99 a 6,33% e 5,35 a 5,98, respectivamente. Já o sódio e o cálcio apresentaram valores variando de 16,49 a 56,40 e 257,00 a 533,13 mg/100g, enquanto os percentuais de carboidrato e energia variaram de 22,57 a 36,02% e 560,94 e 645,86 kcal/100g, respectivamente.

A partir da análise da Tabela 4.4, observa-se que não ocorreu a diminuição gradativa da umidade média das sementes à medida que se aumentou a temperatura do ar de secagem. Provavelmente este fato ocorrido tenha sido por causa das umidades iniciais das mamonas terem sido diferentes para cada temperatura de ar de secagem.

Já ao analisar as Tabelas 4.3 e 4.4, da caracterização físico-química dos frutos e das sementes de mamona da cultivar BRS Energia, respectivamente, constata-se que a maior proporção de umidade foram obtidos nos frutos da mamona. Sabe-se que o óleo de rícino encontra-se nas sementes, fato este constatado com a obtenção da maior proporção de lipídios sendo sempre observado nas sementes (Tabela 4.4). O óleo de rícino possui muitas propriedades terapêuticas e medicinais, trazendo benefícios contra: infecções por fungos, problemas gastrointestinais, queimaduras ao sol, infecções e entre outros.

Tabela 4.4 - Caracterização físico-química das sementes de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem.

Parâmetros	Temperaturas (°C)						
	40	50	60	70	80	90	100
Umidade (%)	3,57 ± 0,10	3,71 ± 0,02	2,96 ± 0,05	3,12 ± 0,04	3,64 ± 0,08	3,39 ± 0,13	3,14 ± 0,07
Minerais (%)	4,61 ± 0,27	3,66 ± 0,13	2,32 ± 0,06	4,64 ± 0,05	3,39 ± 0,28	2,47 ± 0,05	1,71 ± 0,12
Proteína (%)	16,97 ± 0,04	17,97 ± 0,11	18,30 ± 0,09	17,83 ± 0,05	17,48 ± 0,02	16,96 ± 0,02	18,49 ± 0,14
Lipídios (%)	52,28 ± 0,16	50,46 ± 0,14	52,77 ± 0,13	38,39 ± 0,13	50,60 ± 0,28	49,29 ± 0,17	53,05 ± 0,02
Acidez total (%)	6,33 ± 0,06	3,43 ± 0,19	4,28 ± 0,10	4,20 ± 0,02	4,29 ± 0,01	4,89 ± 0,00	2,99 ± 0,02
pH	5,98 ± 0,02	5,74 ± 0,00	5,67 ± 0,00	5,81 ± 0,00	5,65 ± 0,00	5,73 ± 0,00	5,35 ± 0,00
Sódio (mg/100g)	36,29 ± 0,08	16,49 ± 0,46	18,17 ± 0,79	36,44 ± 0,42	48,01 ± 0,60	38,35 ± 0,19	56,40 ± 0,47
Cálcio(mg/100g)	503,00 ± 3,11	257,00 ± 2,62	308,00 ± 5,56	533,13 ± 2,16	317,35 ± 0,82	493,80 ± 1,07	265,66 ± 0,63
Carboidratos (%)	22,57 ± 0,30	24,20 ± 0,13	23,65 ± 0,27	36,02 ± 0,14	24,89 ± 0,54	27,88 ± 0,22	23,62 ± 0,21
Energia (kcal/100g)	628,66 ± 2,08	622,84 ± 1,05	641,73 ± 0,74	560,94 ± 0,75	624,91 ± 142,34	623,01 ± 0,11	645,86 ± 0,15

As umidades médias das sementes obtidas durante todos os experimentos de secagem, estão abaixo da faixa de umidade ótima para armazenamento de oleaginosas, que de acordo com Brooker *et al.* (1992), está entre 6 e 10%. Este fato se deu por conta de que durante os experimentos de secagem buscou-se sempre atingir o teor de umidade de equilíbrio do produto, não se preocupando em parar a secagem em um determinado teor de umidade previamente fixado.

Observou-se que para todas as análises físico-químicas, exceto para a energia das sementes de mamona obtida na temperatura de ar de secagem de 80°C, os dados amostrais apresentaram baixa dispersão em relação à média dos dados, com coeficientes de variação abaixo de 10%, mostrando com isso que todas as análises físico-químicas estão estatisticamente em conformidade. Conforme observa-se nos laudos das análises físico-químicas, para cada temperatura do ar de secagem, as análises dos parâmetros foram feitas para três repetições.

As Figuras 4.1 a 4.10 ilustram as comparações das análises físico-químicas tanto para frutos como para sementes da mamona da cultivar BRS Energia em função das diferentes temperaturas do ar de secagem.

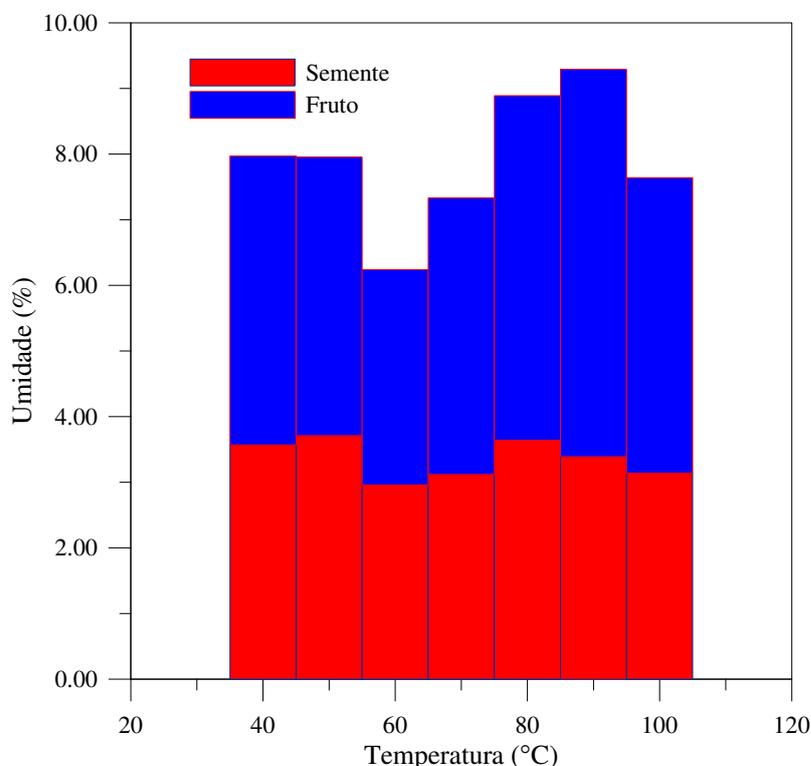


Figura 4.1 - Variação da umidade em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

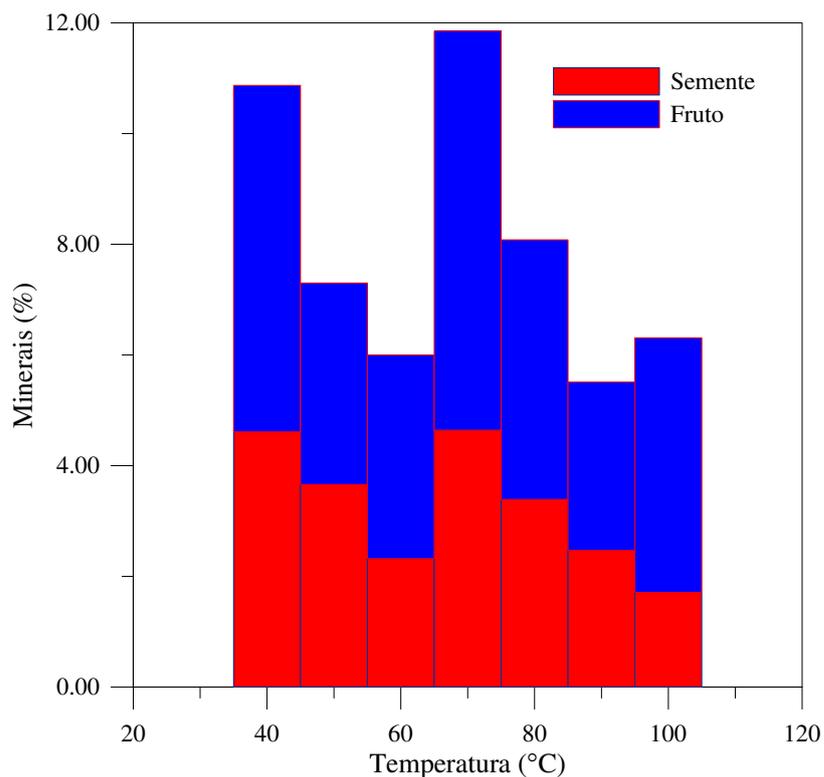


Figura 4.2 - Variação do teor de minerais em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

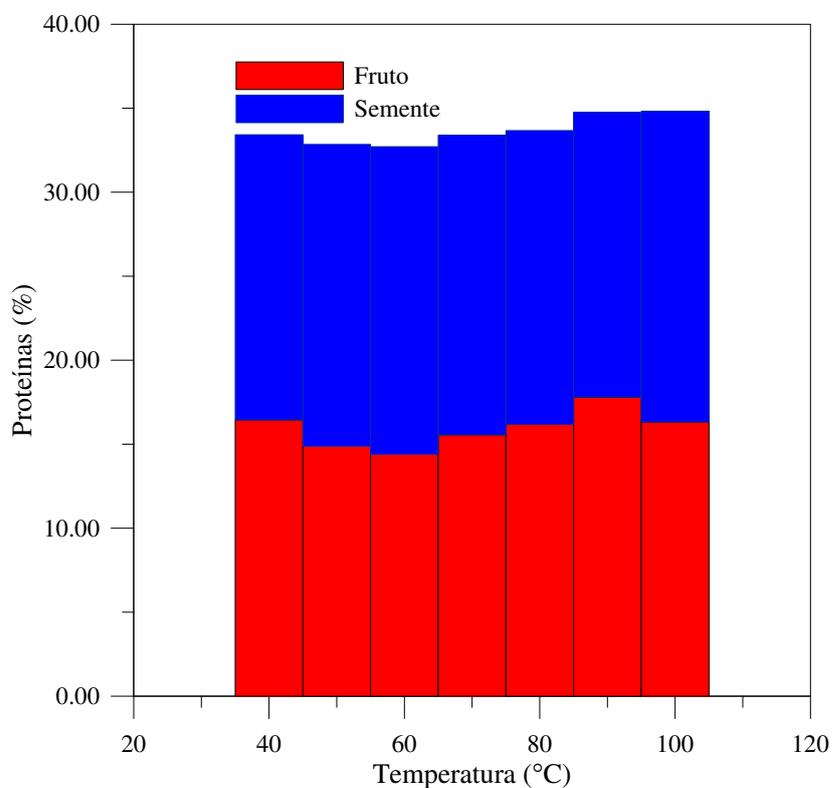


Figura 4.3 - Variação do teor de proteínas em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

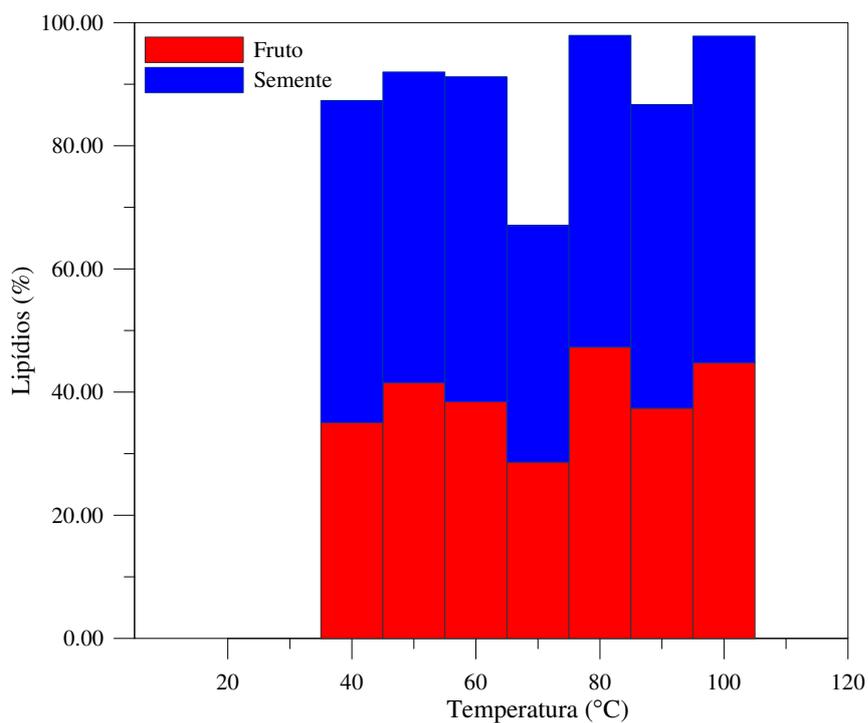


Figura 4.4 - Variação do teor de lipídios em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

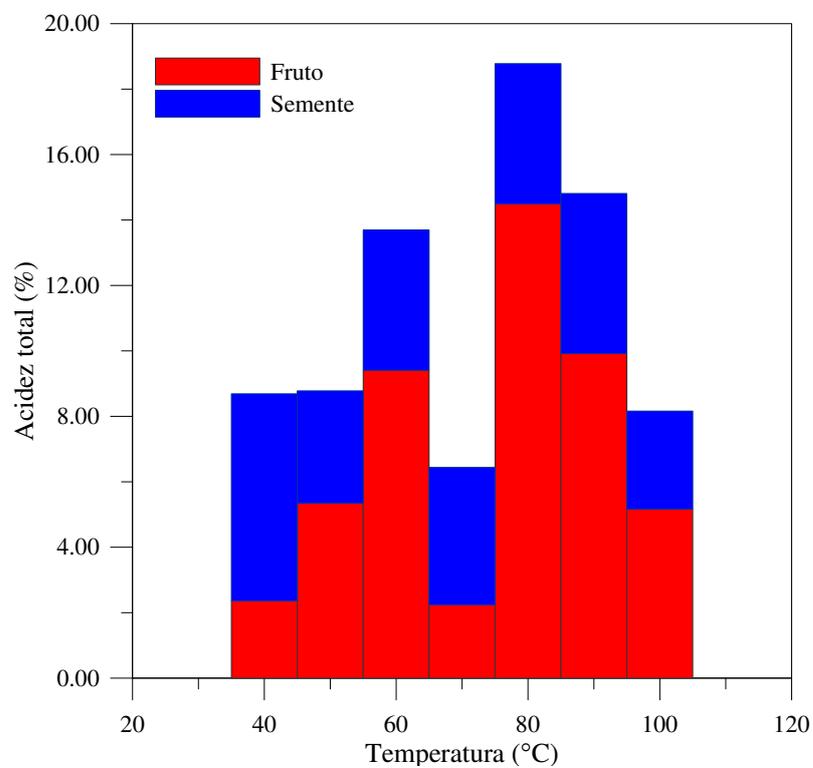


Figura 4.5 - Variação do teor de acidez total em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

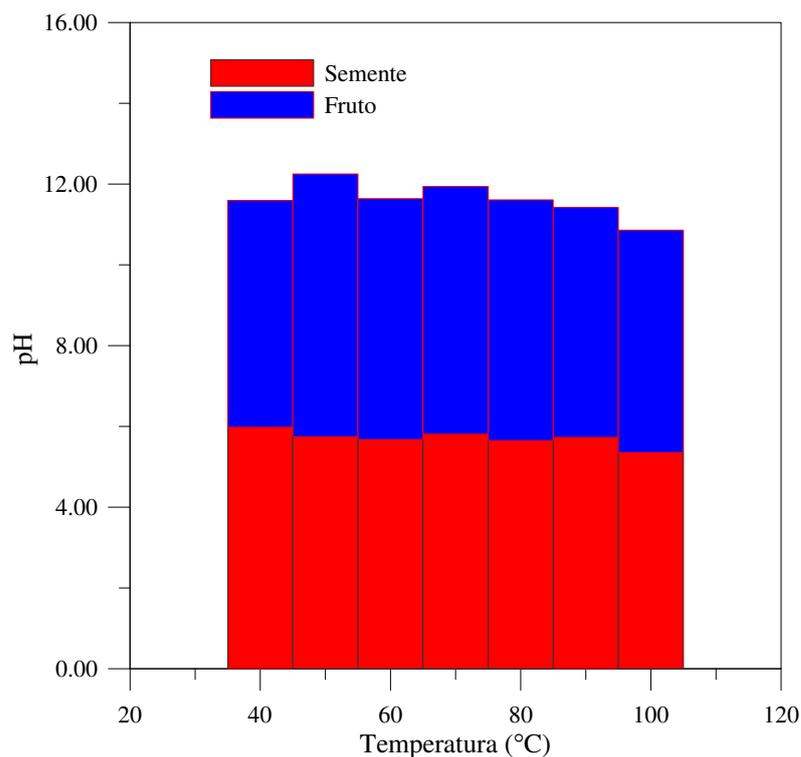


Figura 4.6 - Variação do pH em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

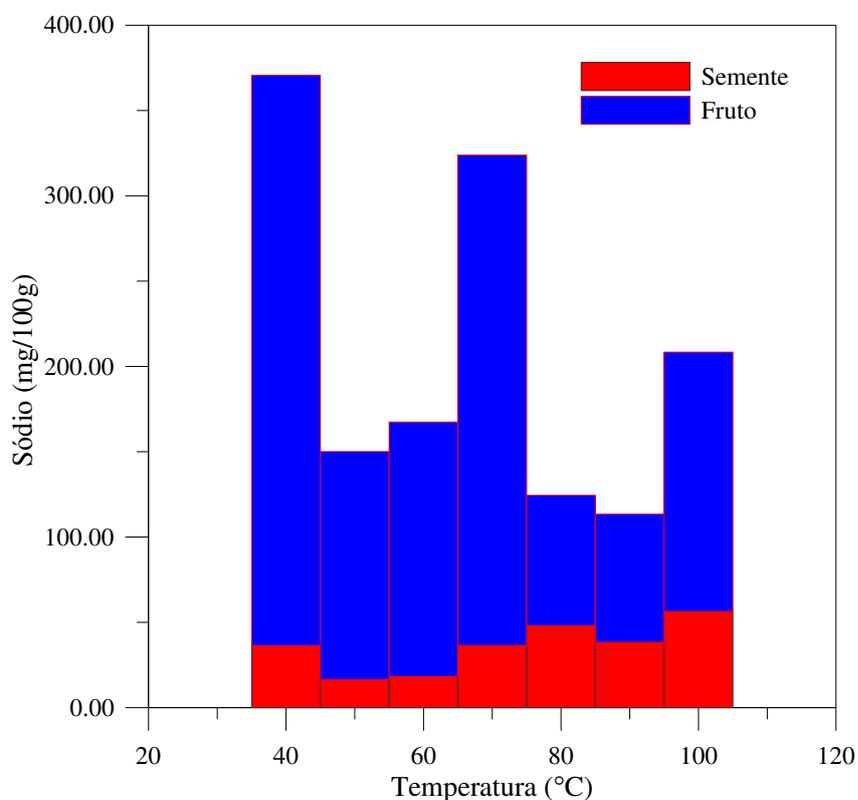


Figura 4.7 - Variação do teor de sódio em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

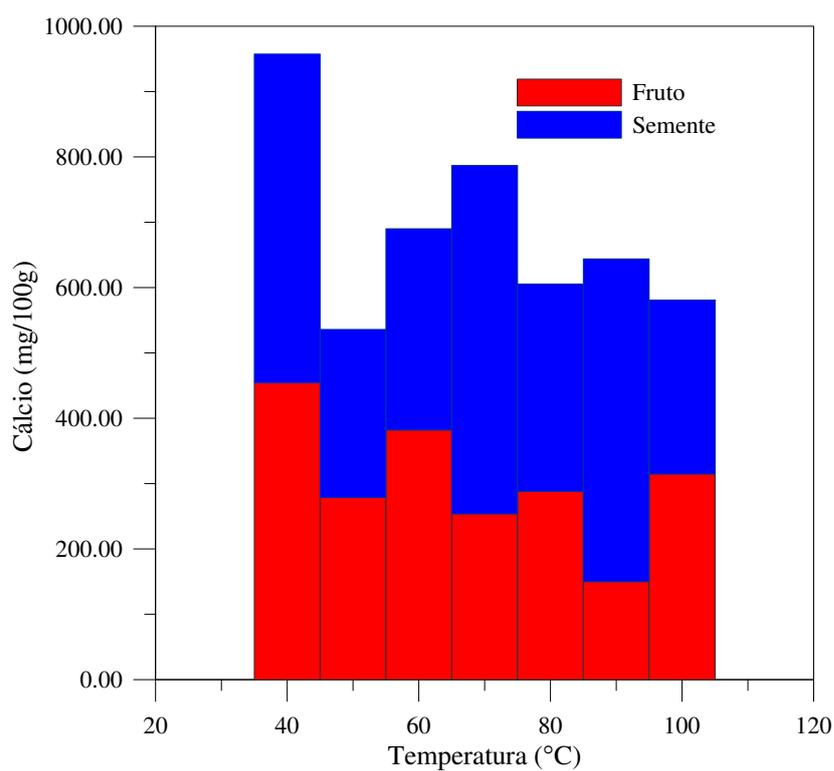


Figura 4.8 - Variação do teor de cálcio em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

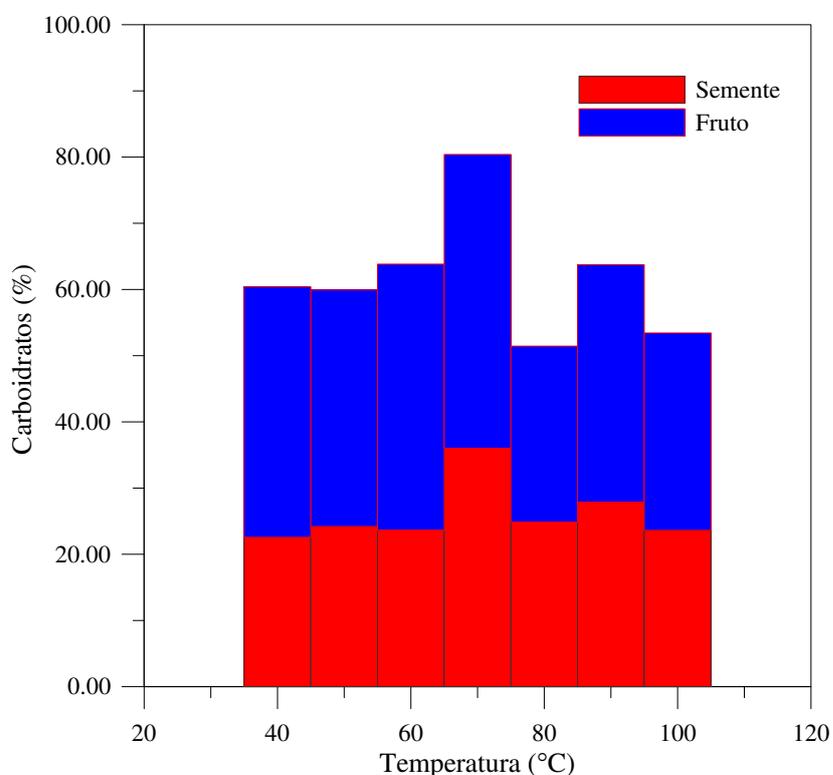


Figura 4.9 - Variação do teor de carboidratos em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

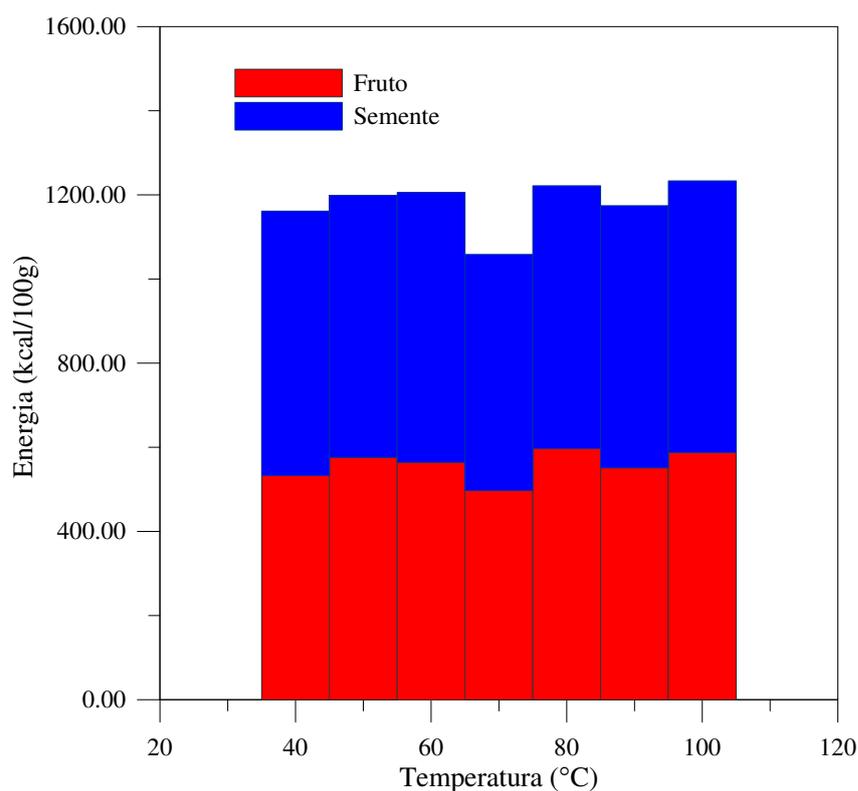


Figura 4.10 - Variação do teor de energia em função da temperatura do ar de secagem para frutos e sementes de mamona da cultivar BRS Energia.

Ao analisar as Figuras 4.1 a 4.10, das comparações das análises físico-químicas tanto para frutos com para sementes de mamonas, pode-se observar que em relação às umidades dos frutos e sementes, verifica-se que os percentuais de umidade dos frutos foram sempre superiores aos percentuais de umidade das sementes, para cada situação de secagem. Este fato provavelmente dar-se por conta da maior concentração de umidade estar no fruto e não nas sementes, pois nas sementes encontra-se o óleo de rícino, que para esta variedade é de aproximadamente 48%, conforme mostrado na Tabela 2.1. O mesmo fato é observado para o caso dos percentuais de minerais. Já em relação aos percentuais de proteínas, aconteceu o inverso, os percentuais de proteínas dos frutos foram sempre inferiores aos percentuais de proteínas das sementes. Fato este também observado para o caso dos lipídios.

No caso dos percentuais de acidez total, constatou-se que os percentuais foram sempre maiores para os frutos do que para as sementes. Este fato também foi observado tanto para o pH quanto para o teor de sódio. Já em relação aos teores de cálcio, observou-se uma alternância nos resultados, ora o teor era maior para os frutos, ora o teor era maior para as sementes. No caso dos teores de carboidratos, ocorreu que sempre os teores foram maiores

para os frutos do que para as sementes. Por fim, constatou-se que os teores de energia das sementes foram sempre maiores do que os teores de energia dos frutos.

Como nas sementes de mamona encontra-se o óleo de rícino, isto explica a razão porque os teores de energia das sementes foram sempre maiores do que os teores de energia dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia nas diferentes temperaturas de ar de secagem.

4.1.2.4 Secagem de frutos de mamona da variedade BRS Energia

Nos experimentos foram utilizadas diversas temperaturas e umidades relativas no ambiente de secagem da estufa, conforme ilustra a Tabela 3.1, com o objetivo de analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de umidade dos frutos de mamona da variedade BRS Energia.

