



LUANA HAEBERLIN

**MODELAGEM DA RESISTÊNCIA À DESIDRATAÇÃO DE
GRÃOS DE ARROZ EM CASCA**

**LAVRAS – MG
2020**

LUANA HAEBERLIN

**MODELAGEM DA RESISTÊNCIA À DESIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE
ARROZ EM CASCA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Orientador

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Coorientador

**LAVRAS-MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Haeberlin, Luana.

Modelagem da resistência à desidratação de grãos de arroz em
casca / Luana Haeberlin. - 2020.

90 p. : il.

Orientador(a): Ednilton Tavares de Andrade.

Coorientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Secagem. 2. Propriedades termodinâmicas. 3. *Oryza sativa* L.
I. Andrade, Ednilton Tavares de. II. Corrêa, Jefferson Luiz Gomes.
III. Título.

LUANA HAEBERLIN

**MODELAGEM DA RESISTÊNCIA À DESIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE
ARROZ EM CASCA**

MODELING THE DEHYDRATION RESISTANCE OF PADDY RICE GRAINS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de fevereiro de 2020.
PhD. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa
Dr. Éder Pedroza Isquierdo

EMBRAPA
UNEMAT

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Orientador

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Coorientador

**LAVRAS-MG
2020**

*Aos meus pais,
Euclides Haerberlin e Rosani Maria Haerberlin.*

*Aos meus irmãos,
Willian Haerberlin e Isabel Haerberlin.*

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela vida, saúde, família, amigos. Por guiar meu caminho e me dar forças para superar as dificuldades.

À minha família, Euclides e Rosani Maria Haerberlin, pais amorosos e exemplares, e à meus irmãos Willian e Isabel Haerberlin, por me mostrarem a importância do nosso amor e união, pelo cuidado, afeto, confiança, por permitirem e incentivarem meu crescimento pessoal e intelectual, que apesar da distância foram sempre presentes.

Ao meu namorado Thiago Victor de Amorim Melo pelo companheirismo, incentivo, atenção, afeto, amor e amizade, por fazer a minha vida ter mais sentido.

A instituição Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade e condições oferecidas durante a pós-graduação, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade pela orientação, incentivo, suporte, por desenvolver meu potencial como acadêmica e como pesquisadora.

Ao coorientador Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