Com o aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumenta-se a taxa de secagem e os frutos de mamona alcançam mais rapidamente a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Porém, esta situação pode causar danos aos frutos e as sementes, interferindo na qualidade final do produto. Não são recomendados altos gradientes térmicos nos frutos, ou entre os frutos e o ar de secagem porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no fruto, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem.

Durante a secagem, geram-se tensões de sentido contrário entre a camada externa e a interna do sólido, e quanto maior a perda de água, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com a possibilidade de trincar. Para se ter uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem, pelo controle da velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem. Isto conduz a um produto final de qualidade aceitável comercialmente.

As Figuras 4.11 a 4.17 mostram o comportamento da evolução do teor de umidade médio e temperatura adimensional em função do tempo quando os frutos de mamona estão sendo secos à temperatura de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 4.11 a 4.17, que à medida que o tempo de secagem aumenta o teor de umidade médio adimensional decresce gradativamente até atingir o teor de umidade de equilíbrio, enquanto que a temperatura adimensional aumenta até atingir a temperatura de equilíbrio na superfície do fruto de mamona da variedade BRS Energia.

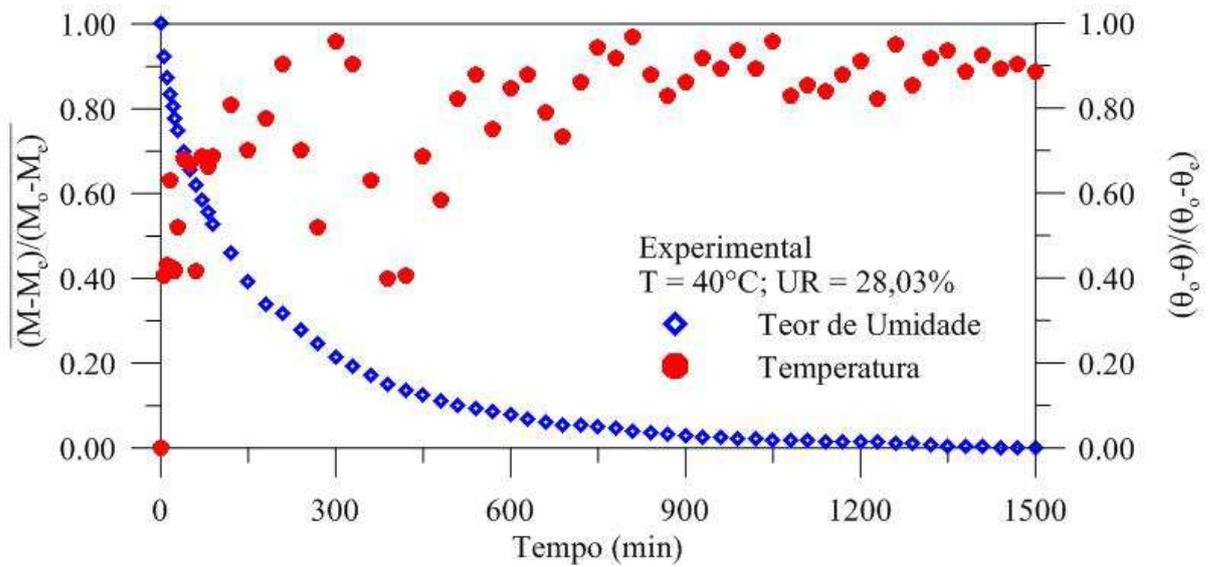


Figura 4.11 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 40°C e UR 28,03%.

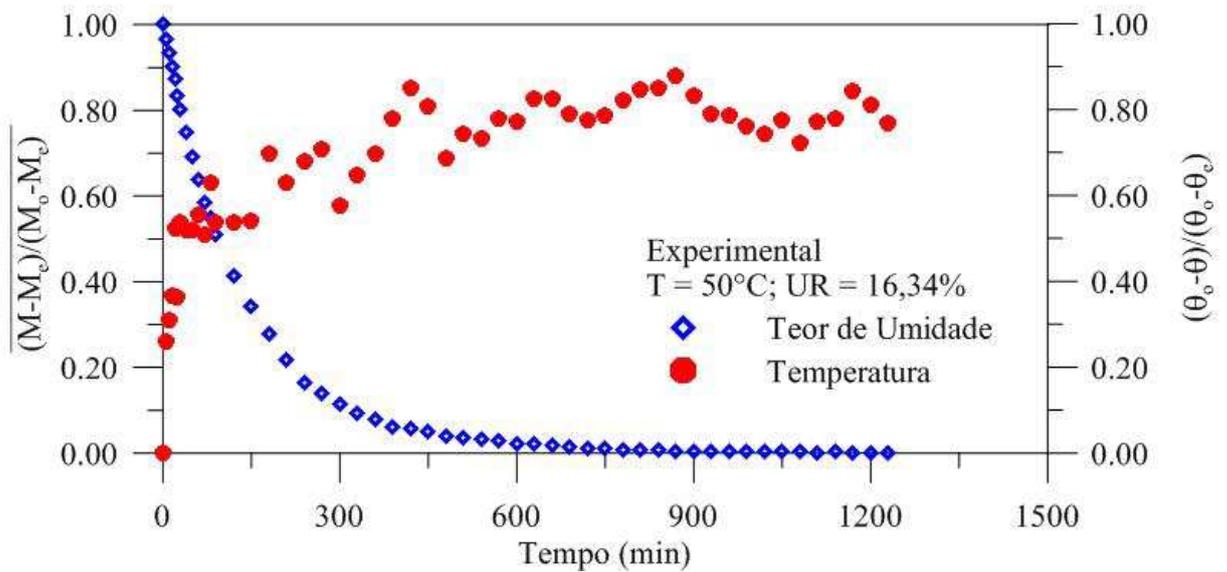


Figura 4.12 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 50°C e UR 16,34%.

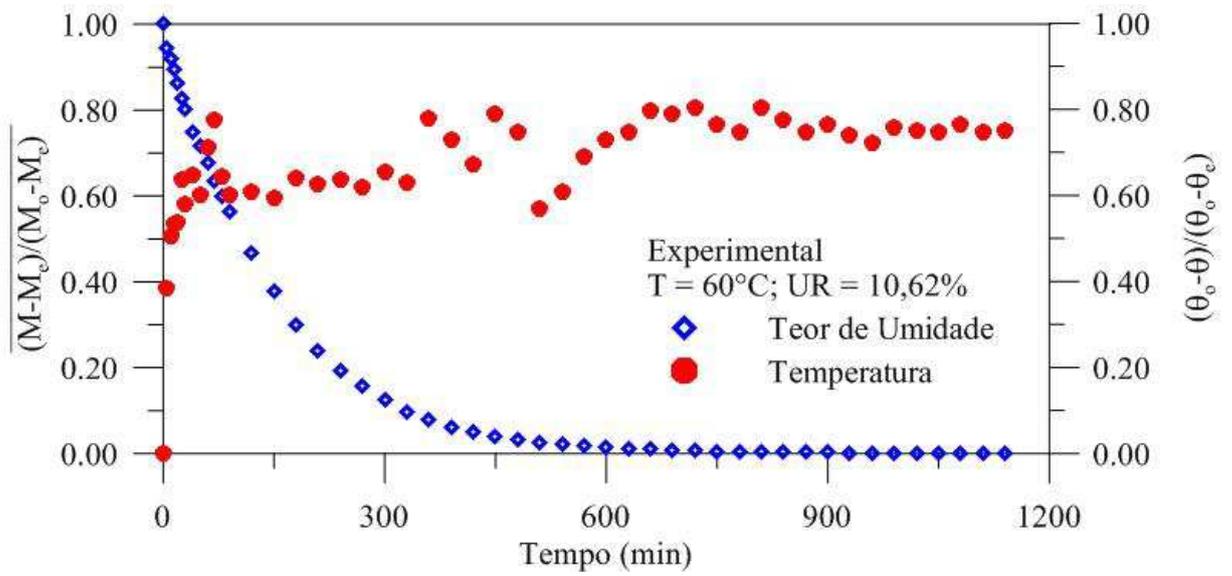


Figura 4.13 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 60°C e UR 10,62%.

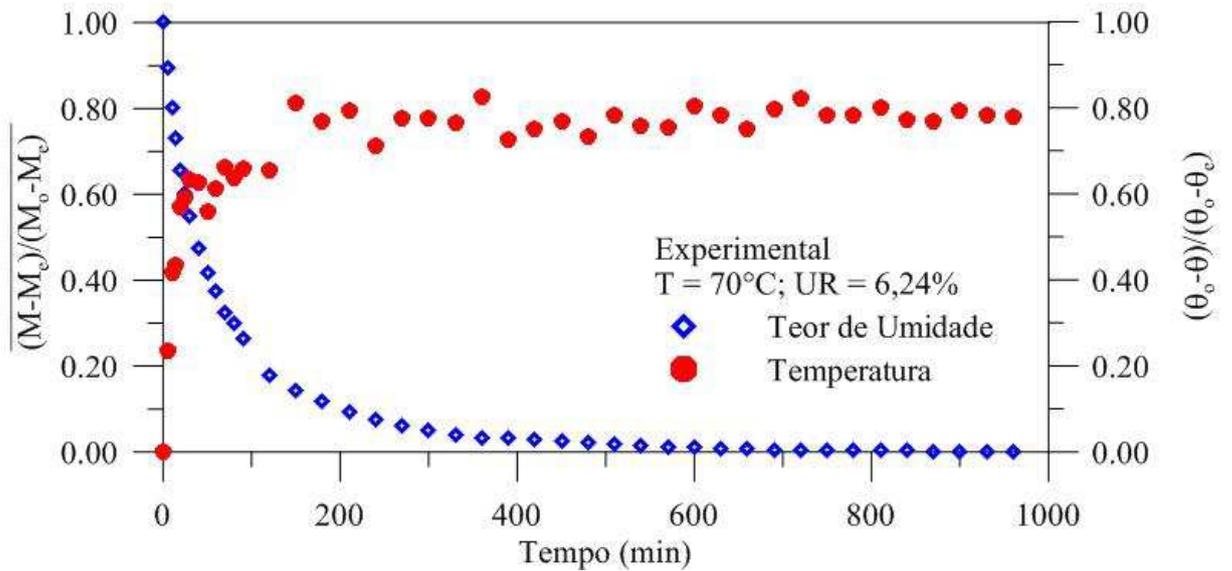


Figura 4.14 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 70°C e UR 6,24%.

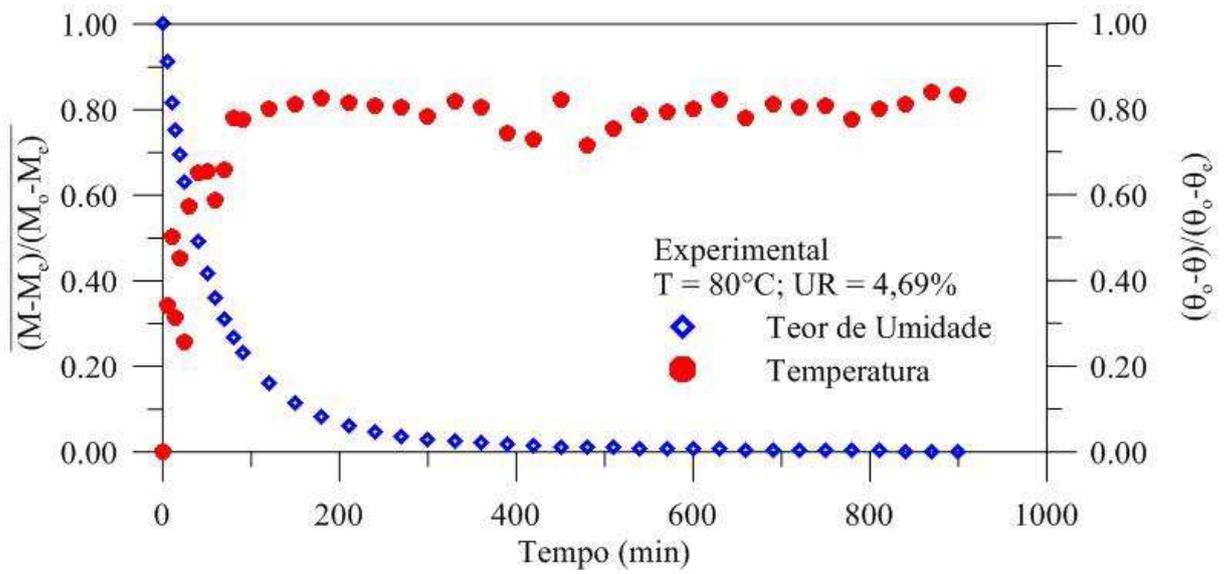


Figura 4.15 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 80°C e UR 4,69%.

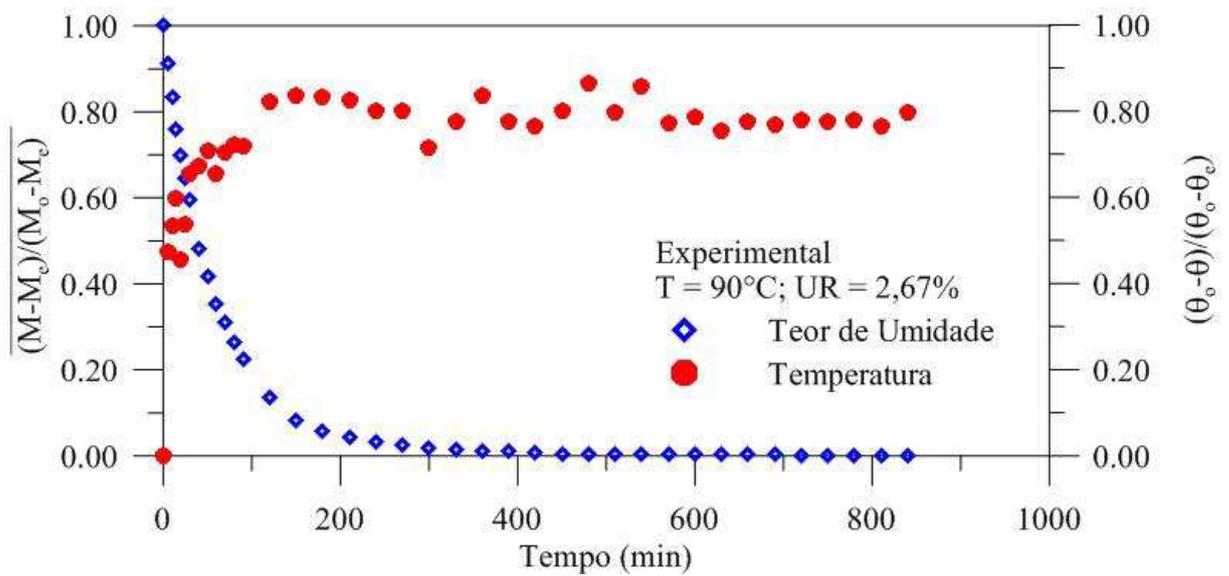


Figura 4.16 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 90°C e UR 2,67%.

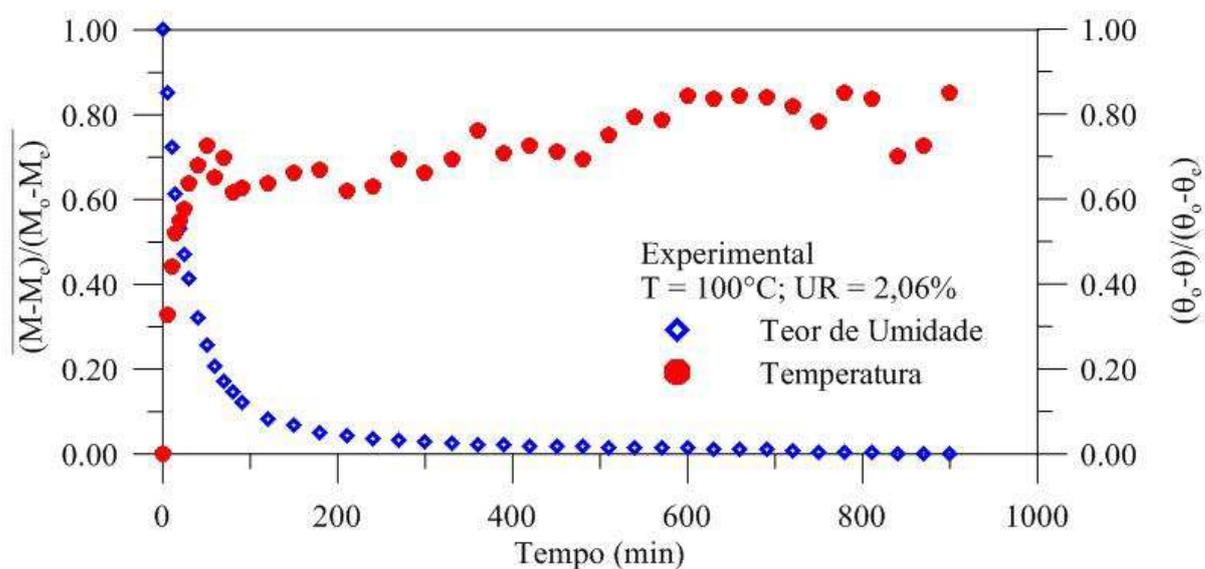


Figura 4.17 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 100°C e UR 2,06%.

Já as Figuras 4.18 e 4.19 ilustram, respectivamente, as comparações do comportamento da evolução do teor de umidade médio e da temperatura adimensional em função do tempo dos frutos de mamona da variedade BRS Energia para as sete temperaturas de ar de secagem.

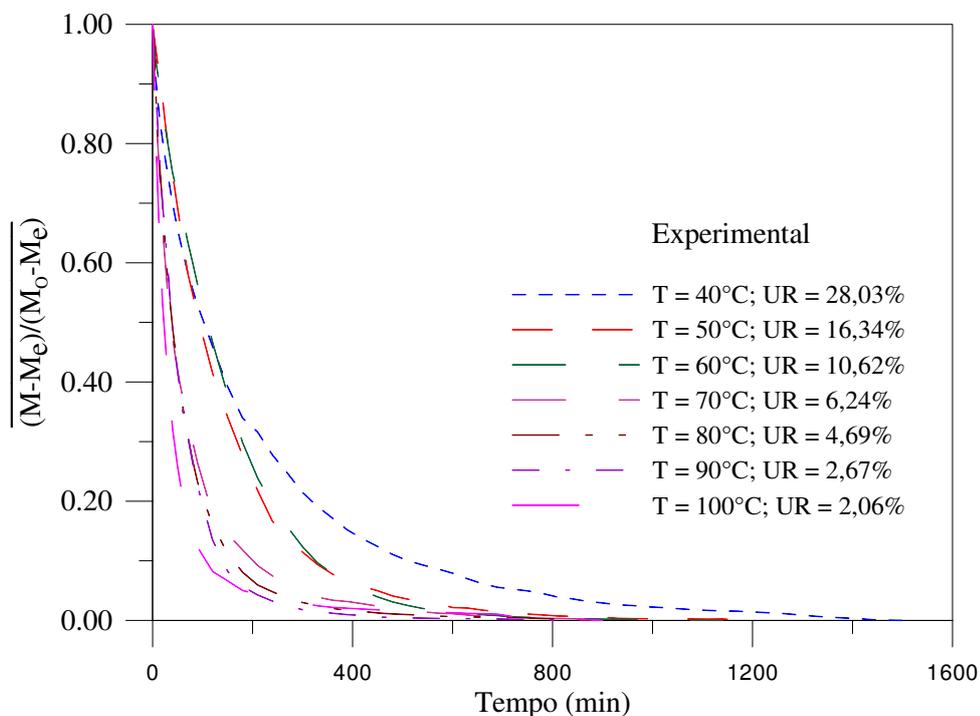


Figura 4.18 – Variação do teor de umidade médio adimensional em função do tempo dos frutos de mamona para diferentes temperaturas e umidades de ar de secagem.

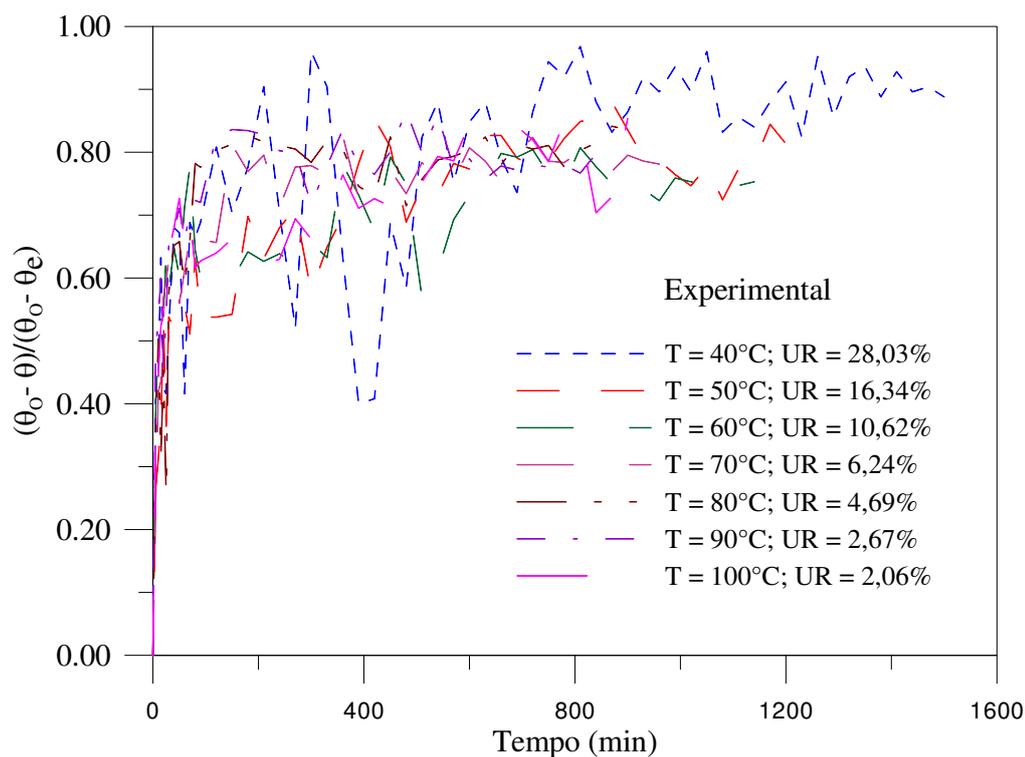


Figura 4.19 – Variação da temperatura adimensional na superfície dos frutos de mamona em função do tempo para diferentes temperaturas e umidades de ar de secagem.

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, os dados dimensionais dos frutos de mamona da variedade BRS Energia no início e no final do processo de secagem. No início do processo, os dados dimensionais coletados foram obtidos de frutos de mamona in natura. Já no final do processo, os dados dimensionais coletados foram obtidos de frutos de mamona secos.

Tabela 4.5 – Dados dimensionais dos frutos de mamona no início do processo de secagem.

T (°C)	Parâmetros geométricos dos frutos de mamona in natura							
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	E _s (%)	C (%)	V ₀ (mm ³)	A _p (mm ²)	A _s (mm ²)
40	17,804	16,022	17,169	95,384	96,433	2564,354	240,078	53,351
50	23,515	21,751	22,598	96,151	96,100	6051,915	417,354	71,031
60	19,753	17,903	18,624	94,897	94,288	3448,413	288,929	58,888
70	18,688	16,782	17,673	94,698	94,569	2902,121	259,396	55,598
80	17,591	15,972	16,982	95,702	96,538	2498,258	234,622	52,889
90	17,053	15,756	16,729	96,777	98,100	2353,506	224,058	51,847
100	18,834	16,078	17,103	91,863	90,809	2711,724	252,991	54,354

Tabela 4.6 – Dados dimensionais dos frutos de mamona no final do processo de secagem.

T (°C)	Parâmetros geométricos dos frutos secos de mamona								
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	E _s (%)	C (%)	V (mm ³)	A _p (mm ³)	A _s (mm ²)	ψ (decimal)
40	17,839	15,945	17,139	95,051	96,076	2552,579	240,130	53,269	0,955
50	28,177	26,740	27,605	97,601	97,970	10890,367	610,903	86,397	1,799
60	22,236	20,823	21,531	96,790	96,829	5219,907	376,091	67,614	1,514
70	18,800	16,716	17,900	94,600	95,213	2945,384	264,302	55,872	1,015
80	17,870	16,067	17,114	95,136	95,769	2572,821	240,196	53,410	1,029
90	17,043	15,686	16,547	96,319	97,090	2316,200	221,491	51,571	0,984
100	18,705	16,034	17,076	92,152	91,291	2681,540	250,861	54,152	0,988

A partir da análise dos dados dimensionais no início e no fim do processo de secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia, observa-se o efeito combinado entre a presença de espaços vazios no interior do grão (análise visual) e à reduzida contração de suas dimensões, em alguns casos, faz com que o volume dos grãos permaneça praticamente constante, enquanto ocorre a redução de sua massa durante a secagem. Esses resultados evidenciam que a redução do teor de água devido à secagem, praticamente não exerceu influência sobre o tamanho dos grãos. Observou-se também para algumas temperaturas a ocorrência da expansão dos frutos de mamona, durante o processo de secagem, o que veio então a influenciar os resultados do índice de contração volumétrica para esses casos.

Resultados similares foram obtidos por Goneli (2008), ao estudar as propriedades físicas dos grãos e frutos de mamona da variedade Guarani, durante o processo de secagem. Razavi *et al.* (2007), trabalhando com castanhas e grãos de pistachio, também constataram que o encolhimento dos produtos não acompanhavam a redução de suas massas durante o processo de secagem.

As Figuras 4.20 e 4.21 ilustram os frutos de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem. Ao analisar as Figuras 4.20 e 4.21, observa-se a ocorrência da abertura dos frutos, facilitando assim a retirada dos grãos (sementes) contidas nos mesmos. Contudo, temperaturas muito elevadas, no caso acima de 70°C, pode provocar a queima dos frutos e, conseqüentemente, afetar a qualidade final das sementes contidas neles.

Observando-se mais cuidadosamente as Figuras 4.20 e 4.21, percebe-se trincas e deformações nos frutos de mamona, provenientes de tensões térmicas e hídricas no material

durante o processo de secagem, principalmente nas temperaturas mais elevadas onde existem altas taxas de secagem.



Figura 4.20 – Frutos de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 40°C.



Figura 4.21 – Frutos de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 80°C.

Já as Figuras 4.22 a 4.24 ilustram as sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem.



Figura 4.22 – Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 40°C.



Figura 4.23 – Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 60°C.



Figura 4.24 – Sementes de mamona da variedade BRS Energia, após o processo de secagem, à temperatura do ar de 80°C.

4.2 Teóricos (Simulados)

4.2.1 Modelo empírico de Page

Os modelos matemáticos empíricos são usados para descrever as características cinéticas do processo de secagem, visando melhorar, projetar e controlar os sistemas de secagem. Neste trabalho, o modelo de Page foi usado para prever a perda de água dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, durante o processo de secagem. Essa escolha deu-se pelo motivo de que na literatura o modelo de Page se ajusta muito bem aos dados experimentais de secagem de frutos mamona de outras variedades.

Goneli (2008), ao testar 10 modelos matemáticos para prever o processo de secagem de grãos de mamona da variedade Guarani, observou que os modelos de Page, Henderson e Pabis, e Midilli foram os que melhor representaram o fenômeno de secagem dos grãos de mamona, mas que o modelo de Page, por apresentar um número menor de parâmetros, foi escolhido para representar a cinética de secagem dos grãos de mamona da variedade Guarani em camada fina. Zuchi (2012) utilizou o modelo matemático de Page para ajustar dados experimentais de teor de umidade de frutos de mamona das cultivares IAC 80 e BRS 188 Paraguaçu, em quatro temperaturas de secagem: 40, 60, 80 e 100°C.

A Tabela 4.7 reporta os parâmetros estatísticos e do modelo de Page obtidos após ajustes aos dados experimentais do teor de umidade dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, para diferentes condições de secagem.

Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos e do modelo de Page obtidos após ajustes aos dados experimentais do teor de umidade dos frutos de mamona.

Parâmetros					
T (°C)	K (s⁻¹)	n	r	R² (%)	SE
40	0,0241	0,7297	0,9999	99,985	0,0036
50	0,0080	0,9802	0,9998	99,966	0,0063
60	0,0064	1,0091	0,9996	99,927	0,0094
70	0,0439	0,7550	0,9993	99,854	0,0110
80	0,0278	0,8746	0,9996	99,917	0,0087
90	0,0214	0,9446	0,9998	99,964	0,0059
100	0,0541	0,8142	0,9980	99,600	0,0165

Os tempos médios necessários para completar o processo de secagem dos frutos de mamona da variedade BRS Energia foram respectivamente de 1.500, 1.230, 1.140, 960, 900, 840 e 900 minutos para as temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C (Tabela 3.1). Como esperado, o tempo de secagem decresceu com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Faria *et al.* (2012) verificaram que o tempo necessário para a semente de crambe atingir teor de água de equilíbrio higroscópico com o ar de secagem foi diretamente proporcional ao teor de água na semente, sendo de 12, 10, 8, 6 e 4 h para a temperatura de 30°C; de 7, 6,5, 3,6, 3,5 e 3,4 h para 40°C; de 4, 3,1, 2,9, 2,6 e 1,5 h para temperatura de 50°C; 2,7, 2,6, 2,5, 1,5 e 1 h para temperatura de 60°C e de 2, 1,9, 1,4, 1, 0,9 h para temperatura de 70°C, considerando-se os teores de água de 0,28, 0,25, 0,17, 0,13 e 0,11 (b.s.) respectivamente. Goneli (2008) também verificou essa tendência de proporcionalidade entre o teor de água de equilíbrio higroscópico com a temperatura de ar de secagem. Este fato também foi verificado em outros trabalhos de pesquisa (GONELI *et al.*, 2014; ROCHA *et al.*, 2012; RADÜNZ *et al.*, 2011; AKPINAR, 2006; MOHAPATRA e RAO, 2005).

A partir dos resultados da Tabela 4.7, constata-se que a constante de secagem (k) tem uma tendência de crescimento com o aumento da temperatura do ar de secagem. Goneli *et al.* (2009), afirmam que a constante de secagem (k) representa o efeito das

condições externas de secagem, e tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem. Já o coeficiente (n) do modelo apresentou uma tendência não linear dos seus valores em relação às temperaturas de secagem. Misra e Brooker (1980) afirmam que o parâmetro "n" depende da natureza do produto e das condições de secagem, evidenciando a resistência interna do produto ao processo de secagem.

O modelo matemático de Page ajustado aos dados experimentais, para todos os tratamentos, mostrados na Tabela 4.7, mostram que o referido modelo ajustou-se muito bem aos dados experimentais de secagem de frutos de mamona da variedade BRS Energia. Estes resultados dão um indicativo de que as equações propostas representam muito bem o fenômeno de secagem.

De acordo com Draper e Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio-padrão da estimativa. Sendo assim, quanto menor for o valor do desvio-padrão da estimativa (SE), melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados observados.

Goneli (2008) estudando a cinética de secagem de grãos de mamona da variedade Guarani, nas temperaturas de 25, 35, 45 e 55°C e diferentes condições de umidade relativa do ar, também encontraram coeficientes de determinação acima de 99,60% e valores de desvio-padrão da estimativa abaixo de 0,0156.

Resende *et al.* (2010), realizando a secagem do feijão Adzuki, obtiveram para o coeficiente de determinação valores superiores a 98%, na qual mencionaram uma representação satisfatória para o fenômeno estudado. Já Goneli *et al.* (2014), estudando a cinética de secagem de folhas de erva baleeira, verificaram um ajuste satisfatório dos modelos aos dados experimentais, sendo na maioria dos casos o coeficiente de determinação superior a 97,9%

As Figuras 4.25 a 4.31 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade adimensional versus tempo de secagem, respectivamente, para as temperaturas do ar de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. É evidenciado nos parâmetros estatísticos apresentados anteriormente (Tabela 4.7) e nos gráficos mostrados a seguir, a excelente concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0, para todas as temperaturas de secagem.

Já Figura 4.32 ilustra as cinéticas de secagem dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia ajustadas através do modelo matemático de Page, para as temperaturas 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. É evidenciado que a dinâmica de secagem aumenta com o aumento da

temperatura de secagem e que, para a temperatura de 100°C, a cinética de secagem é a mais intensa de todas as outras.

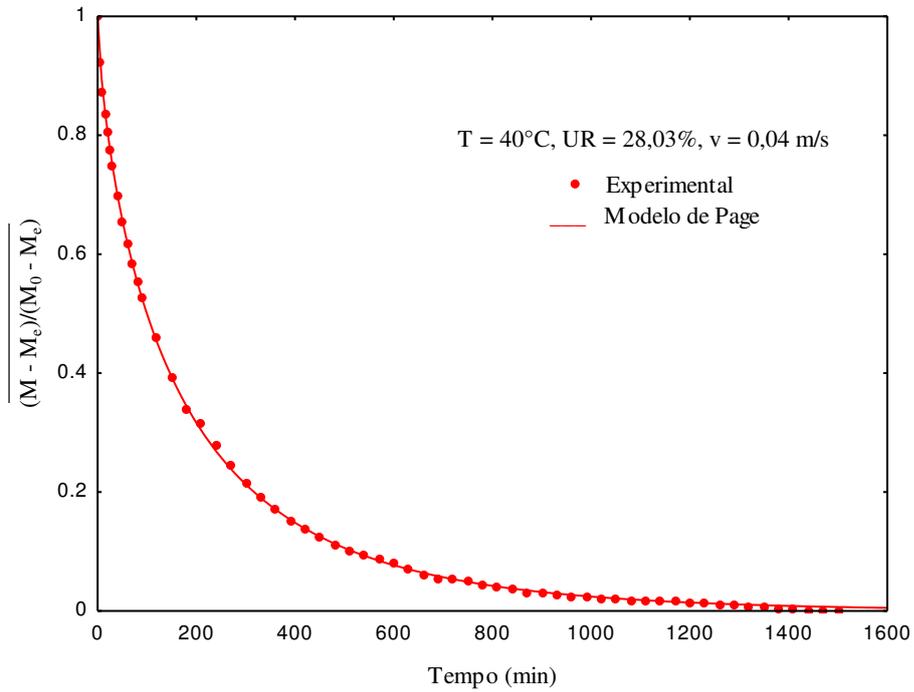


Figura 4.25 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 40°C).

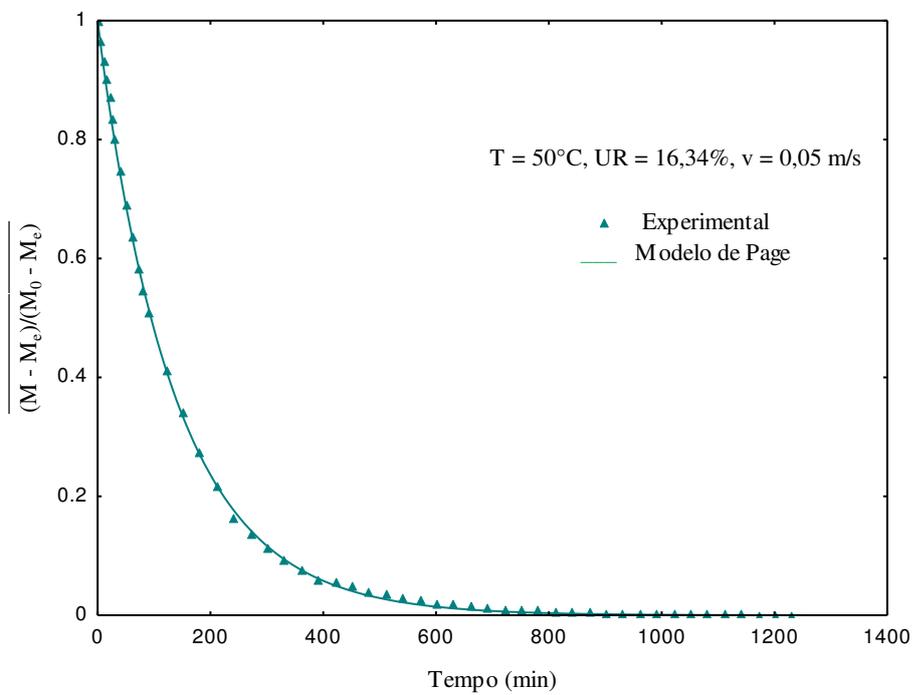


Figura 4.26 – Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 50°C).

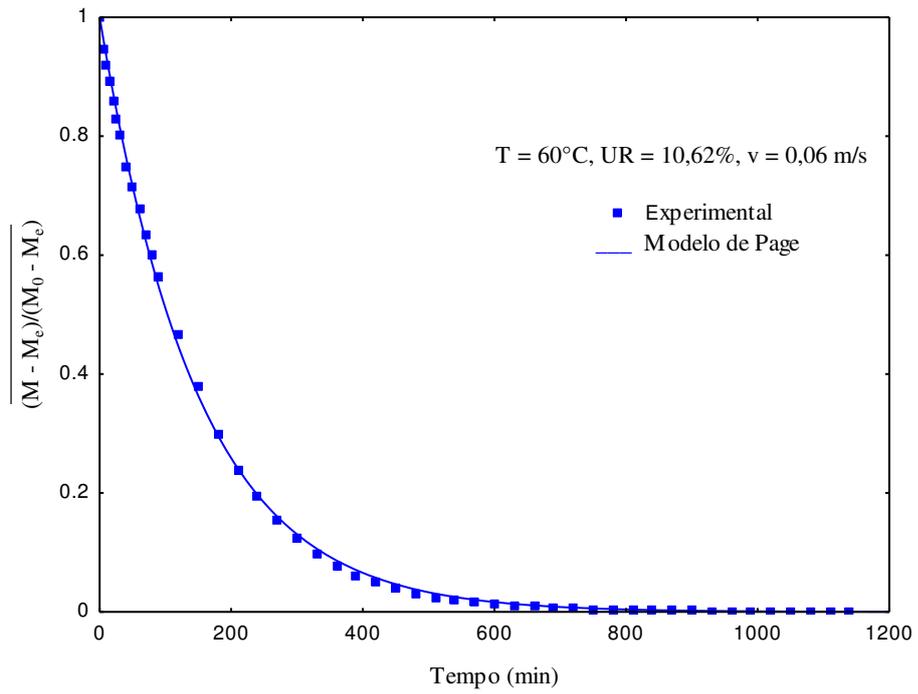


Figura 4.27 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 60°C).

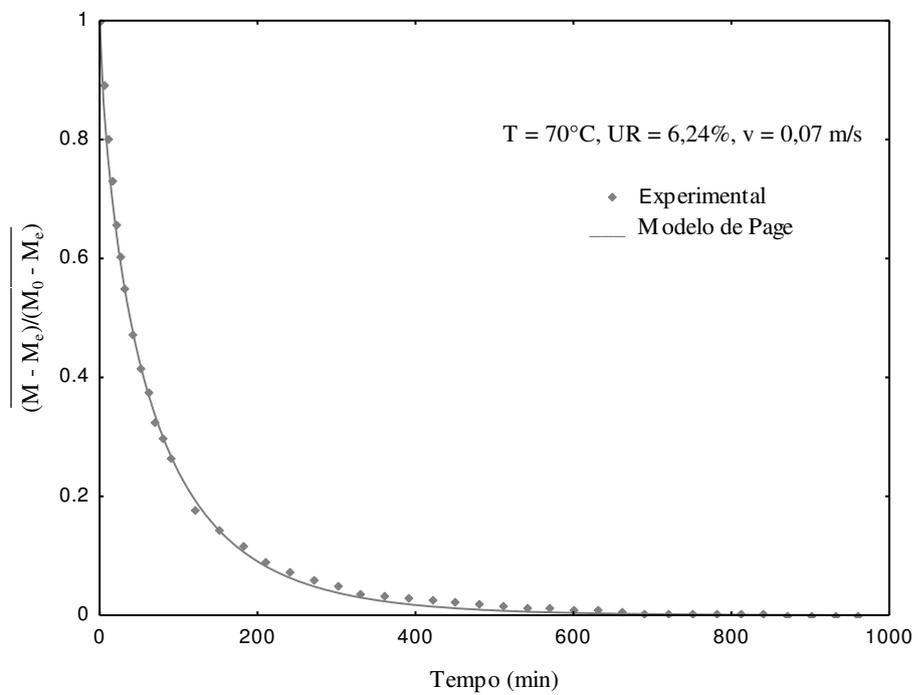


Figura 4.28 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 70°C).

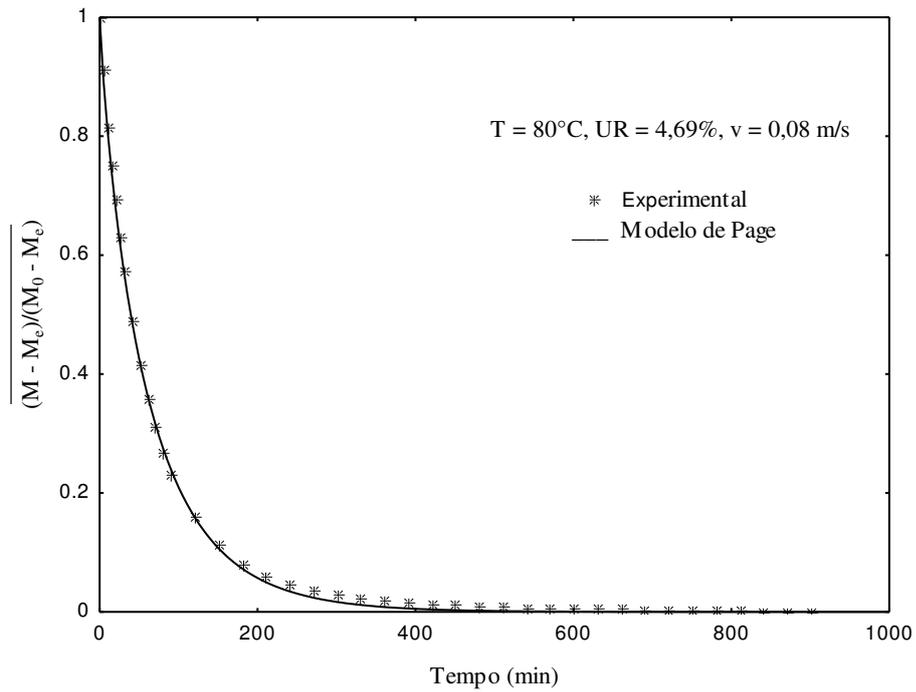


Figura 4.29 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 80°C).

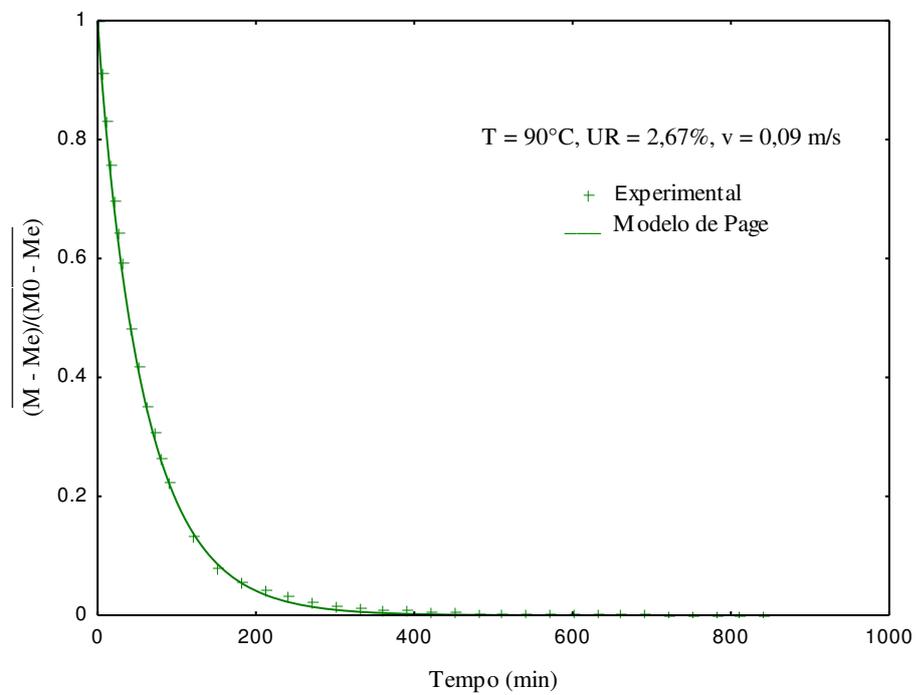


Figura 4.30 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 90°C).

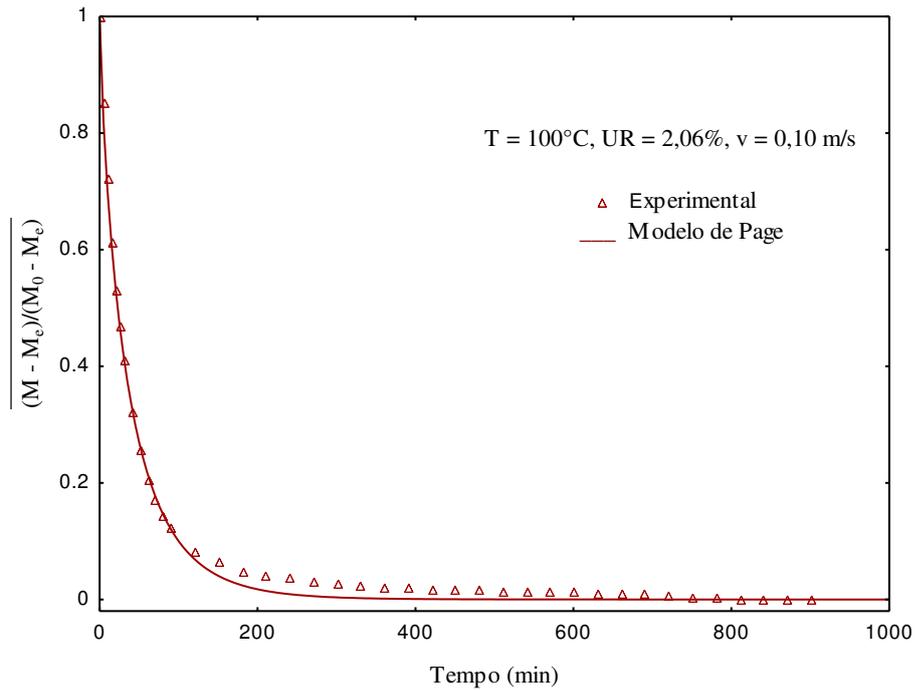


Figura 4.31 - Comparação entre as cinéticas de secagem dos frutos de mamona experimental e estimada (T = 100°C).

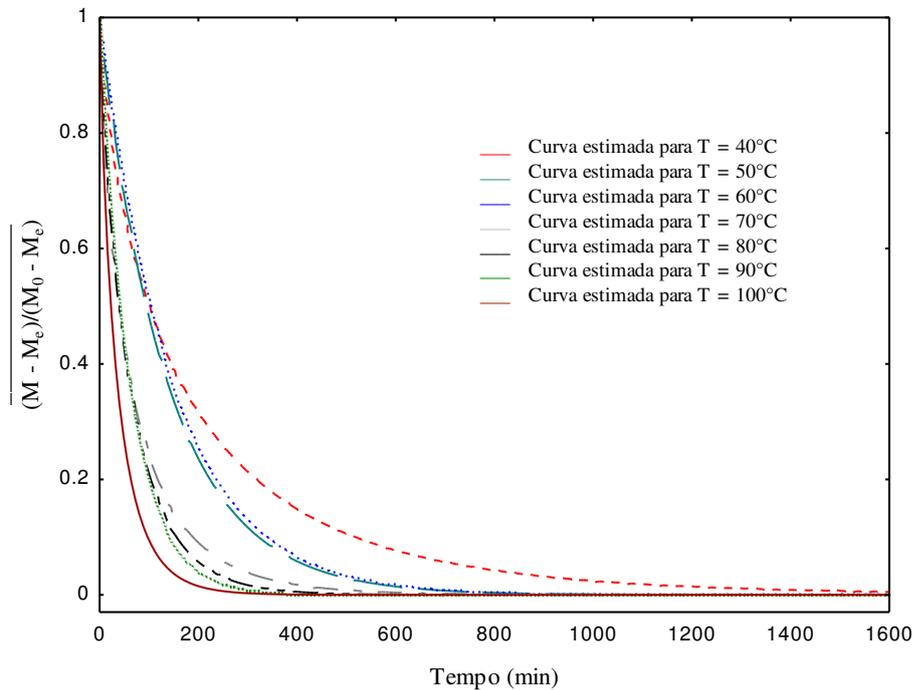


Figura 4.32 – Curvas de secagem dos frutos de mamona estimadas pelo modelo de Page para diferentes temperaturas de ar de secagem.

Observa-se na Figura 4.32 que, para os frutos de mamonas da cultivar BRS Energia atingirem o teor de umidade de aproximadamente 10% b.u., foram necessárias 70; 180; 210;

10; 60; 40 e 5 minutos, para as temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente. Esses resultados não evidenciaram na totalidade que com o aumento da temperatura de secagem o tempo de secagem diminuísse. Uma explicação para este fato foi que os teores de umidade inicial dos frutos de mamona foram diferentes para cada experimento. Os teores de umidade inicial, em base úmida, foram de 13,97%; 23,61%; 28,71%; 11,23%; 21,81%; 18,91% e 11,54%, respectivamente, para os experimentos com temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Conforme já foi mencionado na metodologia, as amostras de mamona foram colhidas diretamente na lavoura e transportadas até o laboratório para a realização do processo de secagem.

Corrêa *et al.* (2007), trabalhando com a cultivar IAC 80 e com temperatura de ar 60°C, precisaram de 11 horas de secagem para que os frutos de mamona atingissem a umidade adequada para debulha (10% b.u.). Zuchi (2012), estudando a cinética de secagem de frutos de mamona da cultivar IAC 80, à temperatura de ar de 60°C, observou que com uma hora de secagem os frutos de mamona atingiu a razão de umidade de 0,4. Já com três horas de secagem, o mesmo autor observou que a razão de umidade dos frutos de mamona da cultivar IAC 80 foi de 0,2.

Nas Figuras 4.33 a 4.36, são apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para o modelo matemático de Page em função dos valores estimados para o teor de umidade adimensional dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

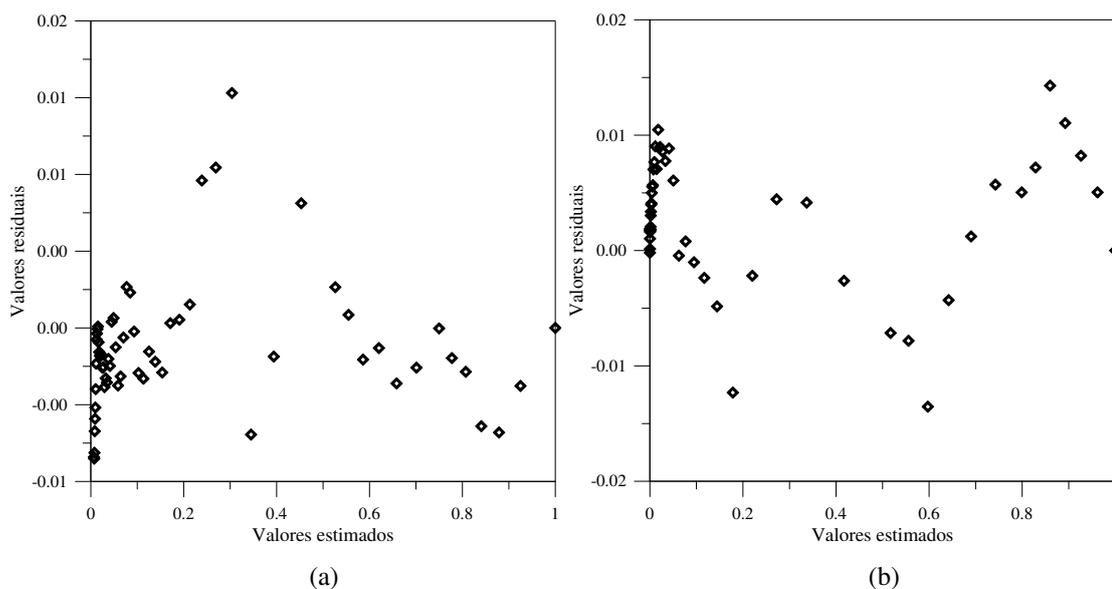


Figura 4.33 - Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 40°C e b) 50°C.

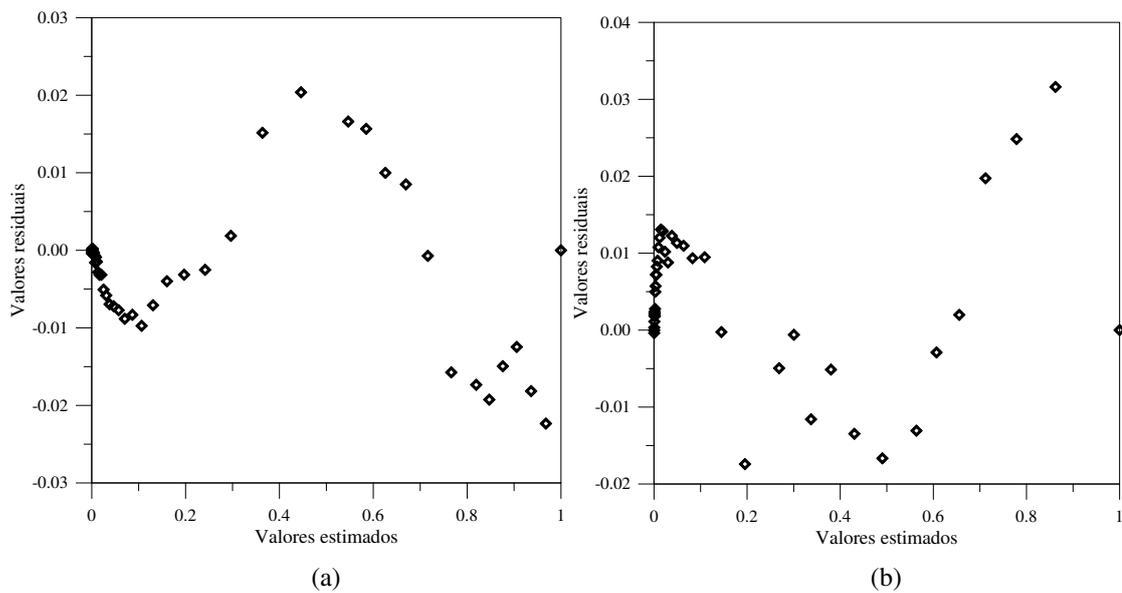


Figura 4.34 - Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 60°C e b) 70°C.

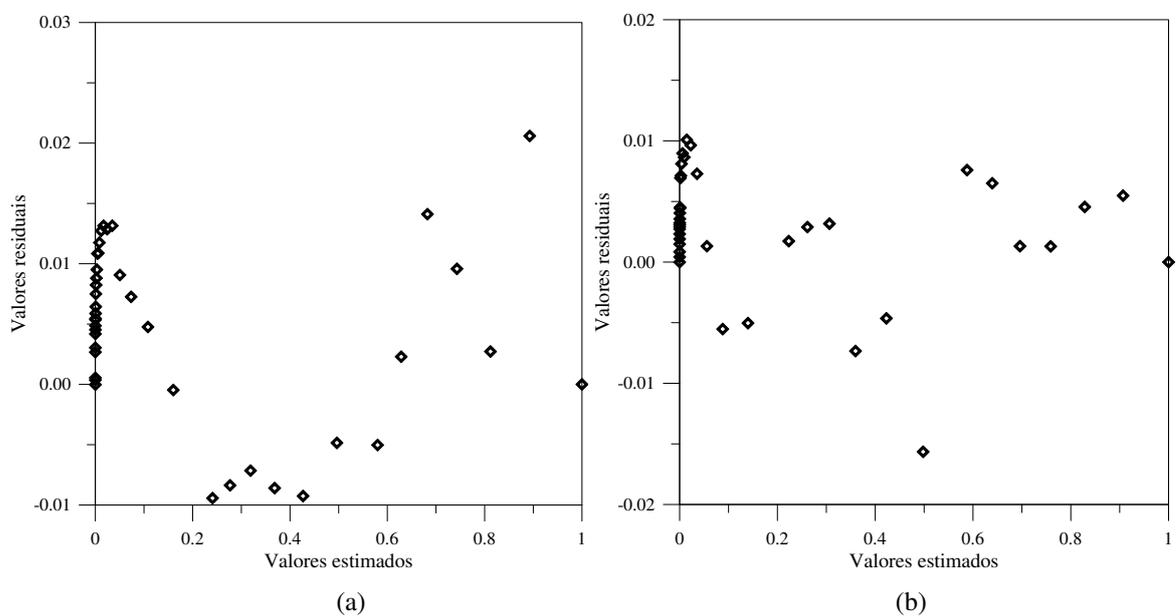


Figura 4.35 - Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para as temperaturas de ar de secagem a) 80°C e b) 90°C.

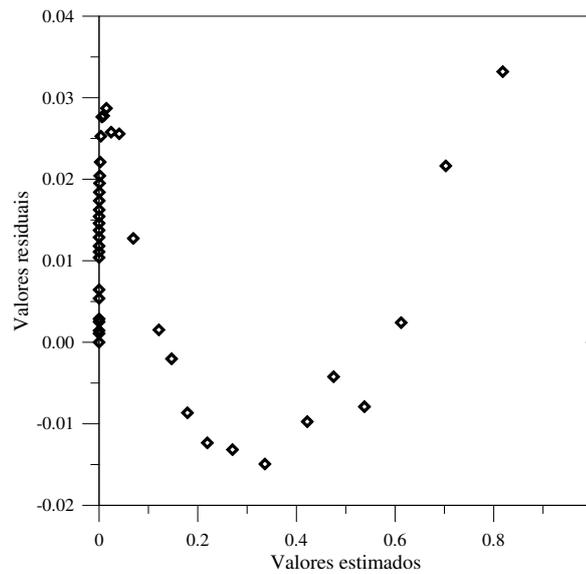


Figura 4.36 - Distribuição dos resíduos do modelo matemático de Page utilizado para obtenção da cinética de secagem dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 100°C.

Os resíduos foram obtidos por meio da diferença entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo de Page para o teor de umidade adimensional dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia. Observa-se, nas Figuras 4.33 e 4.36, que os resíduos tiveram boa distribuição aleatória em torno do zero, podendo ser verificada uma razoável maior quantidade de pontos próximos à unidade de equilíbrio.

4.2.2 Estudo da malha e passo de tempo

A Figura 4.37 ilustra a análise da qualidade da malha do fruto de mamona para os dados de teor de umidade em função do tempo de secagem, para a temperatura de ar de secagem de 60°C, para uma malha com 38.826 elementos, e outra, com 82.656 elementos. Ao analisar a Figura 4.37, constata-se que os resultados foram independentes da malha.

Já a Figura 4.38, ilustra o teste de refinamento do passo de tempo (Δt) usado nas simulações numéricas. Ao analisar a Figura 4.38, verifica-se que em relação aos teores de umidade, em base seca, para a temperatura de ar de secagem de 60°C e malha com 38.826 elementos, não houve alteração nos resultados quando o passo de tempo passou de 10 segundos para 20 segundos.

Com os resultados dessas análises, escolheu-se a malha com 38.826 elementos e passo de tempo de 10 segundos para a realização de todas as simulações numéricas dos frutos de mamona da cultivar BRS Energia.

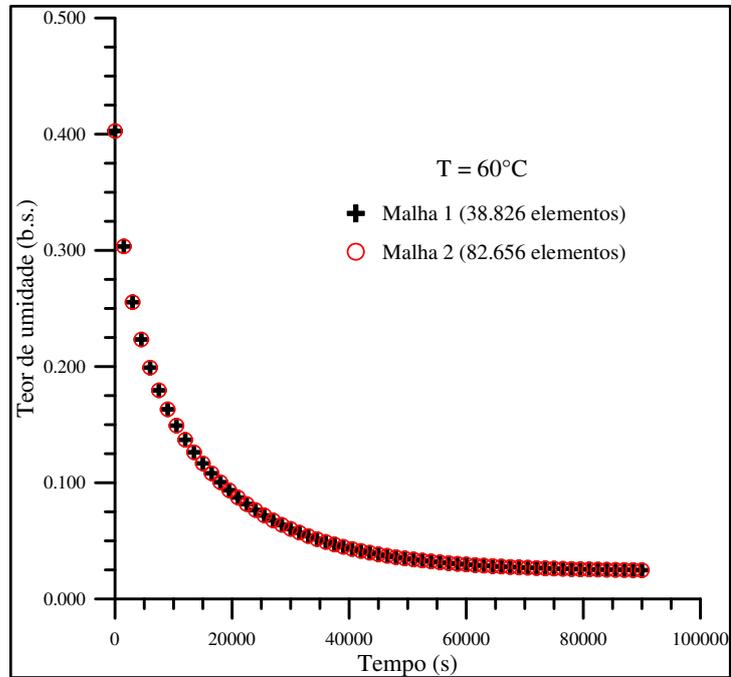


Figura 4.37 - Análise da qualidade da malha do fruto de mamona.

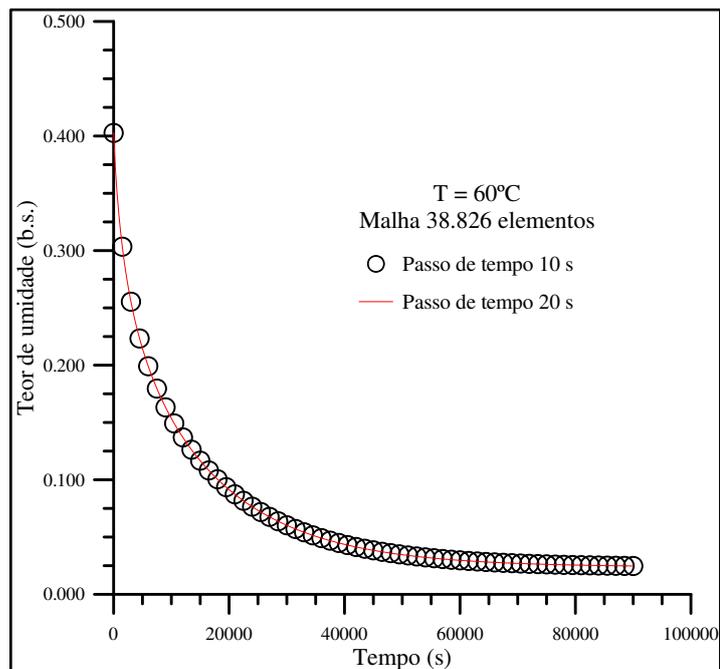


Figura 4.38 - Análise do passo de tempo usado na simulação numérica.

4.3 Modelo de difusão

4.3.1 Massa

As Figuras 4.39 a 4.45 ilustram as comparações entre as cinéticas de secagem teórica e experimental dos frutos de mamona da variedade BRS Energia para as temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente. É observado, a partir das Figuras 4.39 a 4.45, que as dinâmicas de secagem dos frutos de mamona considerados como esfera (analítico) são menos intensas do que as cinéticas de secagem experimentais para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. A partir da análise destas curvas, pode-se ver que as curvas de secagem numéricas (obtidas com o software ANSYS CFX[®]) se ajustam muito bem aos dados experimentais.

À medida que o tempo de secagem aumenta, o fruto de mamona perde umidade do centro para a superfície, até atingir o teor de umidade de equilíbrio em aproximadamente 1.500, 1.240, 1.140, 960, 900, 840 e 900 minutos, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente. Então, quando a alta temperatura foi utilizada mais rapidamente o fruto de mamona da variedade BRS Energia atingiu o equilíbrio higroscópico.

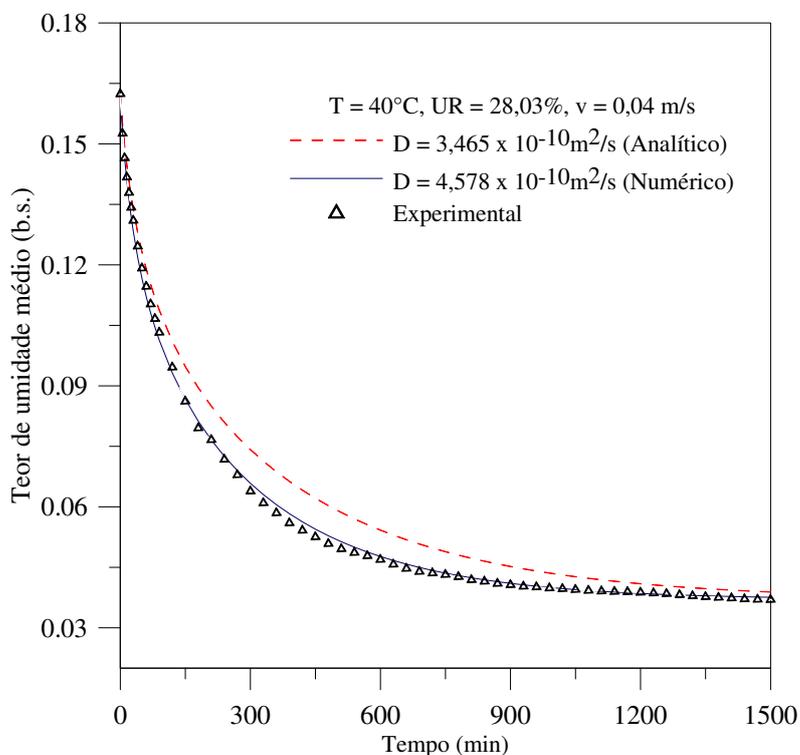


Figura 4.39 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 40°C.

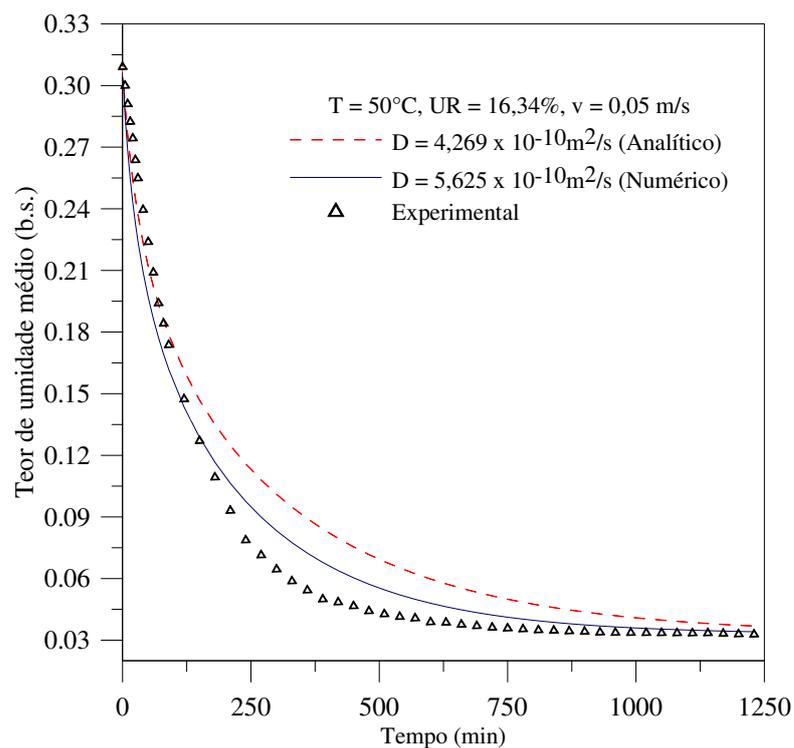


Figura 4.40 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 50°C.

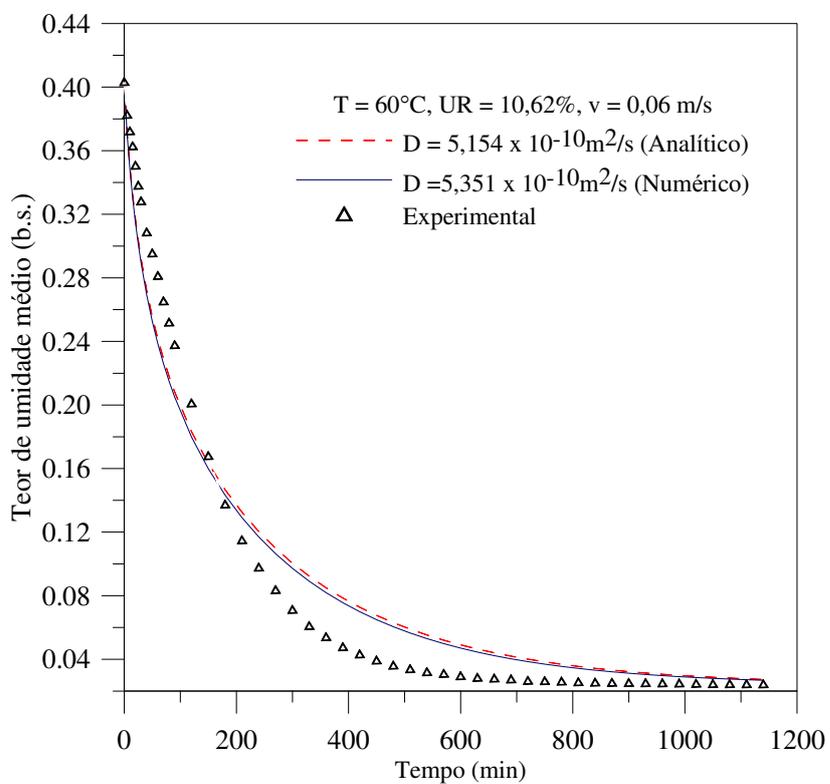


Figura 4.41 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 60°C.

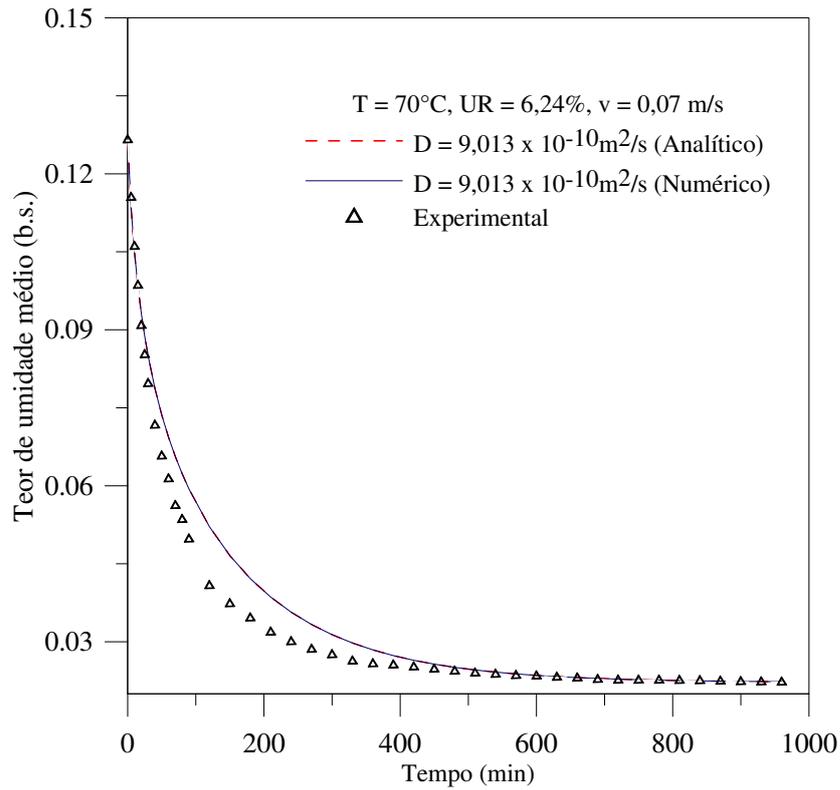


Figura 4.42 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 70°C.

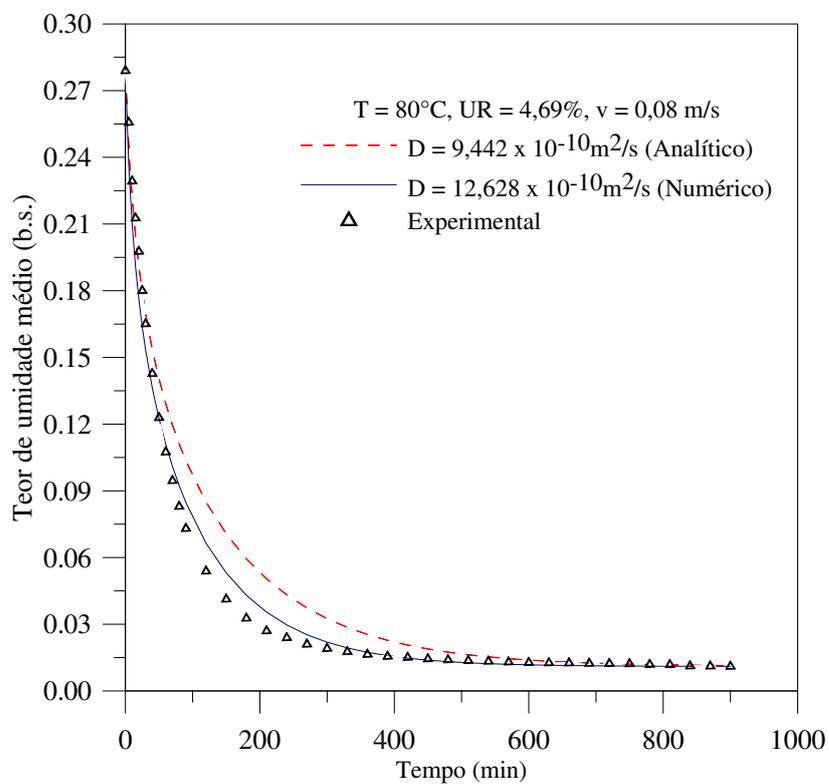


Figura 4.43 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 80°C.

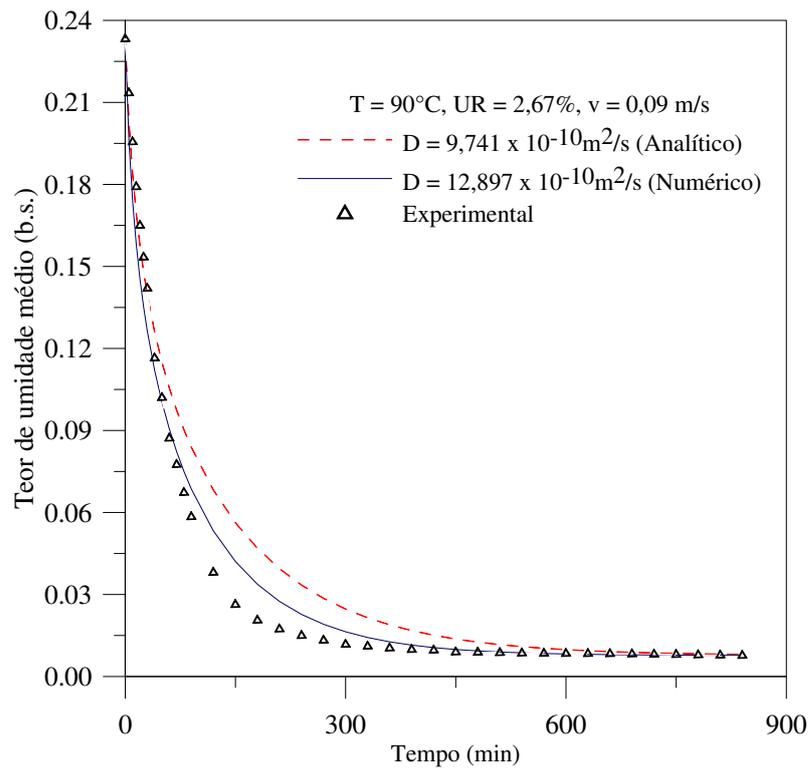


Figura 4.44 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 90°C .

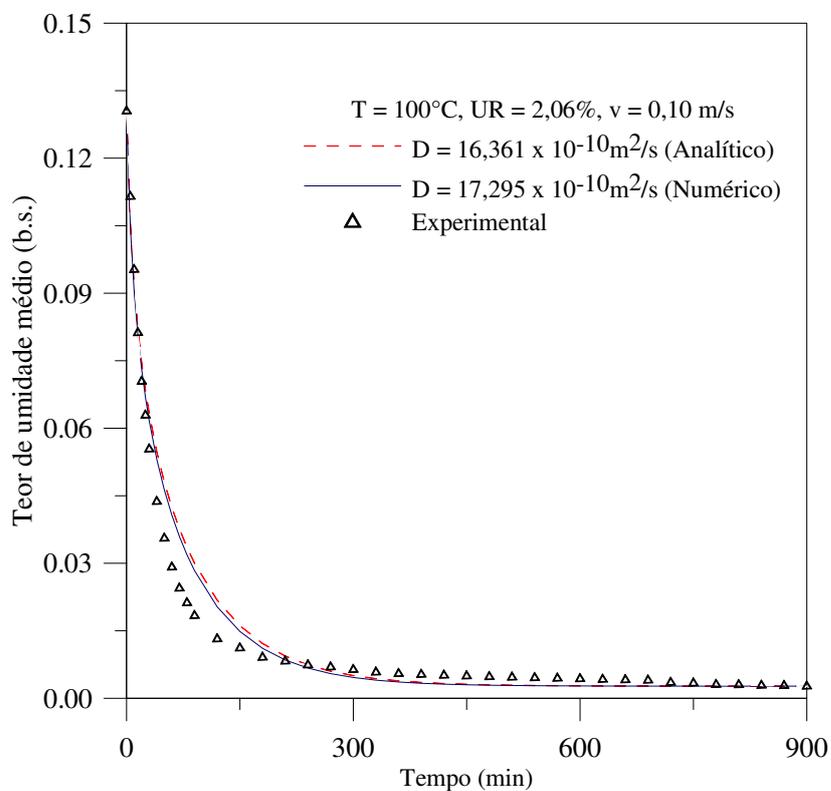


Figura 4.45 – Cinética de secagem experimental e predita dos frutos de mamona para a temperatura de ar de secagem de 100°C .

Os valores dos coeficientes de difusão de massa, mostrados nas Figuras 4.39 a 4.45 ($3,465 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $4,269 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $5,154 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $9,013 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $9,442 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $9,741 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $16,361 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), foram obtidos por meio do ajustamento dos dados experimentais da secagem dos frutos de mamona da variedade BRS Energia a solução analítica da equação de difusão de massa baseada na 2ª lei de Fick, considerando 200 termos da série e utilizando-se o software Prescribed para geometria do fruto de mamona como sendo uma esfera.

Já os valores ajustados para o coeficiente de difusão $D = 4,578 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 5,625 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 5,351 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 9,013 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 12,628 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 12,897 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ e $D = 17,295 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, mostrados nas Figuras 4.39 a 4.45, foram encontrados após várias simulações no software ANSYS CFX®, através da minimização da soma dos erros quadrados entre os dados numéricos e experimentais.

Os valores do coeficiente de difusão de massa obtidos analiticamente considera o fruto de mamona como sendo de forma geométrica esférica. Já o ANSYS CFX®, utiliza a geometria real do fruto de mamona da variedade BRS Energia, com isso obtém os valores reais do coeficiente de difusão de massa utilizando o método dos volumes finitos baseados em elementos finitos para coordenadas generalizadas. A Tabela 4.8 apresenta os coeficientes de difusão analíticos e numéricos, que foram obtidos através do ANSYS CFX®, com as suas respectivas somas dos erros quadrados.

Tabela 4.8 – Coeficientes de difusão analíticos e numéricos (ANSYS CFX®) com as suas respectivas somas dos erros quadrados.

T (°C)	Coeficiente de difusão analítico (m ² /s)	Soma dos erros quadrados	Coeficiente de difusão ANSYS CFX® (m ² /s)	Soma dos erros quadrados
40	$3,465 \times 10^{-10}$	0,00208	$4,578 \times 10^{-10}$	0,00010
50	$4,269 \times 10^{-10}$	0,01934	$5,625 \times 10^{-10}$	0,01096
60	$5,154 \times 10^{-10}$	0,02510	$5,351 \times 10^{-10}$	0,02484
70	$9,013 \times 10^{-10}$	0,00090	$9,013 \times 10^{-10}$	0,00090
80	$9,442 \times 10^{-10}$	0,00780	$12,628 \times 10^{-10}$	0,00304
90	$9,741 \times 10^{-10}$	0,00665	$12,897 \times 10^{-10}$	0,00327
100	$16,361 \times 10^{-10}$	0,00122	$17,295 \times 10^{-10}$	0,00093

A partir das Figuras 4.39 a 4.45, das comparações entre as cinéticas de secagem teórica e experimental dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, observa-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o incremento da temperatura do ar de secagem. Certamente isso se deve ao fato que com o aumento da temperatura do ar de secagem, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares do grão, de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto.

Outro fator que pode também ser atribuído a essa variação do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração molecular das moléculas de água, o que pode contribuir para uma difusão mais rápida. O coeficiente de difusão efetivo é dependente da temperatura do ar de secagem, além da variedade e composição dos materiais, dentre outros (RIZVI, 1986). De acordo com Madamba *et al.* (1996), o calor de sorção, que é uma medida da mobilidade da água dentro do produto, é outro fator que afeta a difusividade efetiva de produtos agrícolas.

Durante o processo de secagem e simulação dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, os coeficientes de difusão apresentaram magnitudes entre $3,465 \times 10^{-10}$ e $16,361 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, obtidos considerando os frutos como esfera (analítico), e entre $4,578 \times 10^{-10}$ e $17,295 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para o numérico obtidos via ANSYS CFX[®], para a faixa de temperatura de 40 a 100°C. A magnitude dos valores do coeficiente de difusão calculados para os frutos de mamona da cultivar BRS Energia estão coerentes com alguns produtos agrícolas relatados na literatura.

Goneli (2008), considerando os frutos de mamona como de forma geométrica esférica e utilizando a equação de difusão de massa baseada na segunda lei de Fick, obteve para o coeficiente de difusão valores entre $0,5117 \times 10^{-10}$ e $1,5643 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura de 25 a 55°C. Já Resende *et al* (2011), avaliando a secagem de sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), obtiveram valores de coeficiente de difusão variando entre $3,93 \times 10^{-10}$ e $9,19 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para o intervalo de temperatura de 30 a 70°C, respectivamente.

Faria *et al* (2012), estudando a secagem de sementes de crambe, também constataram que o coeficiente de difusão de massa aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $0,180 \times 10^{-10}$ e $3,917 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para um raio equivalente de 1,5 mm e temperaturas entre 30 a 70°C.

Na literatura, é comum calcular o coeficiente de difusão considerando o sólido como de forma geométrica esférica (FARIA *et al.*, 2012; COSTA *et al.*, 2011; GONELI, 2008; GONELI *et al.*, 2007). No entanto, neste trabalho, os resultados apresentados tem mostrado que este método não é conveniente. Os erros mínimos calculados na estimativa dos coeficientes de difusão, utilizando os dois métodos (analítico e numérico) foram 32,12; 31,76; 3,82; 0; 33,74; 32,39 e 5,71%, respectivamente, para os sete casos estudados.

As Figuras 4.46 e 4.47 ilustram, respectivamente, as comparações das cinéticas de secagem numérica (teor de umidade médio em base seca) e da razão de umidade (adimensional) dos frutos de mamona da variedade BRS Energia para as sete temperaturas de ar de secagem (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C).

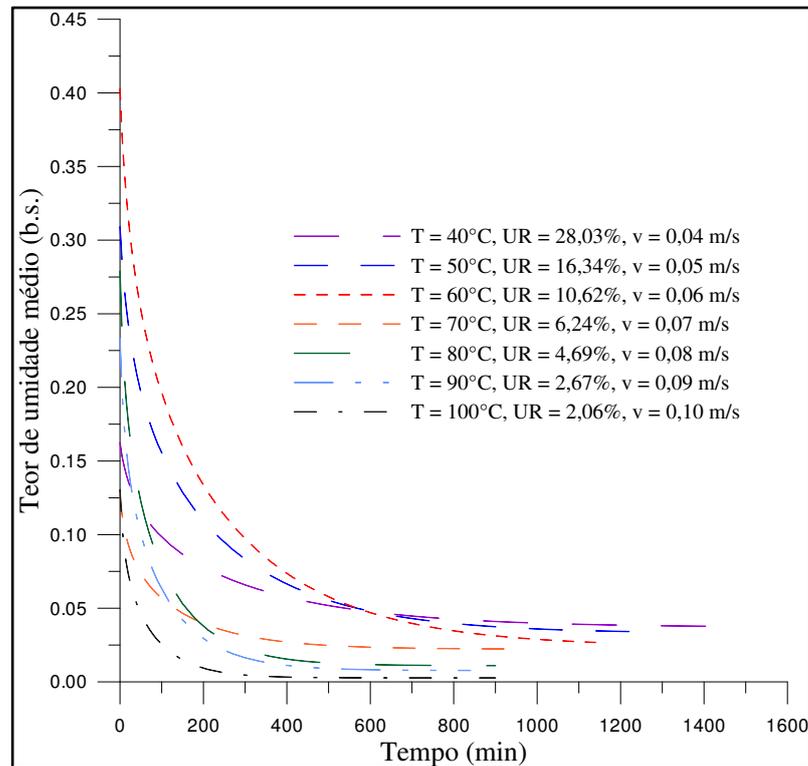


Figura 4.46 – Comparação entre as cinéticas de secagem numérica (teor de umidade, b. s.) dos frutos de mamona para diferentes temperaturas de ar de secagem.

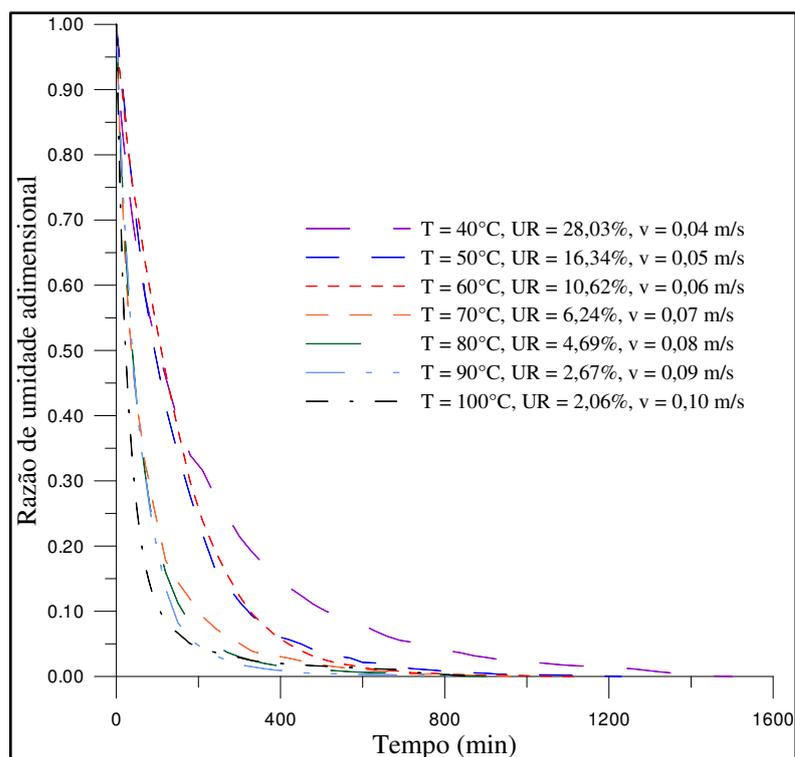


Figura 4.47 – Comparação entre as cinéticas de secagem numérica (razão de umidade, adimensional) dos frutos de mamona para sete temperaturas de ar de secagem.

Ao analisar as Figuras 4.46 e 4.47, das comparações das cinéticas de secagem numéricas obtidas através do Ansys CFX[®], observa-se que, no início do processo, há uma grande perda de umidade dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, principalmente, para as temperaturas de ar de secagem mais elevadas. É importante também salientar a importância da umidade relativa do ar de secagem no processo, pois quanto menor for seu valor, maior será o potencial de secagem, desde que fixemos a temperatura do ar.

Em termos de comparação, a Figura 4.47 mostra com mais fidedignidade a evolução da umidade nos diferentes processos de secagem, pois como os teores de umidade dos frutos de mamona foram diferentes no início de cada processo de secagem, a Figura 4.46 apresenta dificuldades em termos comparacionais.

As Figuras 4.48 a 4.54 ilustram a distribuição do teor umidade em diferentes planos yz no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia em três tempos de processo para as temperaturas do ar secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente.

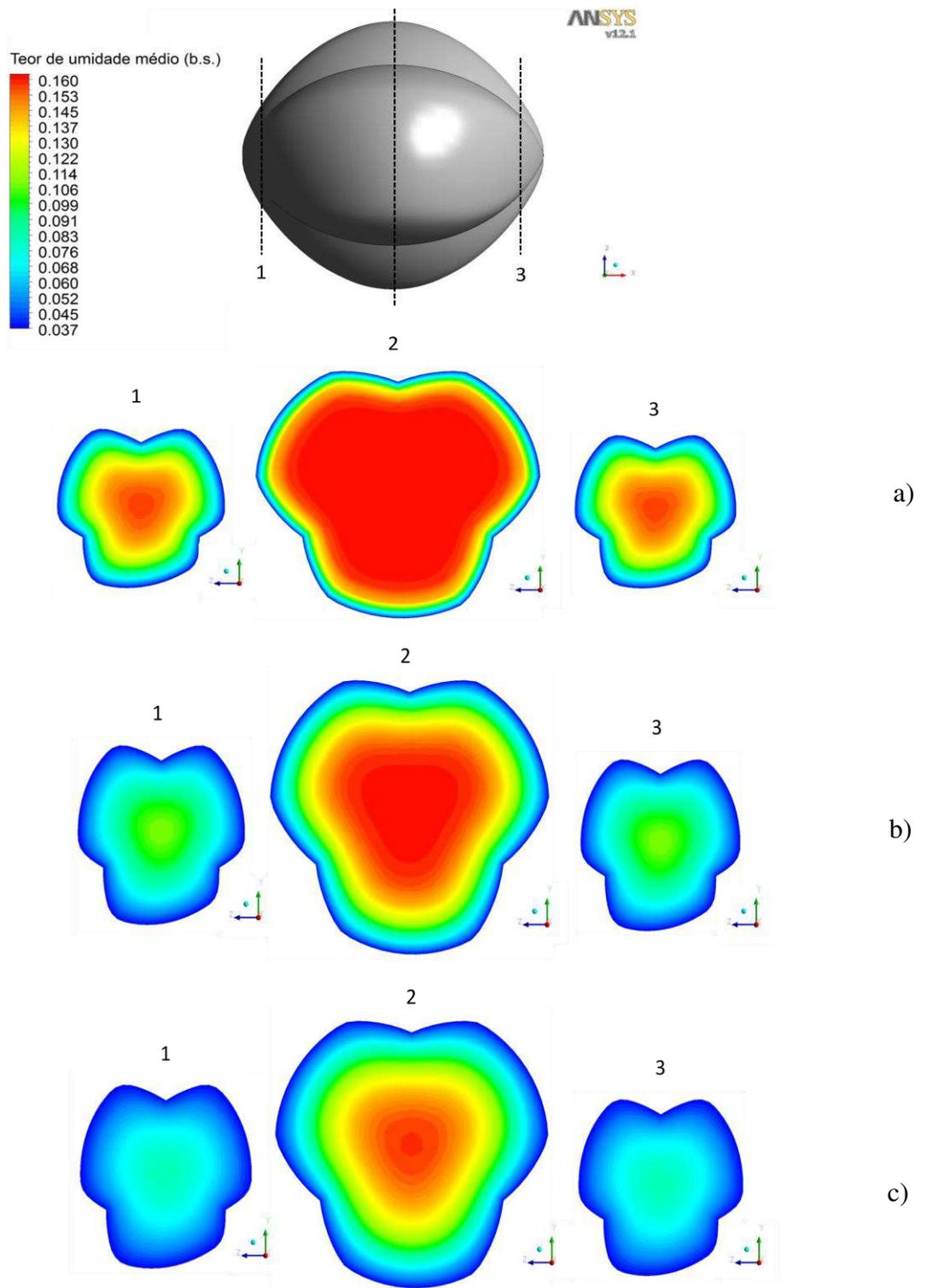


Figura 4.48 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 40°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

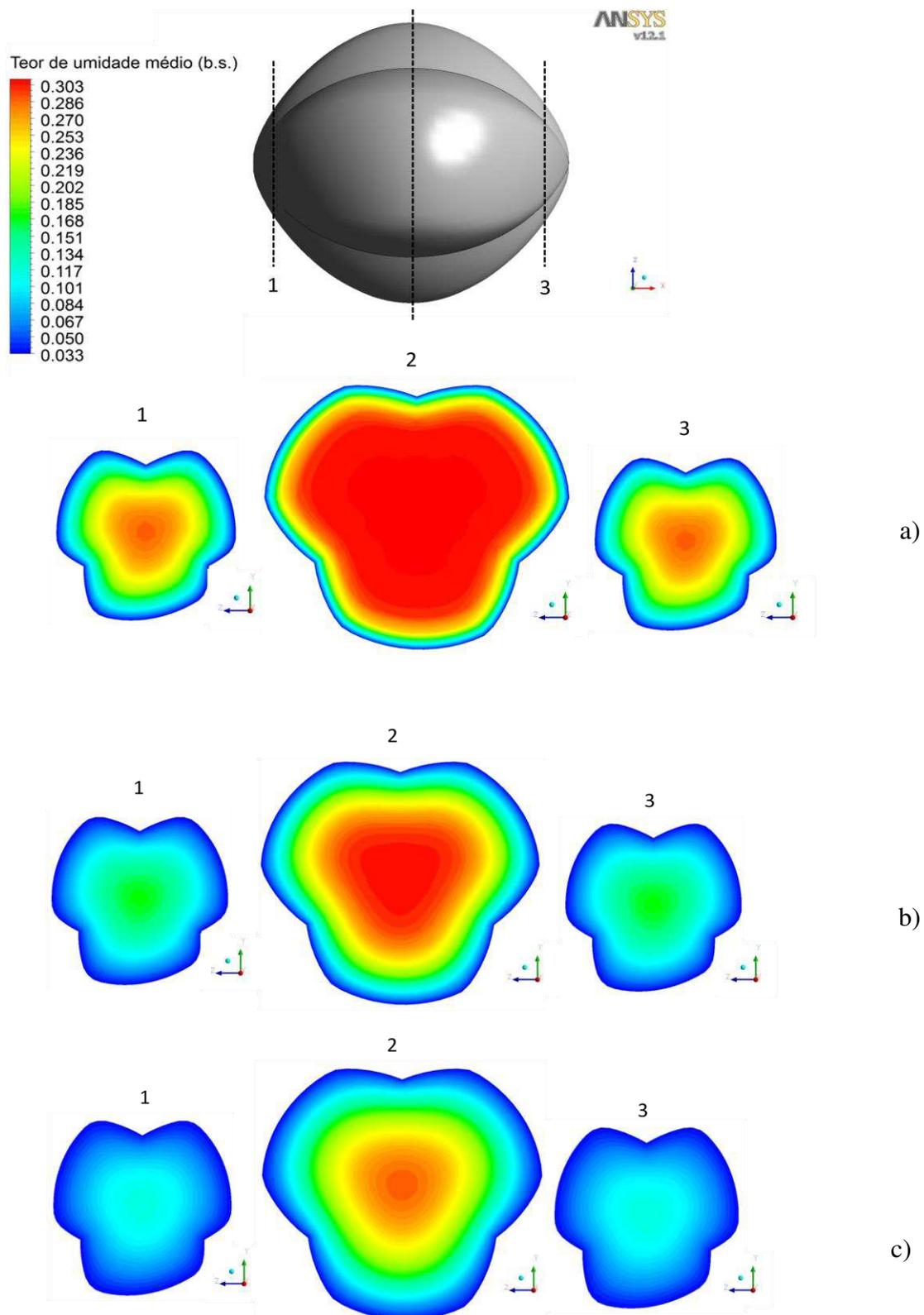


Figura 4.49 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 50°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

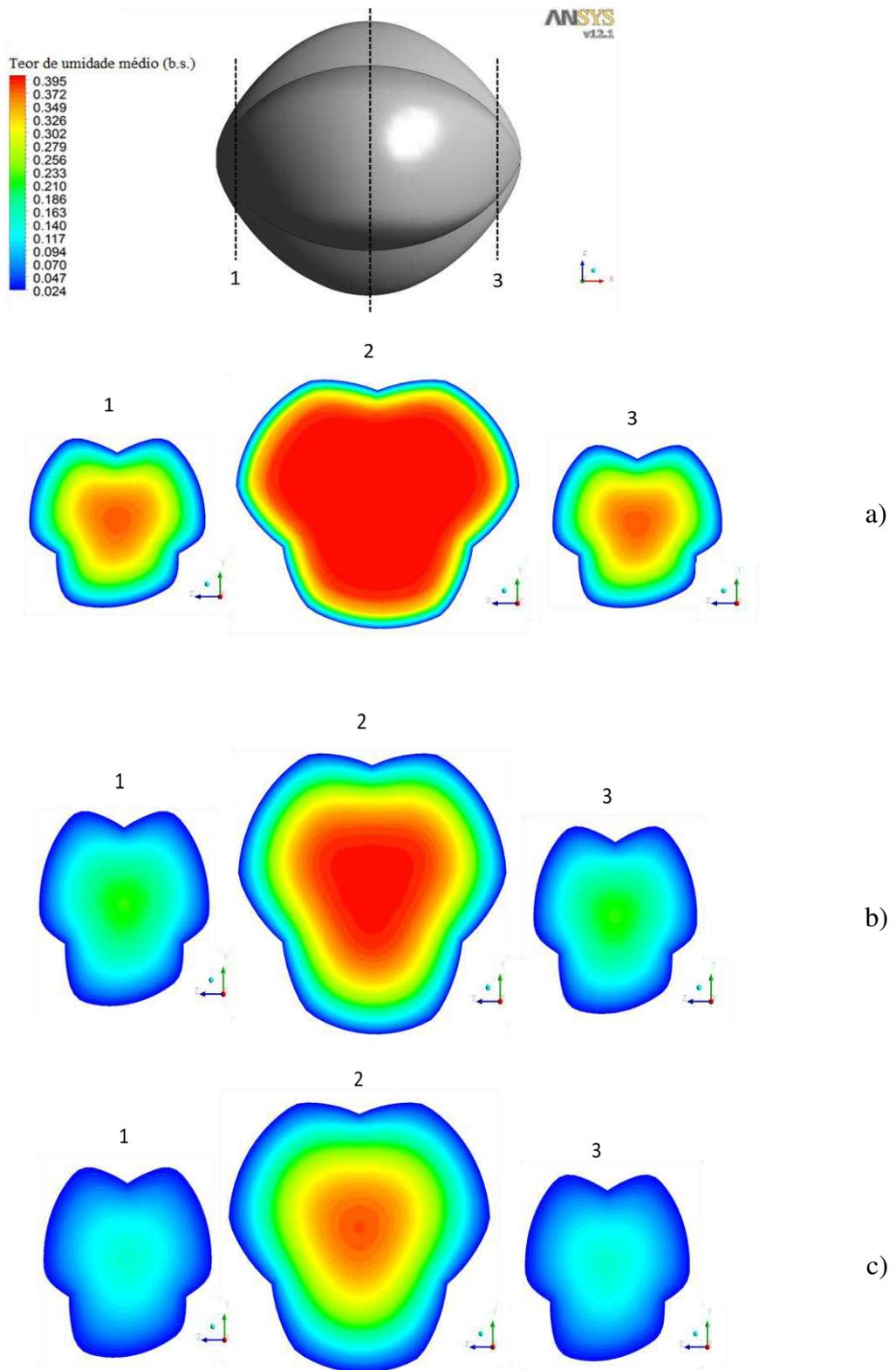


Figura 4.50 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 60°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

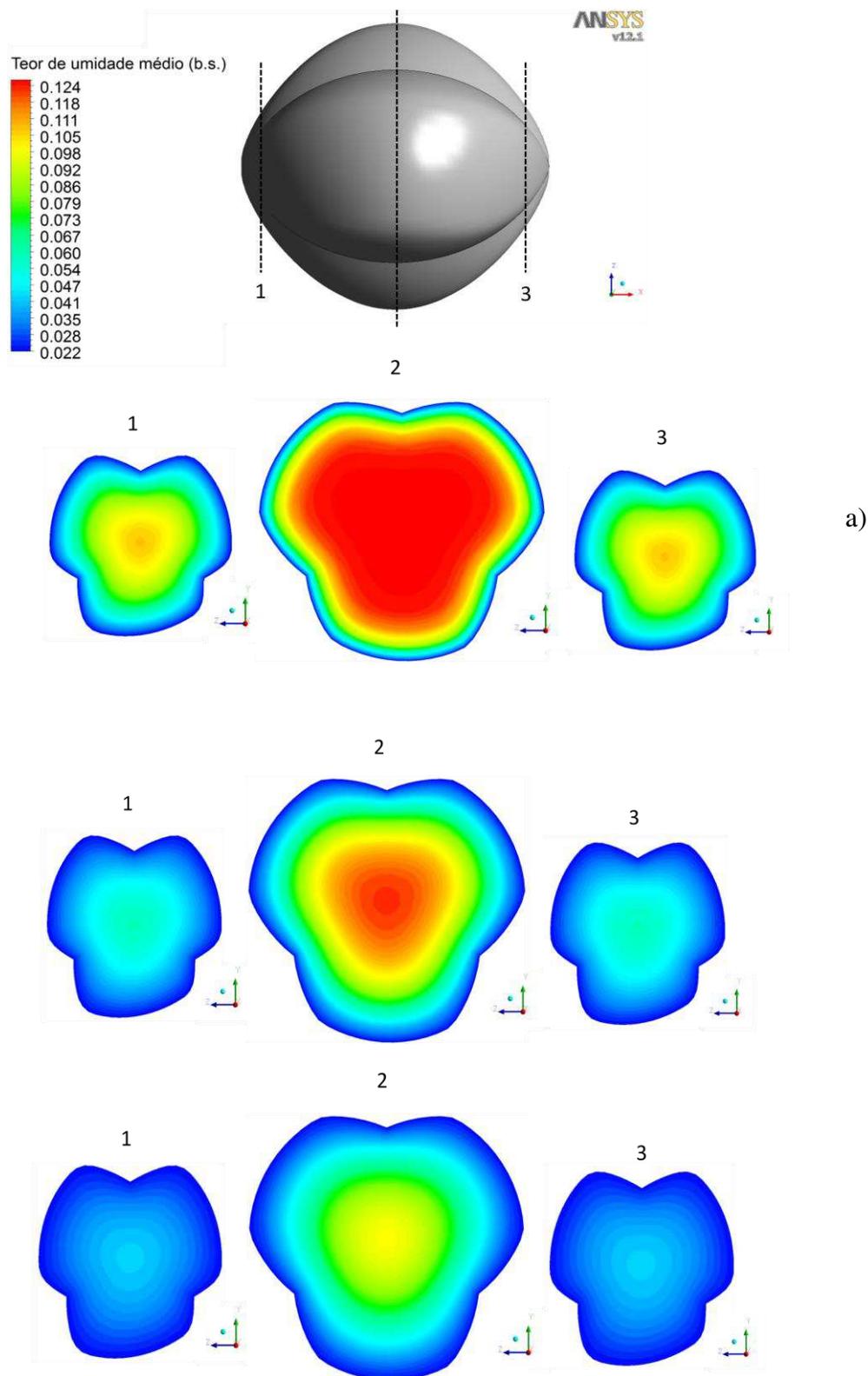


Figura 4.51 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 70°C. a) t = 20 min, b) t = 80 min e c) t = 150 min.

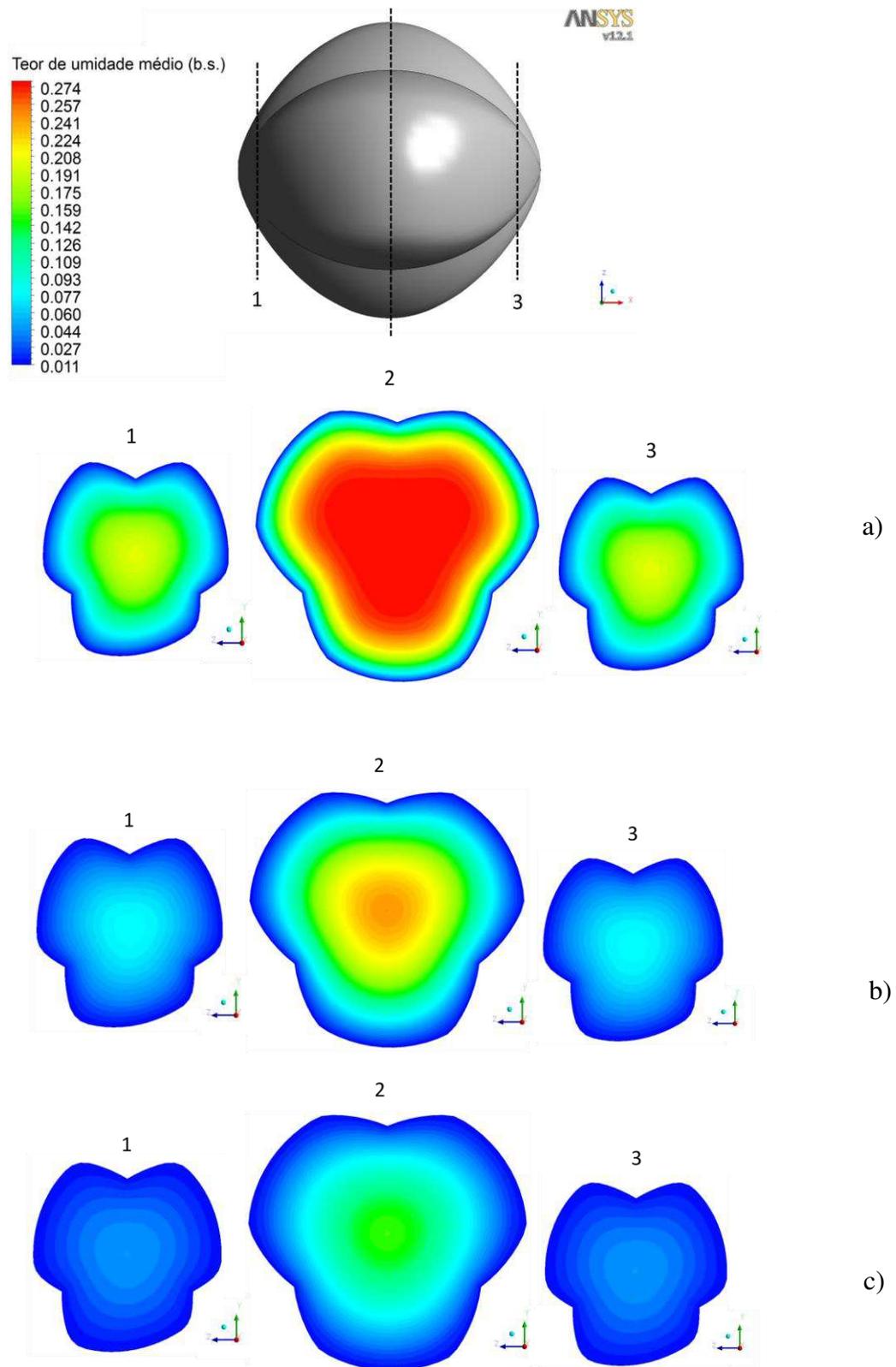


Figura 4.52 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 80°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

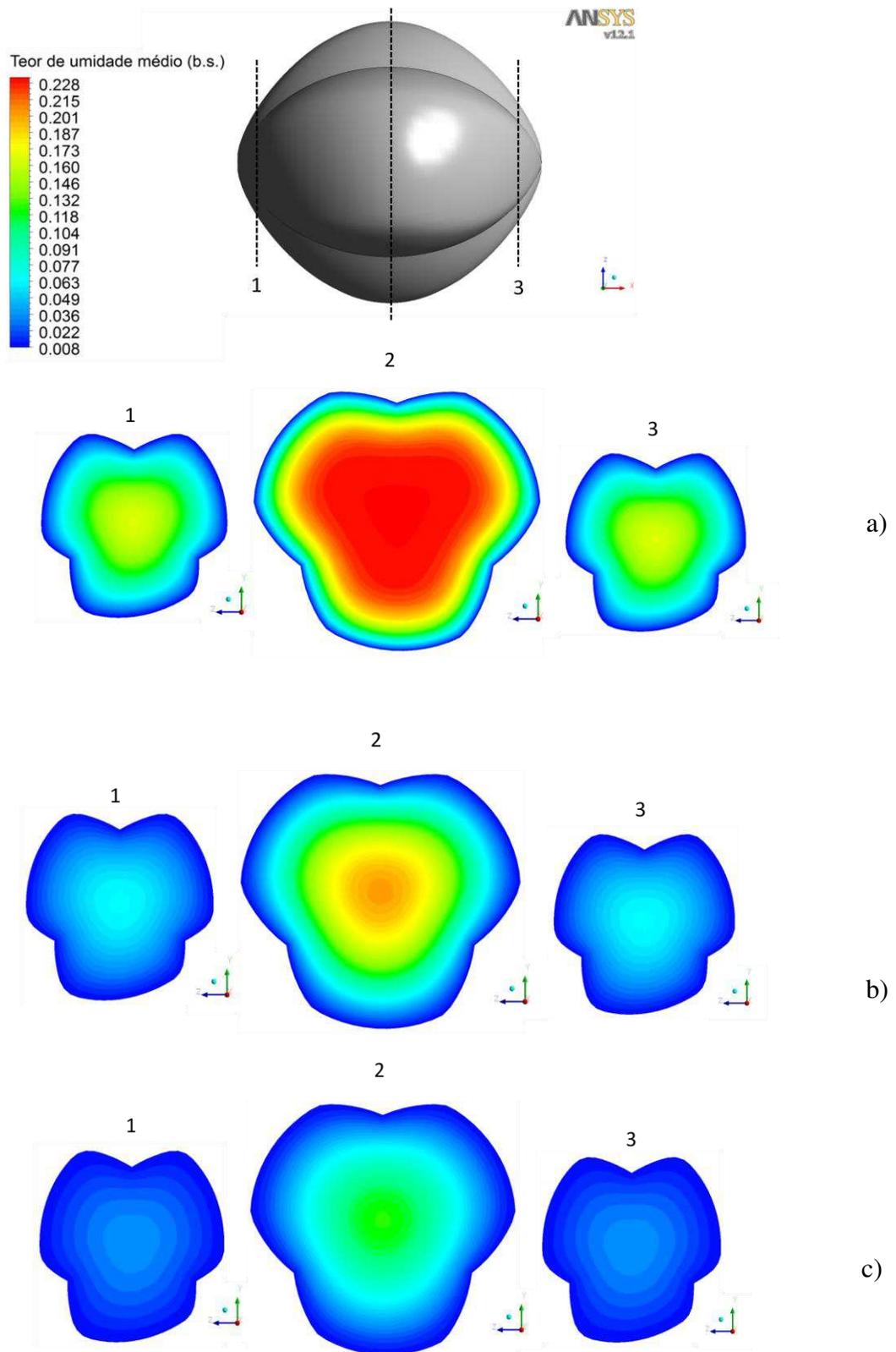


Figura 4.53 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 90°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

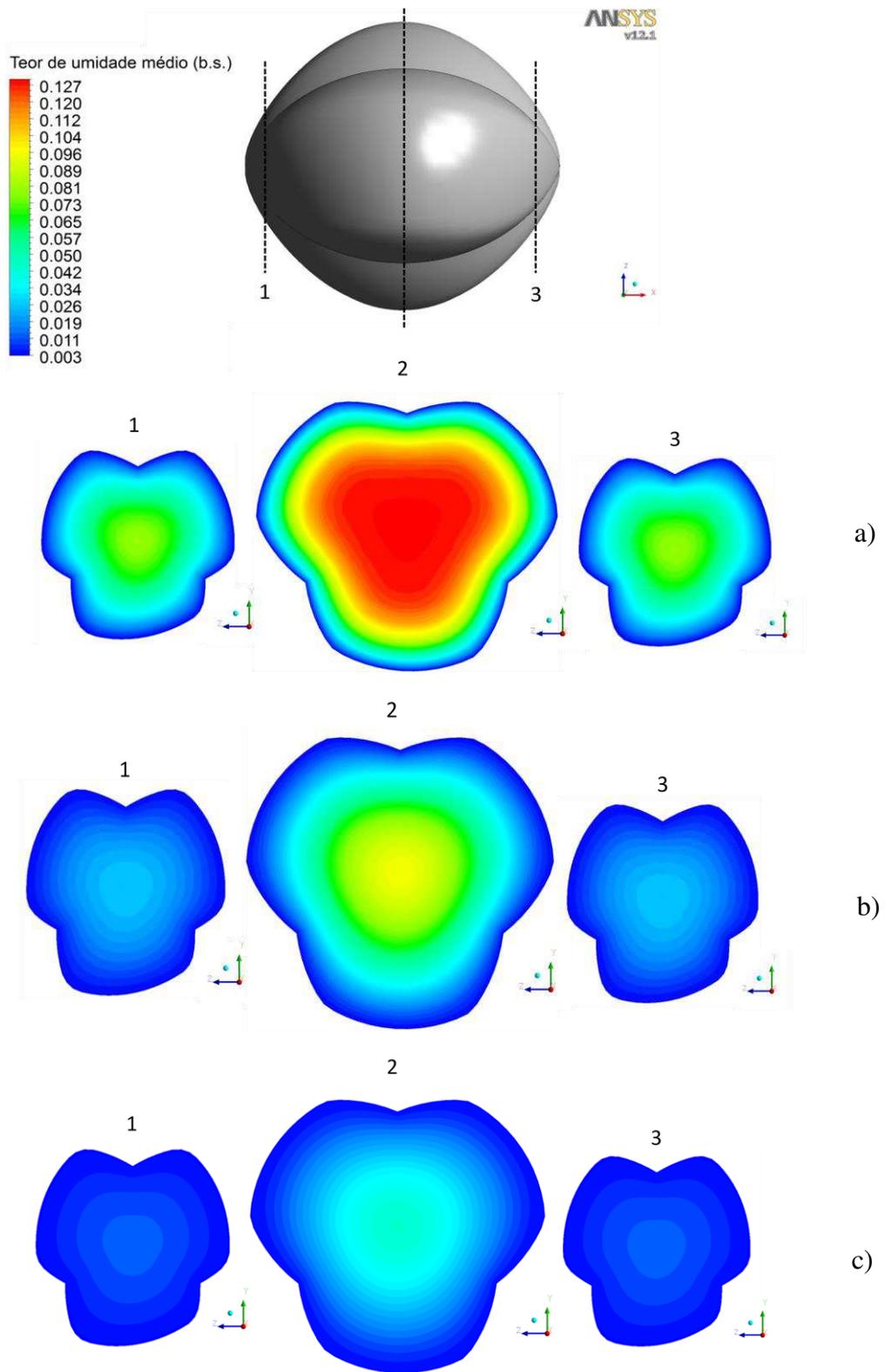


Figura 4.54 - Campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 100°C. a) $t = 20$ min, b) $t = 80$ min e c) $t = 150$ min.

A partir das figuras do campo de teor de umidade no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia (Figuras 4.48 a 4.54), pode-se observar que o teor de umidade dos frutos de mamona decresce gradualmente do centro para a superfície. Também pode ser observado nestas figuras que no início da secagem ($t = 20$ min), os frutos de mamona estão com teores de umidade médios ainda relativamente alto, cerca de 11,97%, 19,53%, 23,92%, 8,52%, 14,95%, 12,70% e 6,80% (b.u.), respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C.

Já em $t = 80$ min, os teores de umidade médios foram de aproximadamente 9,46%, 14,46%, 17,68%, 5,86%, 8,45%, 6,98% e 3,09% (b.u.), enquanto que para $t = 150$ min, os teor de umidade médios foram de cerca de 7,98, 11,40%, 13,78%, 4,45%, 5,03%, 4,04% e 1,46% (b.u.), respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Os teores de umidade comercial de 8% (b.u.) foram encontrados em $t = 150$ min, $t = 270$ min, $t = 330$ min, $t = 25$ min, $t = 90$ min, $t = 60$ min e $t = 10$ min, respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C.

Por conta de ter-se trabalhado com teores diferentes de umidade inicial para os sete experimentos de secagem dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, não se observou na íntegra que com a elevação da temperatura do ar de secagem diminuir-se-ia o tempo para se atingir o teor de umidade comercial de aproximadamente 8% (b.u.).

4.3.2 Calor

A Figura 4.55 ilustra o valor da temperatura média nos frutos de mamona da variedade BRS Energia versus tempo para sete (40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C) temperaturas do ar de secagem. É observado que a temperatura nos frutos aumenta rapidamente em um curto período de tempo até atingir o equilíbrio térmico no tempo decorrido de 10 minutos, para todas as condições de secagem.

A partir da análise da Figura 4.55, constata-se que os frutos de mamona da variedade BRS Energia atingem o equilíbrio térmico mais rapidamente para a temperatura do ar de secagem mais próximo da temperatura inicial da mamona, que no nosso caso foi a temperatura do ar de secagem de 40°C.

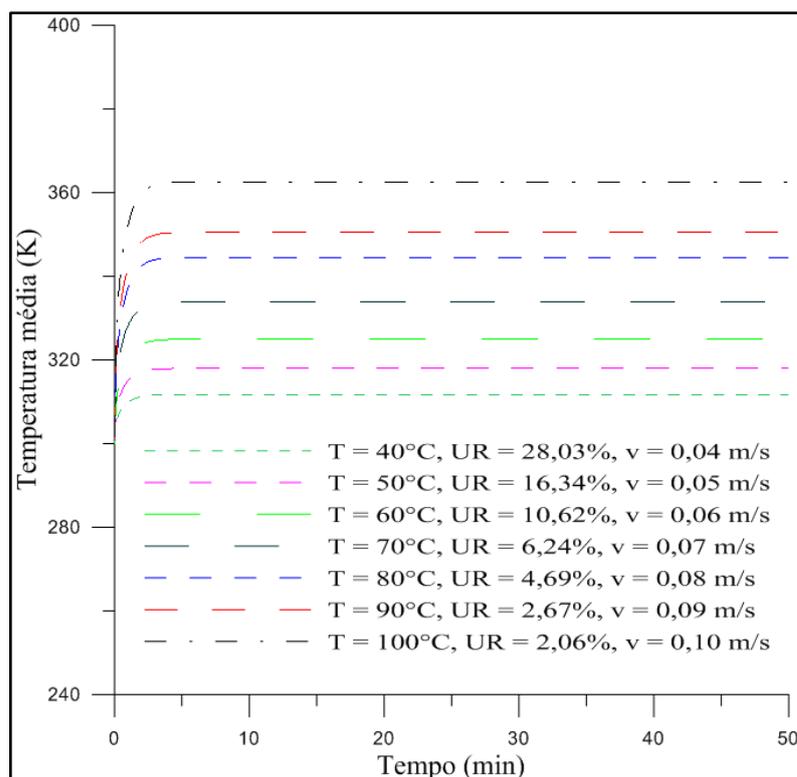


Figura 4.55 - Temperatura média dos frutos de mamona versus tempo para sete temperaturas de ar de secagem.

As Figuras 4.56 a 4.62 ilustram a distribuição de temperatura no interior do fruto de mamona, em sete ocasiões, durante o processo de secagem. Observa-se nestas figuras que as regiões de extremidades (ponta) da superfície do fruto de mamona da variedade BRS Energia têm aquecido mais rapidamente do que o centro, gerando tensões térmicas elevadas que podem provocar fendas e fissuras, reduzindo assim a qualidade final do produto.

Em cada temperatura de ar de secagem, do fruto de mamona da variedade BRS Energia (Figuras 4.56 a 4.62), foram selecionados os tempos de 60, 100 e 140 s para a ilustração da distribuição de temperatura no interior do fruto de mamona, durante o processo de secagem. Nas Figuras 4.56 a 4.62, para cada tempo de processo, a figura é constituída de três planos yz, sendo um do centro do fruto e os outros dois equidistantes do centro próximos das pontas.

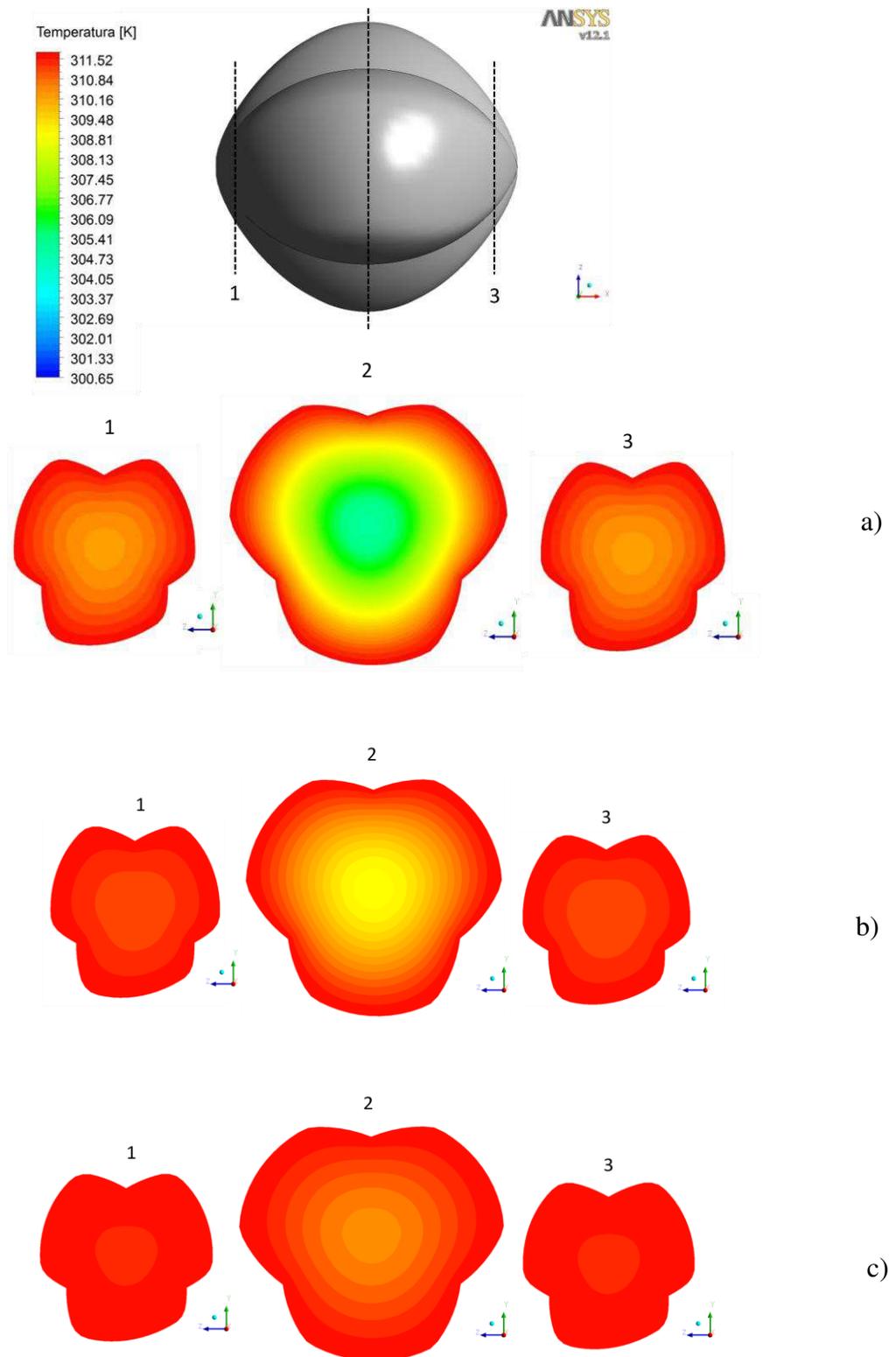


Figura 4.56 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 40°C (313,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

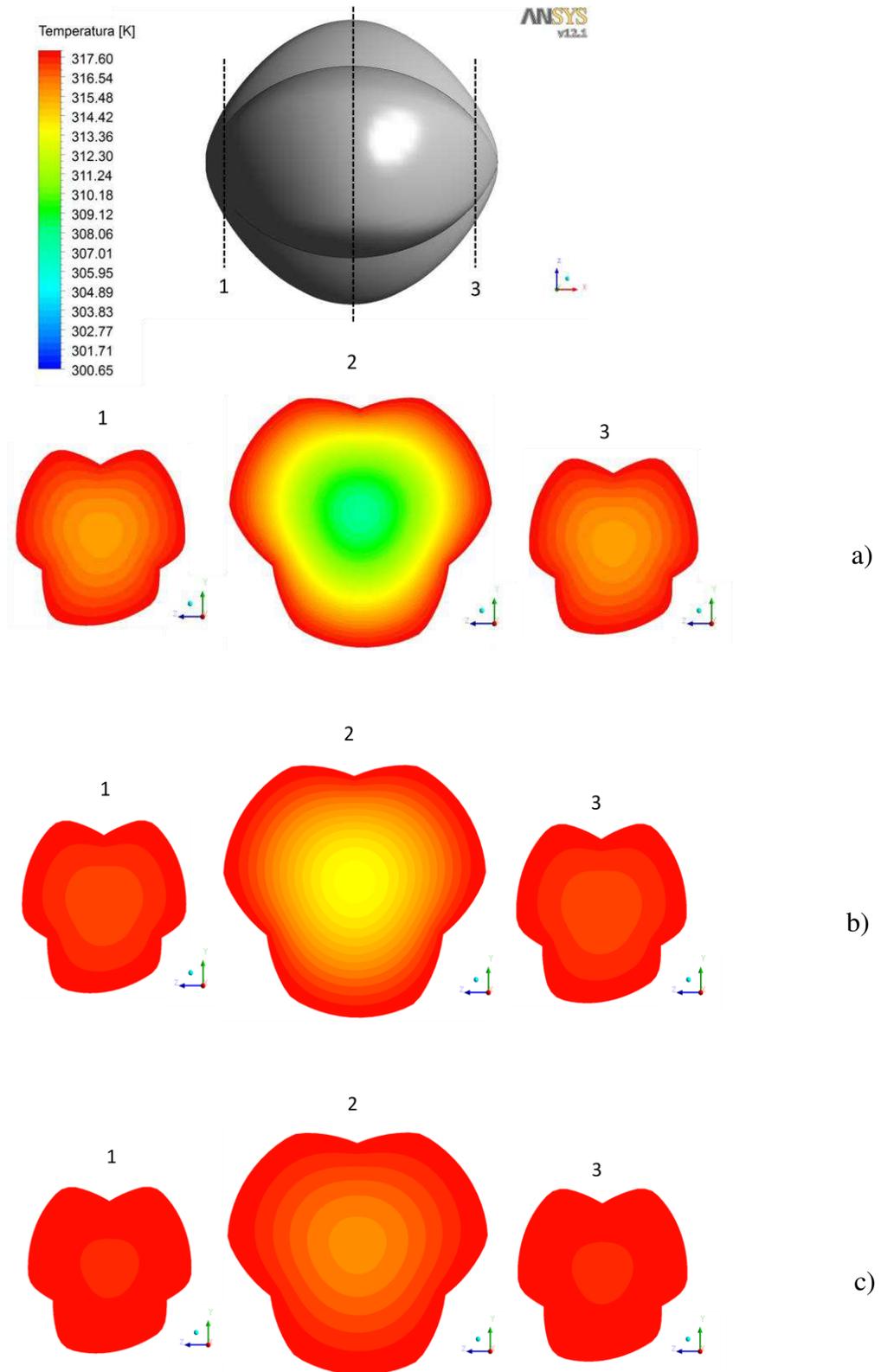


Figura 4.57 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 50°C (323,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

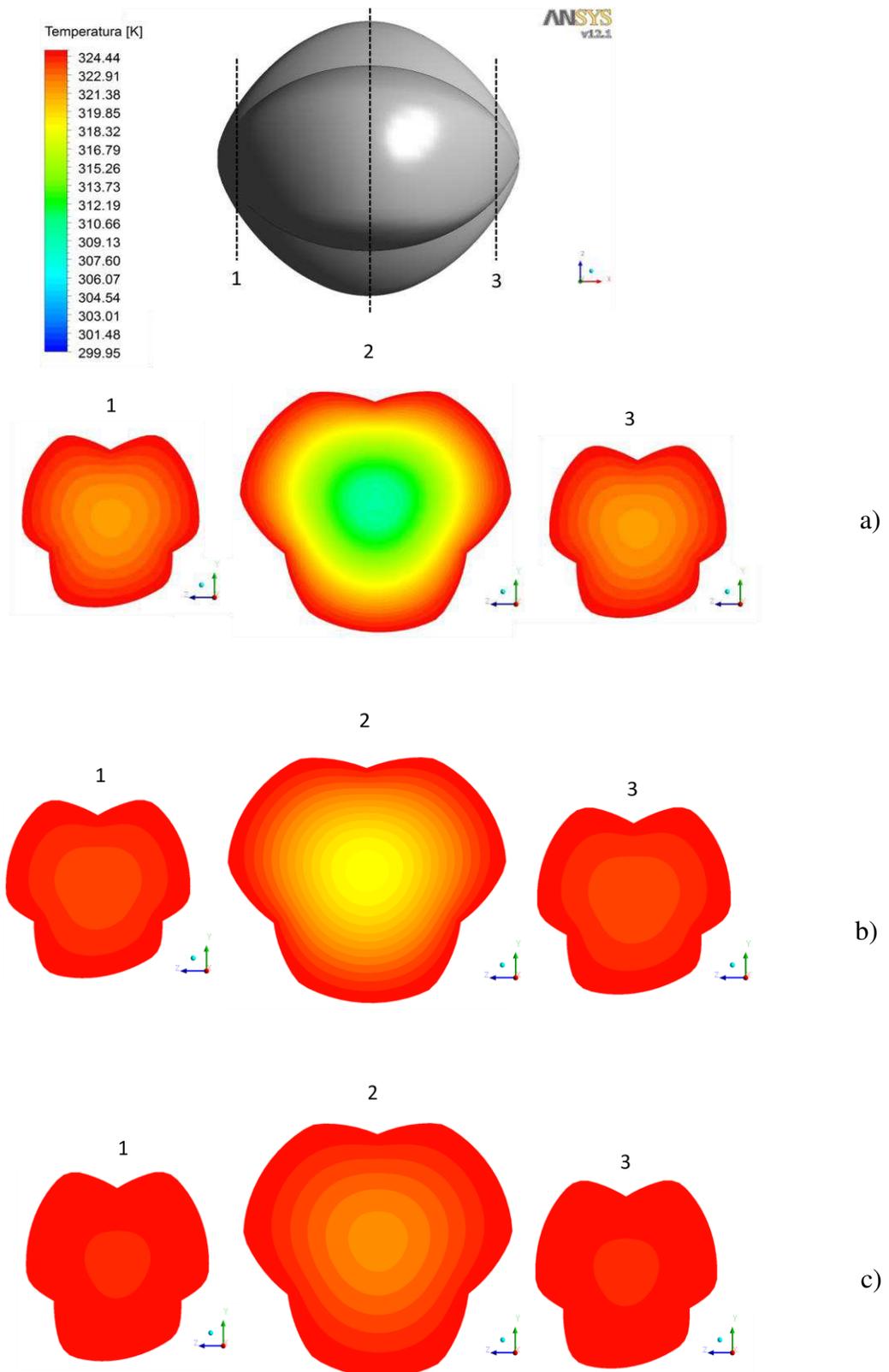


Figura 4.58 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 60°C (333,15 K). a) t = 60 s, b) t = 100 s e c) t = 140 s.

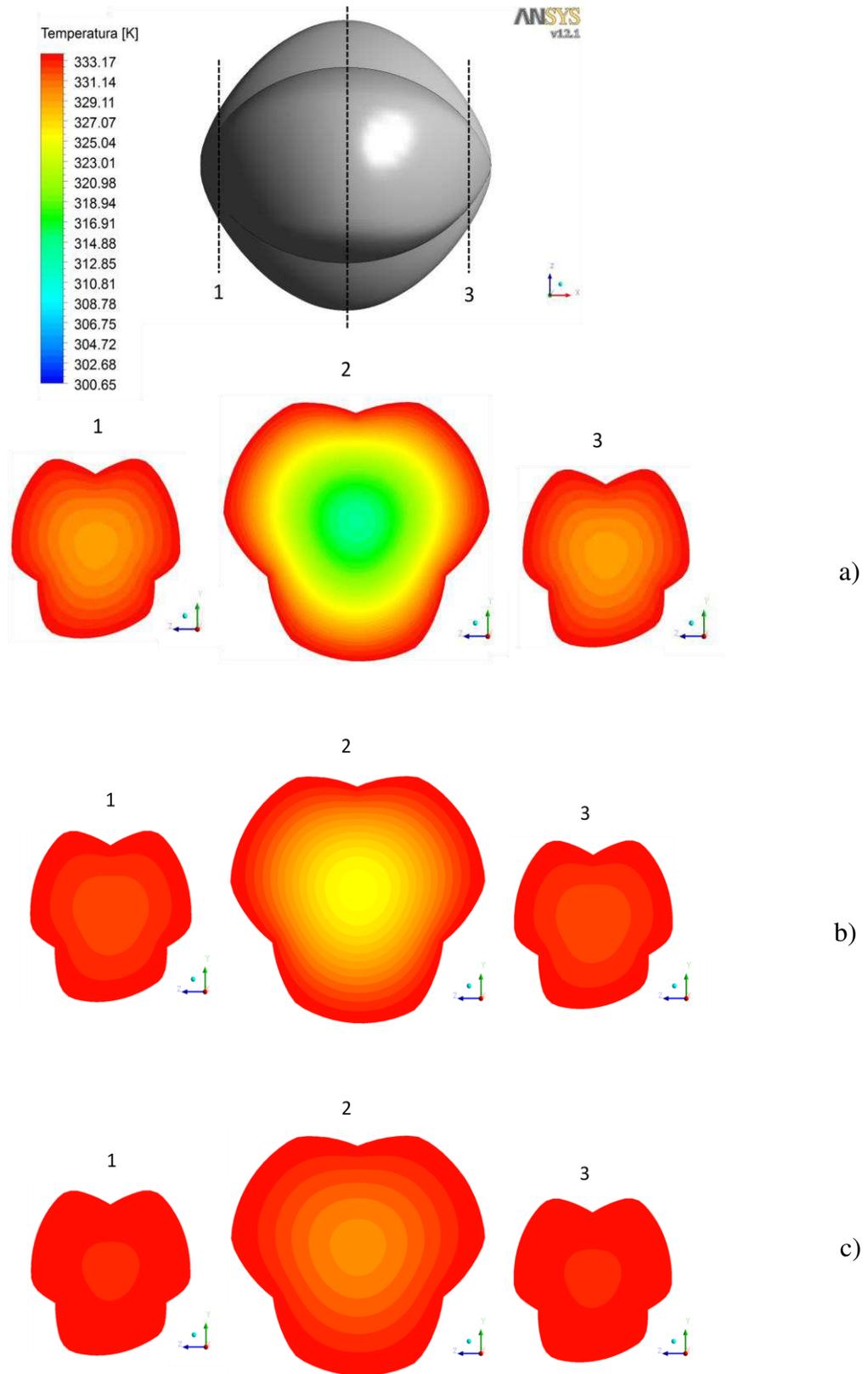


Figura 4.59 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 70°C (343,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

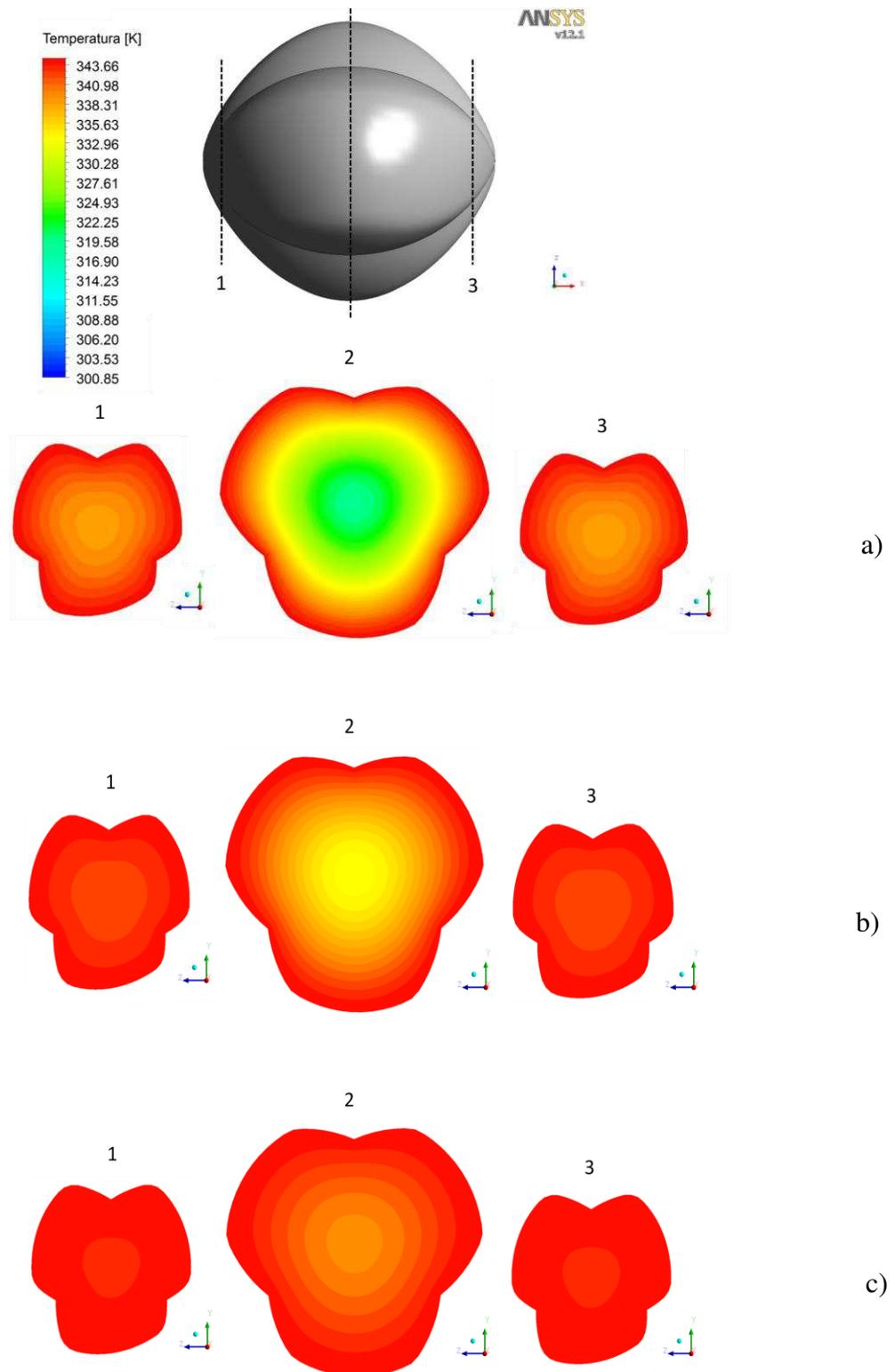


Figura 4.60 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 80°C (353,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

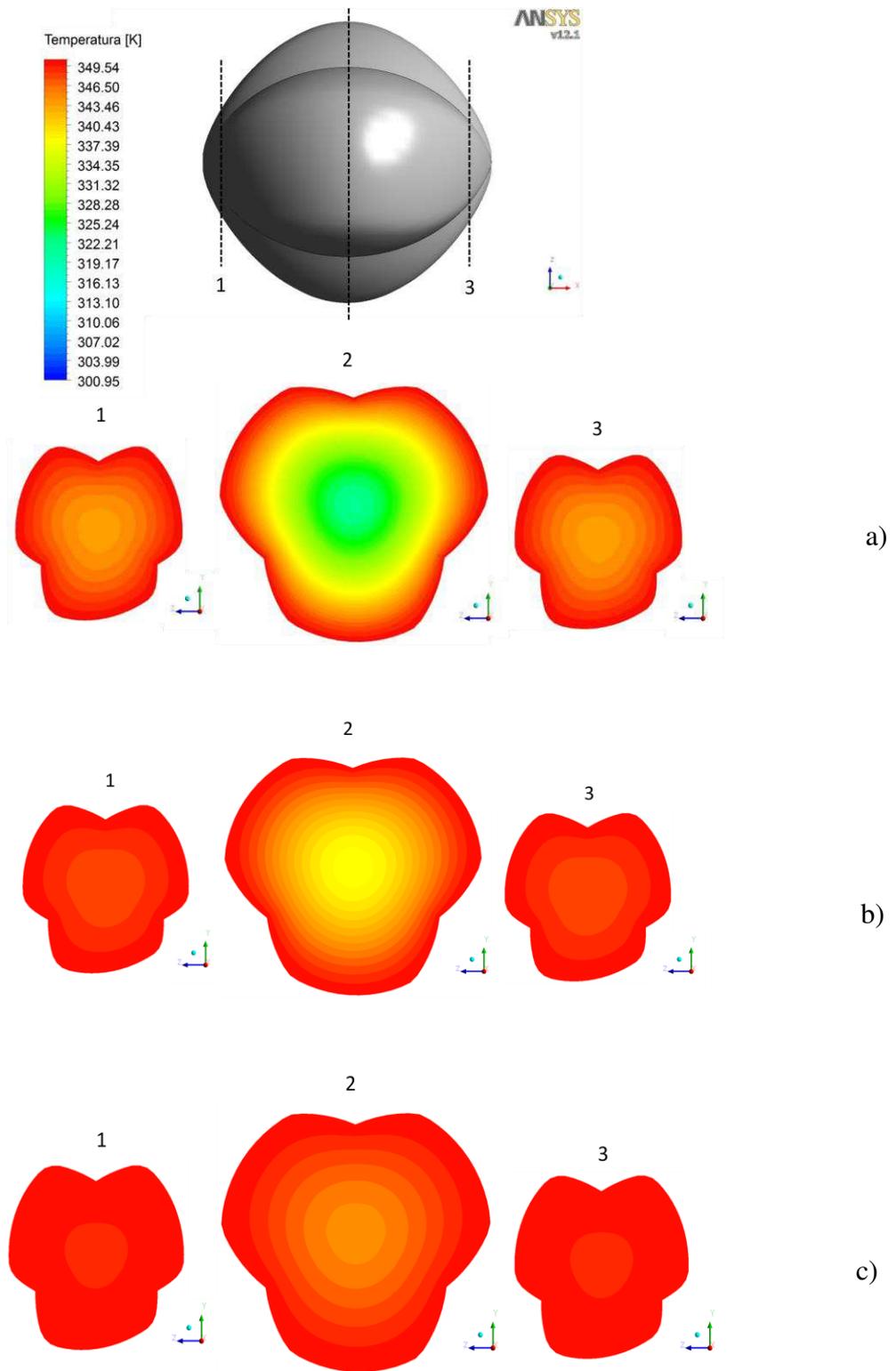


Figura 4.61 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 90°C (363,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

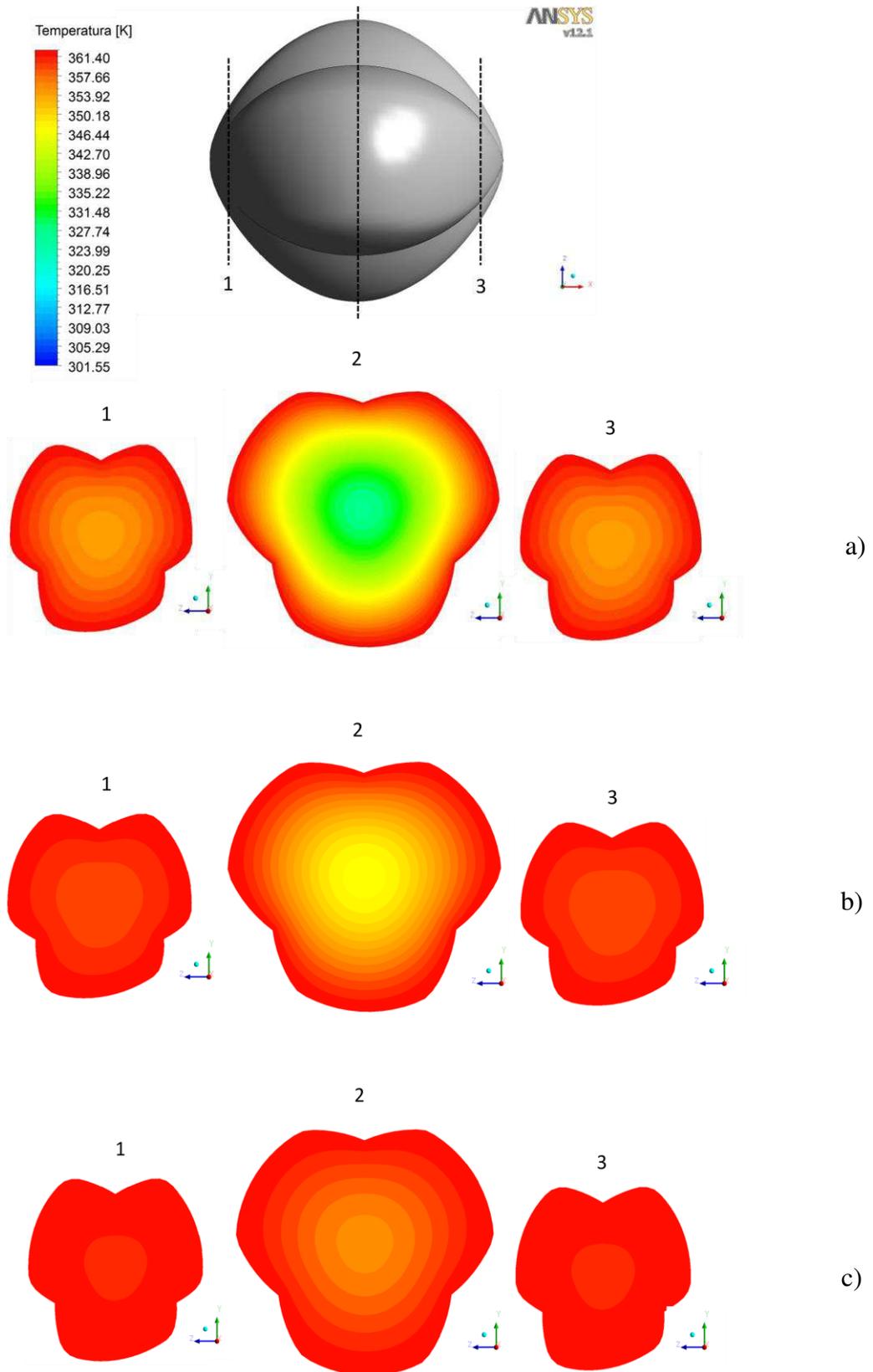


Figura 4.62 - Temperatura do fruto de mamona no plano yz para a temperatura do ar de secagem de 100°C (373,15 K). a) $t = 60$ s, b) $t = 100$ s e c) $t = 140$ s.

A partir da análise das Figuras 4.56 a 4.62 da distribuição de temperatura no interior do fruto de mamona da variedade BRS Energia, pode-se observar que a temperatura dos frutos de mamona cresce gradualmente da superfície para o centro, indicativo de que o fluxo de calor ocorre nesta direção e sentido. Também pode ser observado nestas figuras que no início da secagem ($t = 60$ s), os frutos de mamona estão com temperatura média em torno de 309,83 K, 314,957 K, 320,625 K, 328,106 K, 336,99 K, 341,969 K, 352,079 K, respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Já para $t = 140$ s, os frutos de mamona estão com temperatura média de aproximadamente iguais a 311,39 k, 317,388 K, 324,138 K, 332,772 K, 343,131 K, 348,939 K, 360,666 K, respectivamente, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C.

No processo de secagem de grãos, as altas taxas de secagem irão gerar tensões térmicas e hídricas no interior do produto que podem causar fissuras nos grãos e/ou sementes, proporcionando condições favoráveis ao ataque de microorganismos, afetando assim as características físicas, químicas e biológicas do grão, tais como germinação, vigor, conteúdo de energia, consistência, valor nutritivo e cor. Então, controlar o processo de secagem de grãos é essencial.

Os resultados evidenciam que a qualidade do fruto de mamona, bem como das sementes contidas no fruto, diminuiu com o aumento da temperatura de secagem e capacidade de evaporação do ar. Nguyen e Kunze (1984) estudaram o efeito da temperatura de secagem e vários tratamentos pós-secagem sobre a fissura de arroz em casca. Os autores verificaram que, embora os grãos fissurados geralmente aumenta com o tempo de armazenamento, o aumento não foi consistente, pois a contagem dos grãos fissurados nos quatro intervalos de tempo (9, 24, 48 e 72 h) foram feitas em amostras que eram independentes umas das outras.

Menezes *et al.* (2012), avaliando a utilização de raios-X na identificação de fissuras em sementes de arroz, após o processo de secagem, constataram que o aumento da temperatura de secagem proporciona aumento da porcentagem de sementes com fissuras, sendo que as fissuras mais severas afetam negativamente a germinação.

Golmohammadi *et al.* (2012) observaram que a secagem inadequada de arroz em casca provoca fissuras nos grãos e inclina-os a trincar. Nos casos onde a taxa de secagem é maior do que a taxa admissível, os grãos vão ser submetidos a um choque térmico e, por conseguinte, irão aumentar as fissuras nos grãos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, durante o processo experimental de secagem e da simulação numérica via ANSYS CFX[®] dos frutos de mamona da variedade BRS Energia, bem como nas análises físico-químicas realizadas em frutos e sementes de mamona, pode-se concluir que:

- a) Os parâmetros físico-químicos de umidade, minerais, proteína, lipídios, acidez total, pH, sódio, cálcio, carboidratos e energia, estiveram relativamente próximos aos obtidos para tortas de mamona de outras variedades;

- b) As propriedades termofísicas condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e densidade ou massa específica obtidas neste trabalho foram satisfatórias, principalmente pelos excelentes resultados obtidos nas simulações numéricas utilizando o ANSYS CFX[®]. Os valores obtidos experimentalmente foram $k = 0,5267 \text{ W/(m.K)}$, $c_p = 3,64775 \text{ kJ/(kg.K)}$, $\alpha = 8,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\rho = 800,00 \text{ kg/m}^3$;

- c) As cinéticas de secagem mostraram que com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumenta-se a taxa de secagem e os frutos de mamona alcançam mais rapidamente a sua temperatura e umidade de equilíbrio;
- d) O modelo matemático empírico de Page ajustou-se muito bem aos dados experimentais das cinéticas de secagem dos frutos de mamona em camada fina, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99,60% e valores de desvio-padrão da estimativa (SE) inferiores a 0,0165, na faixa de temperatura de 40 a 100°C;
- e) Os tempos requeridos para os frutos de mamona da cultivar BRS Energia atingir o teor de umidade de equilíbrio foram aproximadamente de 1.500, 1.240, 1.140, 960, 900, 840 e 900 minutos, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente;
- f) Os tempos necessários para os frutos de mamona da cultivar BRS Energia atingirem o teor de umidade industrial (10%) foram de aproximadamente 70, 180, 210, 10, 60, 40 e 5 minutos, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C e teores de umidade inicial, em base úmida, de 13,97; 23,61; 28,71; 11,23; 21,81; 18,91 e 11,54%, respectivamente;
- g) O modelo matemático de difusão de massa e calor, disponível pelo ANSYS CFX[®], representou muito bem a física do problema. Com o aumento do tempo de secagem, verificou-se que a umidade migra a partir do centro para a superfície, proporcionando assim gradientes de umidade no interior do sólido; o fluxo de calor ocorreu na direção oposta;
- h) A geometria real considerada para o fruto foi mais apropriada quando comparada com a geometria esférica;

- i) Os coeficientes de transporte de massa difusivo no interior do fruto de mamona mostraram-se dependentes da temperatura, ou seja, os valores de D aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem. Os valores dos coeficientes de difusão estimados pelo modelo de difusão líquida considerando a geometria real foram iguais a $D = 4,578 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 5,625 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 5,351 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 9,013 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 12,628 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 12,897 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ e $D = 17,295 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C, respectivamente;
- j) A temperatura nos frutos de mamona aumenta rapidamente em um curto período de tempo até atingir o equilíbrio térmico no tempo decorrido de aproximadamente 10 minutos de processo, para todas as condições de secagem;
- k) Os frutos de mamona da cultivar BRS Energia atingem o equilíbrio térmico mais rapidamente para a temperatura do ar de secagem mais próximo da temperatura inicial da mamona;
- l) As altas taxas de secagem geram tensões térmicas e hídricas dentro do produto, que causam trincas e deformações nos grãos, proporcionando condições favoráveis ao ataque de microorganismos, afetando assim as características físicas, químicas e biológicas dos grãos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Aplicar os modelos apresentados neste trabalho à secagem de outros produtos agrícolas;

- b) Estudar a secagem dos frutos e sementes de mamona em outras condições experimentais;
- c) Avaliar a secagem de frutos de mamona submetidos a diferentes níveis de umidade relativa, utilizando-se de um secador industrial;
- d) Realizar a secagem de frutos de mamona em um secador com controle de velocidades do ar de secagem;
- e) Estudar o processo de extração de óleo das sementes de mamona da cultivar BRS Energia após o processo de secagem;
- f) Desenvolver novos modelos matemáticos e utilizar os dados experimentais desta pesquisa para validá-los;
- g) Simular casos com variáveis mais reais, como a condição de contorno de 3ª espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. R.; LIMA, D. G.; HAMÚ, E. H.; WOLF, C.; SUAREZ, P. A. Z. Utilization of metal complexes as catalysts in the transesterification of Brazilian vegetable oils with different alcohols. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, v. 209, n. 1, p. 29-33, 2004.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.

AKPINAR, E. K. Mathematical modeling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 4, p. 864-870, 2006.

ALVARADO, J. D. Propriedades físicas de frutas. IV: Difusividad y conductividad térmica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**, Ambato, v. 24, n.1, p.41- 47, 2001.

AMORIM NETO, M. da S.; BELTRÃO, N. E.; de M.; SILVA, L. C.; ARAÚJO, A. E. de; GOMES, D.C. **Zoneamento e definição da época de plantio para o cultivo da mamoneira no Estado da Bahia**. Campina Grande: Embrapa – CNPA, 9p. (Embrapa - CNPA. Circular Técnica, 103). 1999.

ANSYS CFX - **Solver theory guide**. Inc. Release 12.1 Southpointe November 2009. 275 Technology Drive ANSYS, Inc. is certified to ISO 9001:2008.

ANTHONIESEN, D. G.; SILVA, S. D. A.; SIMONETI, M.; Caracterização de sementes de variedades de mamona (*Ricinus communis* L.) na região sul do Rio Grande do Sul. In: I Congresso Brasileiro de Mamona. Energia e Sustentabilidade. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 1 CD-ROM.

AOSANI, E. **Temperatura de secagem estacionária e de armazenamento na qualidade de grãos de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. 2007, 75 p. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUÊIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa de cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; SOUZA, C. M. A. de; GONÇALVES, A. A.; VILHASANTI, H. C. B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 279-286, 2014.

ARF, O.; BOLONHEZI, A. C. **Apostila de agricultura geral**. Ilha Solteira: Unesp, 2012. 96 p.

AZEVEDO, D. M. P. de; BELTRÃO, N. E. de M. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. 2. ed. rev. amp. Campina Grande: Embrapa Algodão; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 506 p.

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A S.; BELTRÃO, N. E. de M.; SOARES, J. J.; VIEIRA, R. M. de; MOREIRA, J. A. M.; **Recomendações técnicas para o cultivo de mamoneira *Ricinus communis* L. no nordeste do Brasil**. Campina Grande: Embrapa – CNPA, 39p. (Embrapa – CNPA. Circular Técnica, 25) 1997a.

AZEVEDO, D. M. P.; NÓBREGA, M. B. de M. Cultura da mamona: Plantio. Embrapa Algodão: sistema de produção 4, 2003. Disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/CultivodaMamona/plantio.htm>. Acesso em julho de 2013.

AZEVEDO, D.M.P.; BELTRÃO, N. E. de M.; LIMA, E.F.; BATISTA, F. A S. **Efeito da população de plantas no rendimento da mamoneira**. Campina Grande: Embrapa – CNPA, 39 p. (Embrapa – CNPA. Comunicado Técnico, 54) 1997b.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 330-343, 2007.

BARROZO, M. A. de S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. **Secagem de sementes de soja**. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. da. Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: UFSCar 1998, cap. 4, p. 119-159.

BELTRÃO, N. E. de M. **A cadeia da mamona no Brasil, com ênfase para o segmento de P&D: estado da arte, demandas de pesquisa e ações necessárias para o desenvolvimento**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 19p. (Série Documentos, n. 129).

BELTRÃO, N. E. de M. **Crescimento e desenvolvimento da mamoneira (*Ricinus communis* L.)**, (Embrapa Comunicado Técnico) Campina Grande, PB Janeiro/2003.

BELTRÃO, N. E. de M.; CARDOSO, G. D. **Informações sobre o sistema de produção utilizados na ricinocultura na região Nordeste, em especial o semi-árido e outros aspectos ligados a sua cadeia**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 6 p. (Comunicado Técnico, 213).

BELTRÃO, N. E. de M.; SILVA, L. C.; VASCONCELOS, O. L.; AZEVEDO, D. M. P.; VIEIRA, D. J. **Fitologia**. In: AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F. O agronegócio da mamona no Brasil. Embrapa Algodão: Campina Grande, PB; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, p. 37-61. 2001.

BELTRÃO, N. E. de M.; SOUZA, J. G. de; SANTOS, J. W. dos; JERÔNIMO, J. F.; COSTA, F. X.; LUCENA, A. M. A. de; QUEIROZ, U. C. de. Fisiologia da mamoneira, cultivar BRS 149 Nordestina na fase inicial de crescimento, submetida a estresse hídrico. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.7, n. 1, p. 659-664, jan./abr. 2003.

BIAGI, J. A.; VALENTINI, S.R.; QUEIROZ, D. M. **Secagem de produtos agrícolas**. In: Introdução a Engenharia Agrícola. Campinas, SP: Unicamp, 1992. p. 245-66.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001, 912 p.

BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 2011, 160 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, MG, Brasil.

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

BUZZETTI, A. R. Falta estímulo à produção de mamona. **Óleos & grãos**, São Caetano do Sul, v. 8, n. 47, p. 39-45, 1999.

CARMO, J. E. F., **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas**. 2004, 139 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

CARVALHO, B. C. L. **Manual do cultivo da mamona**. Salvador EBDA, 2005. 65 p.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Simulação de secagem de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers) em secador de camada estacionária. Salvador-BA, In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31. **Anais...** 29 de julho a 02 de agosto de 2002.

CHANG, C. S. Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 5, p. 1447-450, 1986.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during dehydration of foods**. In: MUJUMDAR, A. *Advances in drying*. Washington/ New York/London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, n.1, p. 73-102, 1983.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 293–298, 2007.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 1, Safra 2013/2014, n.10 – Décimo Levantamento, Brasília, p. 1-85, julho 2014
Disponível em: <http://www.conab.gov.br>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Conjectura mensal**. Período: dezembro de 2014. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_01_16_17_33_44_mamonadezembro2014.pdf

CONCEIÇÃO, M. M.; CANDEIA, R. A.; DANTAS, H. J.; SOLEDADE, L. E. B.; FERNANDES Jr., V. J.; SOUZA, A. G. Rheological behavior of castor oil biodiesel. **Energy & Fuels**, v. 19, n. 5, p. 2185-2188, 2005.

CORRÊA, J. L. G.; NASCIMENTO, F. R.; CASTRO NETO, P.; FRAGA, A. C. Cinética de secagem de frutos de mamona (*Ricinus communis* L.) variedade IAC 80. In: CONGRESSO DE REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2., 2007, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: MCT/ABIPTI, 2007.

CORRÊA, P. C.; CHRIST, D.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessecamento e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.1, p.75-79, 1998.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; ANDRÉ L. D.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

COSTA, F. X.; BELTRÃO, N. E. de M.; LIMA, V. L. de A.; NUNES JÚNIOR, E. S.; DAMACENO, F. A. V.; MADEIROS, L. B.; GUIMARÃES, M. M. B.; LUCENA, A. M. A. de; TRESENA, N. L. Crescimento da mamoneira submetida a adubação com lixo orgânico e torta de mamona. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 3., 2008, Salvador. Energia e ricinoquímica: **Anais...** Salvador: SEAGRI; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 1 CD-ROM

COSTA, H. M.; RAMOS, V. D. Efeito do óleo de mamona em composições de borracha natural contendo sílica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 1, p. 46-50, 2004.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. de. Isotermas de desorção e calor isostérico dos frutos de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, v. 17, n. 4, p. 412-418. 2013.

COSTA, T. L. **Propriedades físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona**. 2006. 113 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

COSTA, F. X.; BELTRÃO, N. E. de M.; LIMA, V. L. A. de; NUNES JÚNIOR, E. S.; GUIMARÃES, M. M. B.; DAMACENO, F. A. V. Efeito do lixo orgânico e torta de mamona nas características de crescimento da mamoneira (*Ricinus communis* L.). **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 259-268, 2009.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D. N.; SOUSA, K. A. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.1089-1096, 2011.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, Clarendon Press, Oxford, UK, 1992, 414 p.

DIAS, L. G. **Estudo do processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito**. 2013. 111 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, MG, Brasil.

DOAN, L. G. Ricin: Mechanism of toxicity, clinical manifestations, and vaccine development. A review. **Journal of Toxicology**, v. 42, n. 2, p. 201-208, 2004.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.**: John Wiley & Sons, 3th edition, New York, 1998. 712 p.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Características da cultivar**. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/cultivares.html>>. Acesso em: 10 abril. 2014a.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cadeia produtiva - Óleo de mamona e biodiesel**. Embrapa Algodão: Disponível em: www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/cadeia_produtiva_biodiesel.html, 2014b.

FAO - **Food and Agriculture Organization of United Nations**: Informação em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: Agosto 2014.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. 2012. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.5, p. 573–583, 2012

FARIAS, R. P. de. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. 2011, 159 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

FERREIRA, A. G., **Estudo de viabilidade técnica da utilização de uma chaminé solar como secador de alimentos**. 2004, 172 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

FIOREZI, R. **Princípios da secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2003. 263p.

FONTANA, A. J., WACKER, B., CAMPBELL, C. S. CAMPBELL, G. S. **Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils**. California, USA: ASAE (The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems), 2001.

FREIRE, E. C. et al. Melhoramento genético. In: AZEVEDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Algodão; Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 169-194.

FREIRE, R. M. M. Ricinoquímica. In: AZEVEDO, D.M. P.; LIMA, E. F. (eds.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Serviço de Comunicação Tecnológica, 2001. 350 p.

FREIRE, R. M. M.; SEVERINO, L. S.; MACHADO, O. L. T. Ricinoquímica e co-produtos. In: AZEVEDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. de M. (Edts. Tecs.). **O Agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. Cap. 13.

GEANKOPLIS, C. **Transport and unit operations**. 2nd Ed. Prentice-Hall International Inc. New Jersey, USA.1983. 921 p.

GHODAKE, H. M; GOSWAMI, T. K.; CHAKRAVERTY, A. Moisture sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, v.78, p. 827-935, 2007.

GOLMOHAMMADI, M.; ASSAR, M.; RAJABI-HAMANE, M. Experimental and theoretical investigation of moisture dynamics in intermittent drying of rough rice. **Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 46, n. 2, p. 87- 96, 2012.

GONÇALVES, D. **Física volume zero: mecânica, termodinâmica, ondas, ótica, eletricidade**. Rio de Janeiro, RJ: Técnico, 1974. 324 p.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008, 199 p. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

GONELI, A. L. D.; CORREA, 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*, v.27, n. 1, p. 135-140, 2007.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 34, n. 11, p. 64-73, 2009.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. de A.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 01-08. 2011.

GONELI, A. L. D.; NASU, A. K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W. D.; SARATH, K. L. L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira Plantas Medicinai**s. 2014, v. 16, n. 2, p. 434-443.

HACIHAFIZOĞLU, O.; CIHAN,A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. **European Food Research and Technology**, v. 226, n. 4, p. 787-793. 2008.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport, AVI Publishing, 1980. 382p.

HEMERLY, F. X. **Mamona: Comportamento e tendências no Brasil**. Brasília: Embrapa - Departamento de Informação e Documentação, 1981. 69 p.

IBRAGEC – Instituto Brasil de Estudo, Pesquisas e Gestão Estratégica de Competências. **Cultivo da mamona** / Recomendações técnicas para a agricultura familiar. Projeto UTDs. Viçosa-MG. Disponível em: <<http://www.institutobrasil.com/utds/conteudo.php?id=19>>. Acesso em 19-08-2014.

INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ª ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos, S.A., Rio de Janeiro, 2008.

IAL - INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. **Thermal properties of grains**. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v. 8, n. 1, p. 33-38, 1965.

KOURI, J.; SANTOS, R. F.; BARROS, M. A. L. **Cultivo da mamona**. 2006. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/CultivodaMamona_2ed/importancia.html#tab1> Acesso em: 12/12/2012.

KUMAR, P. V.; RAMAKRISHNA, Y. S.; RAMANA RAO, B.V.; VICTOR, U. S.; SRIVASTAVA, N. N.; SUBBA RAO, A.V. M. **Influence of moisture, thermal and photoperiodic regimes on the productivity of castor beans (*Ricinus communis* L.)**. Agr Forest Meteorol, vol. 88, p. 279-289, 1997.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais da secagem. **Revista Brasileira de Armazenagem**, v.4, n.1 p.17-46, 1979.

LEITE, J. C. A.; SOUSA, R. F.; SILVA, A. S.; GOUVEIA, J. P. G.; SILVA, M. M.; SOUSA, A. G. Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. 5, n. 2, p. 1-11, 2005.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas.** 1999. 244 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

LIMA, R. F. de; FAORO, V. WINIK, S. V. KHATCHATOURIAN, O. **Armazenamento e secagem de grãos de soja.** Relatório técnico-científico da XVIII Jornada de Pesquisa, Unijuí, 2013.

LORENZI, H; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas.** Ed. Nova Odessa, São Paulo, Instituto Plantarum, 2002, 512 p.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory.** Academic Press, New York and London, 1968, 684 p.

MACEDO, L. R.; WAGNER, W. J. **Revisão bibliográfica sobre a cultura da mamona.** Belém: Sudam/DSP, 1984. 35 p.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.

MAIA, M. S; **Secagem de sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam) com ar ambiente forçado.** 1995. 108 p. Tese de Doutorado em Agronomia - Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A, 2004. 453 p.

MAZZANI, B. Euforbiáceas oleaginosas: Tártago. In: MAZZANI, B. **Cultivo y mejoramiento de plantas oleaginosas.** Caracas: Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuárias, 1983. p. 277-360.

MELO, C. L. R. de; GONDIM, T. M. de S.; SAMPAIO, D. D.; ARAÚJO, D. R. de; SOUSA, J. dos S. Análises físico-químicas de sementes de três genótipos de mamona. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 2., **Anais....**Aracaju. 2006.

MENEGHETTI, V. L. **Parâmetros industriais e qualidade de consumo do arroz na secagem e no armazenamento.** 2008. 92 p. Dissertação de Mestrado em Ciências, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

MENEZES, N. L.; CICERO, S. M.; VILLELA, F. A.; BORTOLOTTI, R. P. Using X-rays to evaluate fissures in rice seeds dried artificially. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 1, p. 070-077, 2012.

MIRANDA, L. C.; SILVA, W. R.; CAVARIANI, C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 11, p. 2097-2108, 1999.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, v. 2, n. 3, p. 1254-1260, 1980.

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

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York: Gordon and Breach Science, 1980. 407 p.

MOREIRA, J. A. N.; LIMA, E. F.; FARIAS, F. J. C.; AZEVEDO, D. M. P. de. Melhoramento de mamoneira (*Ricinus communis* L.). Campina Grande-PB. Embrapa-CNPA, 29 p. (**Embrapa - CNPA. Documentos**, 44) 1996.

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

MOSHKIN, V. A. **Castor.** New Delhi: Amerind, 1986. 315 p.

MUJUMDAR, A. S. **Principles, classification, and selection of dryers**, in: Handbook of Industrial Drying (Ed. A. S. Mujumdar), CRC Press, Boca Raton, 2006, p. 4-31.

NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Boca Raton, CRC Press, 2001. 672 p.

NGUYEN, C. N.; KUNZE, O. R. Fissures related to post drying treatments in rough rice, **Cereal Chemistry Journal**, v. 61, n. 1, p. 63- 68, 1984.

OKADA, M.; VITALI, A. A.; CARVALHO, R.; NETO, R. O. TY.; JARDI, D. C. P. Fundamentos sobre a secagem de sólidos. In: Travaglini, D. A. **Desidratação de frutas e hortaliças** – Manual Técnico. Campinas (SP). ITAL: p. 1-38, 1987.

OLIVEIRA, D. E. C.de; RESENDE, O., SMANIOTTO, T. A. de S.; SOUSA, K. A. de; CAMPOS, R. C. C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 50-56, 2013.

OLSNES, S. The history of ricin, abrin and related toxins. **Toxicon**, v. 44, p. 361-370, 2004.

OPLINGER, E. S. OELKE, E.A.; KAMINSKI; A. R.; COMBS, S. M.; DOLL, J. D.; SCHULER, R. T. **Castor beans. Field crops manual**, Purdue, 1997. Disponível em: <<http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afem/castor.html>>. Acesso em: 12 junho 2013.

ORO, N. T. **Modelagem e simulação do processo de secagem em secador de fluxo contínuo**. 1999, 112 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS, Ijuí, RS, Brasil.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying**. New York: J. Wiley & Sons, 1988. 303 p.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A. de ; PARK, K. J. B. **Conceitos e processo e equipamentos de secagem**. 2007. 121 p. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> Acesso em 19/05/2014.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra Bartlett (*Pyrus* sp) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.

PARK, K. J.; BROD, F. P. R.; ALONSO, L. F. T. **Secagem de produtos agrícolas**. In: SEMAGRI – SEMANA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DA UNICAMP, 11., Campinas (SP): Agrológica – Empresa Júnior de Engenharia Agrícola, p. 41-55, 1999.

PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 3, p. 242-247, 1997.

PARK, K. J. **Os fundamentos da secagem**. Viçosa: UFV, 1988. 26 p. (Centreinar). PB, Brasil.

POLIDRYER. **Secador de leito fixo**. Disponível em <http://www.polidryer.com.br/secador-leito-fixo/imagem.jpg>> Acesso em: 30 Mai. 2014.

POPOVA, G.M.; MOSHKIN, V.A. Botanical and biological proprieties of castor: botanical classification. In: MOSHKIN, V.A (ed.) **Castor**, New Delhi, Amerind, 1986. p. 11-27.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Instituto Campineiro de Engenharia Agrícola. Campinas – SP, 1986. 603 p.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 1, p. 19-27, 2011.

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, 2007.

RAZERA, L. F. Colheita, secagem, beneficiamento e armazenamento de sementes. **O Agrônomo**, Campinas, v.27, p 124-43, 1975.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 626-631. 2006.

RESENDE, O.; CORRÊA, P., C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-28, 2008.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

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.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), **Engineering properties of foods**. NY: Marcel Dekker Inc., 1986.

ROCHA, R. P.; MELO, E. C.; CORBÍN, J. B.; BERBET, P. A.; DONZELES, S. M. L.; TABAR, J.A. Cinética del secado de tomillo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 675-683, 2012.

SANTOS, W. N. dos. **Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - o método de pulso de energia**. *Cerâmica*. v.51, n.319, p. 205-213, 2005.

SAVY FILHO, A. **Mamona tecnologia agrícola**. Campinas: EMOPI, 2005. 105 p.

SAYKOVA, I.; CWICKLINSKI, G.; CASTELLE, P. Analytical approach for predicting effective diffusion coefficients in multidimensional slab geometry. **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 44, n. 1, p. 44-49, 2009.

SCHULTZ, A R. **Botânica sistemática**. Rio de Janeiro: Globo, 1963, v. 2., 427 p.

SEEDNEWS. **Procedimentos operacionais na secagem com alta temperatura.** Disponível em http://seednews.inf.br/_html/site/content/reportagem_capa/index.php?edicao=42> Acesso em: 02 Jun. 2014.

SEVERINO, L. S.; MORAES, C. R. A.; FERREIRA, G. B.; CARDOSO, G. D.; GONDIM, T. M. S.; BELTRÃO, N. E. M.; VIRIATO, J. R. **Crescimento e produtividade da mamoneira sob fertilização química em região semi-árida.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 62).

SHAW, C. T. **Using computational fluid dynamics.** Department of Engineering. University of Warwick – Prentice Hall – 1992.

SILVA, A. M. V. **Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar para oleaginosas usadas na produção de biodiesel.** 2012b. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA, C. K. F. **Aplicação da análise inversa ao modelo difusional de transferência de massa.** 2007. 101 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, PB, Brasil.

SILVA, C. M. D. P. S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e elipsoides.** 2012a, 254 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas.** Instituto Maria. Juiz de Fora - MG. 509 p, 1995.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores, In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas.** Viçosa: Aprenda Fácil, 2000, p. 107-138.

SILVA, S. D. dos A.; JR. Casagrande, J. G.; AIRES, R. F. **Sistema de Produção da Mamona.** Disponível em:

<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/SistemaProducaoMamona/secagem.htm>> Acesso em: 17 maio. 2014a.

SILVA, S. L. S. da; CANEPPELE, C.; PEREIRA, M. T. J.; NUNES, J. A. S.; ORMOND, A. T. S. Propriedades físicas do amendoim em função dos teores de água dos grãos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 2518-2524. 2014b.

SILVA, W. P. da. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas.** 2007. 263 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA, W. P. da; PRECKER, W. J.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S.; Determination of the effective via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v. 95, n. 2, p. 298-304, 2009.

SILVA, W. P. da; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. Numerical simulation of the water diffusion in cylindrical solids. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem. **Global Science Technology**, v. 5, n. 1, p. 83-92, jan/abr. 2012.

SOUSA, M. B. de. **Processo de desintoxicação e aproveitamento da torta de mamona como ração animal.** 2013. p. 178. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

STEVENS, G. R.; THOMPSON, T. L. **Improving cross-flow grain dryer design using simulation.** Transaction of the ASAE. v. 19, n. 4, p. 778-781, 1976.

TERRA DA GENTE. **Mamoneira (Ricinus communis)**. Disponível em <http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/terra-da-gente/flora/noticia/2013/7/mamoneira.html>>Acesso em: 30 Julho de 2013.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. **Transactions of the ASAE**, v.11, p. 582-586, 1968.

TU, J.; YEOH, G. H. CHAOQUN, L. **Computational fluid dynamics**. 1. Ed. Elsevier, 2008, 470 p.

TUNDE-AKINNTUNDE, T. Y.; AKINTUNDE. B. O. Some physical properties of sesame seed. **Biosystems Engineering**, v. 88, p. 127-129, 2004.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. 2. Ed. Prentice Hall, 2007, 520p.

VIDAL, W. N.; VIDAL, M. R. R. **Fitossistemática: Famílias de angiospermas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1980. 59 p.

VIEIRA, R. de M.; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A. S. Diagnóstico e perspectivas da mamoneira no Brasil. In: Reunião Temática de Matéria-Prima Oleaginosas no Brasil: Diagnóstico, perspectivas e prioridades de pesquisa, 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: EMBRAPA - CNPA/MAA/ABIOVE, 1997. p. 139-150. (EMBRAPA - CNPA. Documentos, 63).

WACKER, B.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S. **Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and soils**. California, USA: ASAE (The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems), 2001.

WALKER, L. P.; BAKKER-ARKEMA, F.W. **Energy efficiency in concurrent flow rice drying**. ASAE Paper. 16 p. n.78-3540. 1978.

WEBER, E. A. **Armazenagem agrícola**, Porto Alegre: Kleper Weber Industrial, 1995. 400 p.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos**. Canoas, RS: Editora Salles, 2005. 586 p.

WEBSTER, G. L. Synopsis of the genera and suprageneric taxa of Euphorbiaceae. **Annual Missouri Botanical Garden**, v. 81, p. 33-144. 1994.

WEBSTER, G. L. The saga of the spurge: a review of classification and relationships in the Euphorbiales. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 94, p. 3-46, 1987.

WEISS, E. A. **Oilseed crops**. London: Logman, 1983. 660 p.

WIKIMEDIA. *Ricinus communis*. Disponível em http://commons.wikimedia.org/wiki/Ricinus_communis/imagem.jpg Acesso em: 30 Julho de 2013.

YAZDANI, M.; SAZANDEHCHI, P.; AZIZI, M.; GHOBADI, P. Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. **European Food Research Technology**, v. 223, n. 5, p. 577-584, 2006.

ZUCHI, J. Curva de secagem de frutos de mamona. **Journal of Seed Science**, v. 22, n.1, p. 17-21, 2012.

ANEXOS



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 12 de dezembro de 2013.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 968/13

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA IN NATURA
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	22.11.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	22.11.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	26.11.2013
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1573/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	15,42	15,38	15,54	15,45
Minerais (%)	3,99	4,08	4,46	4,17
Proteínas (%)	12,99	12,90	12,89	12,93
Lípidios (%)	30,64	30,21	30,00	30,28
Acidez total (%)	4,99	5,02	4,97	4,99
pH	6,51	6,51	6,51	6,51
Sódio (mg/100g)	386,32	402,03	402,03	396,79
Cálcio (mg/100g)	359,00	367,00	363,00	363,00
Carboidratos (%)	36,94	37,43	37,11	37,16
Energia (kcal/100g)	475,66	473,21	470,00	472,96

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Perdigão Batista
Isabel Cristina B. Perdigão Batista
Eng^ª Controle de Qualidade
Mat. SIAPE 00336481

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scienteccassociao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 28 de março de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 176/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	FRUTO DE MAMONA - 150g / seca à 40 °C
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	05.12.2013
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	06.03.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1711/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	4,50	4,37	4,32	4,40
Minerais (%)	6,15	6,45	6,17	6,26
Proteínas (%)	16,31	16,43	16,61	16,45
Lípidios (%)	35,02	35,13	35,01	35,05
Acidez total (%)	2,29	2,38	2,40	2,36
pH	5,61	5,61	5,61	5,61
Sódio (mg/100g)	339,08	331,16	333,00	334,41
Cálcio (mg/100g)	458,90	451,30	453,21	454,47
Carboidratos (%)	38,02	37,62	37,89	37,84
Energia (kcal/100g)	532,50	532,37	533,09	532,65

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Pereira Brito
Isabel Cristina L. Perdigão Brito
Eng^a Controladora de Qualidade
Mat. SIAPE 00336461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 28 de março de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 175/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	SEMENTE DE MAMONA SECA À 40 °C 150g
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	05.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	06.03.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº 1710/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,66	3,43	3,61	3,57
Minerais (%)	4,72	4,24	4,88	4,61
Proteínas (%)	17,01	16,92	16,98	16,97
Lipídios (%)	52,07	52,45	52,31	52,28
Acidez total (%)	6,41	6,29	6,29	6,33
pH	5,97	6,01	5,95	5,98
Sódio (mg/100g)	36,31	36,18	36,38	36,29
Cálcio (mg/100g)	505,40	505,00	498,61	503,00
Carboidratos (%)	22,54	22,96	22,22	22,57
Energia (kcal/100g)	626,83	631,57	627,59	628,66

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Pedigão Batista
Isabel Cristina L. Pedigão Batista
Eng^a Controladora Qualidade
Mat. SIAPE 00338461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎(83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 06 de fevereiro de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 017/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	FRUTO DE MAMONA - 150g / seca à 50 °C
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	22.11.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	22.11.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	12.12.2013
AMOSTRAS/QUANT.:	Nº. 1571/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	4,25	4,25	4,23	4,24
Minerais (%)	3,65	3,58	3,69	3,64
Proteínas (%)	14,95	14,80	14,90	14,88
Lípidios (%)	41,73	41,68	41,15	41,52
Acidez total (%)	5,29	5,47	5,29	5,35
pH	6,52	6,50	6,52	6,51
Sódio (mg/100g)	133,62	133,60	133,58	133,60
Cálcio (mg/100g)	279,00	281,00	276,00	279,00
Carboidratos (%)	35,42	35,69	36,03	35,71
Energia (kcal/100g)	577,05	577,08	574,07	576,07

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Perdigão Batista

Isabel Cristina L. Perdigão Batista

Eng^ª Controle de Qualidade

Mat. SIAPE 00336461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos

☎(83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900

Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04

Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12

E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 25 de fevereiro de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 074/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	SEMENTE DE MAMONA, 150g - seca à 50 °C
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	22.11.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	22.11.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	10.02.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1572/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,71	3,68	3,74	3,71
Minerais (%)	3,84	3,58	3,56	3,66
Proteínas (%)	18,04	17,82	18,05	17,97
Lípidios (%)	50,39	50,66	50,34	50,46
Acidez total (%)	3,43	3,20	3,66	3,43
pH	5,74	5,74	5,74	5,74
Sódio (mg/100g)	16,62	15,88	16,98	16,49
Cálcio (mg/100g)	256,00	255,00	261,00	257,00
Carboidratos (%)	24,02	24,26	24,31	24,20
Energia (kcal/100g)	621,75	624,26	622,50	622,84

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^a Controle de Qualidade
Mat. SIAPE 00326401

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 06 de fevereiro de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 016/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	FRUTO DE MAMONA - 150g / seca à 60 °C
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	22.11.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	22.11.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	12.12.2013
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1568/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,39	3,20	3,25	3,28
Minerais (%)	3,87	3,56	3,62	3,68
Proteínas (%)	14,47	14,42	14,35	14,41
Lípidios (%)	38,84	38,22	38,27	38,44
Acidez total (%)	9,45	9,38	9,39	9,41
pH	5,97	5,97	5,97	5,97
Sódio (mg/100g)	149,34	148,97	149,36	149,22
Cálcio (mg/100g)	385,00	377,00	385,00	382,00
Carboidratos (%)	39,43	40,60	40,51	40,18
Energia (kcal/100g)	565,16	564,06	563,87	564,36

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel Cristina L. Penhino Batista

Isabel Cristina L. Penhino Batista

Eng^o Controle de Qualidade

Mat. SIAPE 00330481

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos

☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900

Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04

Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12

E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 25 de fevereiro de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 072/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	SEMENTE DE MAMONA - 150g/ seca à 60 °C
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	22.11.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	22.11.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	10.02.2014
AMOSTRAS/QUANT.:	Nº. 1569/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,01	2,89	3,00	2,96
Minerais (%)	2,25	2,31	2,40	2,32
Proteínas (%)	18,35	18,17	18,37	18,30
Lipídios (%)	52,92	52,60	52,78	52,77
Acidez total (%)	4,35	4,35	4,13	4,28
pH	5,67	5,67	5,67	5,67
Sódio (mg/100g)	18,18	19,14	17,21	18,17
Cálcio (mg/100g)	306,00	316,00	303,00	308,00
Carboidratos (%)	23,47	24,03	23,45	23,65
Energia (kcal/100g)	640,68	642,20	642,30	641,73

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^a Controla de Qualidade
Mat. SIAPE 00338461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scienteccassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 28 de março de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 178/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	FRUTO DE MAMONA - À 70 °C, 150g
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	05.12.2013
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	06.03.2014
AMOSTRAS/QUANT.:	Nº. 1713/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	4,22	4,26	4,14	4,21
Minerais (%)	7,26	7,18	7,20	7,21
Proteínas (%)	15,48	15,61	15,59	15,56
Lipídios (%)	28,71	28,64	28,56	28,64
Acidez total (%)	2,24	2,21	2,27	2,24
pH	6,13	6,13	6,13	6,13
Sódio (mg/100g)	287,71	287,83	286,77	287,44
Cálcio (mg/100g)	252,70	252,10	253,40	253,73
Carboidratos (%)	44,33	44,31	44,51	44,38
Energia (kcal/100g)	497,63	497,44	497,44	497,50

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel A. B. Fardigão Batista

Eng^o Contratada em Suspensão
Mat. SIAPE 00330-687

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 28 de março de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 177/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	SEMENTE DE MAMONA SECA À 70 °C, 150g
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	05.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	06.03.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº 1712/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,08	3,09	3,18	3,12
Minerais (%)	4,70	4,63	4,59	4,64
Proteínas (%)	17,81	17,90	17,78	17,83
Lípidios (%)	38,21	38,52	38,45	38,39
Acidez total (%)	4,19	4,23	4,19	4,20
pH	5,81	5,81	5,81	5,81
Sódio (mg/100g)	35,96	36,98	36,39	36,44
Cálcio (mg/100g)	531,00	536,00	532,00	533,13
Carboidratos (%)	36,20	35,86	36,00	36,02
Energia (kcal/100g)	559,93	561,72	561,17	560,94

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Padigão Batista
Isabel Cristina de Padigão Batista
Engª Química de Qualidade
Mat. SIAPE 00336461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 331/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA à 80 °C, 150g DO FRUTO
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	05.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1715/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	5,18	5,16	5,42	5,25
Minerais (%)	4,88	4,41	4,78	4,69
Proteínas (%)	16,28	16,13	16,16	16,19
Lípidios (%)	47,70	47,07	47,18	47,32
Acidez total (%)	14,51	14,48	14,48	14,49
pH	5,96	5,96	5,96	5,96
Sódio (mg/100g)	76,32	76,08	77,06	76,46
Cálcio (mg/100g)	288,08	289,20	287,11	288,13
Carboidratos (%)	25,96	27,23	26,46	26,55
Energia (kcal/100g)	598,26	597,07	595,10	596,81

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^a Controladora de Qualidade
Mat. SIAPE 00336461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 330/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA à 80 °C, 150g DA SEMENTE
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL./LOTE:	05.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	05.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1714/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,67	3,72	3,53	3,64
Minerais (%)	3,77	3,11	3,28	3,39
Proteínas (%)	17,48	17,45	17,51	17,48
Lipídios (%)	50,89	50,23	50,69	50,60
Acidez total (%)	4,28	4,28	4,31	4,29
pH	5,65	5,65	5,65	5,65
Sódio (mg/100g)	47,35	48,81	48,10	48,01
Cálcio (mg/100g)	316,40	318,40	317,25	317,35
Carboidratos (%)	24,19	25,49	24,99	24,89
Energia (kcal/100g)	624,69	623,83	926,21	624,91

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^o Controladora de Qualidade
Mat. SUAPE 00336461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 333/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA a 90 °C, 150g DO FRUTO
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	19.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	19.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS/QUANT.:	Nº. 1763/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	5,90	5,83	5,96	5,90
Minerais (%)	2,97	3,21	2,93	3,04
Proteínas (%)	17,76	17,83	17,80	17,80
Lípidios (%)	37,69	37,25	37,25	37,40
Acidez total (%)	9,96	9,89	9,91	9,92
pH	5,69	5,69	5,69	5,69
Sódio (mg/100g)	76,65	74,51	74,04	75,06
Cálcio (mg/100g)	150,40	148,91	151,02	150,11
Carboidratos (%)	35,68	35,88	36,06	35,87
Energia (kcal/100g)	552,97	550,09	550,69	551,25

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^a Controladora de Qualidade
Mat. SIAPE 00330461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 332/14

SOLICITANTE:	IVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITÁRIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA 'a 90 °C, 150g DA SEMENTE
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	19.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	19.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1762/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,26	3,33	3,57	3,39
Minerais (%)	2,53	2,40	2,49	2,47
Proteínas (%)	16,99	16,95	16,95	16,96
Lipídios (%)	49,53	49,13	49,21	49,29
Acidez total (%)	4,89	4,89	4,89	4,89
pH	5,73	5,73	5,73	5,73
Sódio (mg/100g)	38,12	38,35	38,59	38,35
Cálcio (mg/100g)	494,00	495,01	492,40	493,80
Carboidratos (%)	27,69	28,19	27,78	27,88
Energia (kcal/100g)	624,49	622,73	621,81	623,01

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng.º Control. de Qualidade
Mat. SIAPE 60336481

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: cientecassociação@gmail.com lt@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE N° 335/14

SOLICITANTE:	Evaldo Marcos A. Pereira (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITARIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA 'a 100 °C, 150g DO FRUTO
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB.:/VAL.:/LOTE:	19.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	19.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1765/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	4,39	4,45	4,66	4,50
Minerais (%)	4,60	4,60	4,61	4,60
Proteínas (%)	16,05	16,76	16,17	16,33
Lípidios (%)	44,88	44,54	44,85	44,76
Acidez total (%)	5,17	5,17	5,17	5,17
pH	5,51	5,51	5,51	5,51
Sódio (mg/100g)	152,40	151,50	151,97	151,96
Cálcio (mg/100g)	315,22	312,41	316,80	314,81
Carboidratos (%)	30,08	29,65	29,71	29,81
Energia (kcal/100g)	588,44	586,50	587,17	587,37

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Engª Controle de Qualidade
Mat. SIAPE 00330481

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎(83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: scientecassociacao@gmail.com lta@ct.ufpb.br



SCIENTEC

Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia
Fundada em 1981 – Conveniada com a UFPB
Laboratório de Tecnologia de Alimentos

João Pessoa, 15 de maio de 2014.

LAUDO DE ANÁLISE Nº 334/14

SOLICITANTE:	EVALDO MARCOS A. PEREIRA (CNPQ - 142422/2011-8)
ENDEREÇO:	END. MARECHAL MANOEL LUÍS OSÓRIO - 318/102 - VARZEA - CID. UNIVERSITÁRIA - RECIFE - PE
PRODUTO(S):	MAMONA SECA a 100 °C, 150g DA SEMENTE
COLETADO POR:	Pelo interessado(a)
MARCA/PROCEDÊNCIA:	- / Recife - PE
FAB./VAL./LOTE:	19.12.2013 / - / -
DATA DE ENTRADA:	19.12.2013
INÍCIO DE ANÁLISE:	28.04.2014
AMOSTRAS:/QUANT.:	Nº. 1764/01 (uma)

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

ANÁLISES	RESULTADOS 1	RESULTADOS 2	RESULTADOS 3	MÉDIA
Umidade (%)	3,21	3,05	3,15	3,14
Minerais (%)	1,56	1,85	1,71	1,71
Proteínas (%)	18,31	18,66	18,50	18,49
Lipídios (%)	53,03	53,07	53,04	53,05
Acidez total (%)	2,97	2,97	3,02	2,99
pH	5,35	5,35	5,35	5,35
Sódio (mg/100g)	57,02	55,88	56,31	56,40
Cálcio (mg/100g)	264,92	266,46	265,60	265,66
Carboidratos (%)	23,89	23,37	23,60	23,62
Energia (kcal/100g)	646,07	645,75	645,76	645,86

Metodologia: - Métodos Físico-químicos para Análises de Alimentos – Instituto Adolfo Lutz, edição IV, 2005.

Isabel C. B. Perdigão Batista
Isabel Cristina L. Perdigão Batista
Eng^o Controle de Qualidade
Inscr. 91APE 00330461

LTA – Laboratório de Tecnologia de Alimentos
☎ (83) 3216-7363 / 91062088 - ☐ (83) 3216-7900
Endereço: Av. Apolônio da Nóbrega, 263 1º andar sala 04
Castelo Branco – João Pessoa – PB CEP: 58.050-260 CNPJ 08.331.902/0001-12
E-mail: cientecassociação@gmail.com lta@ct.ufpb.br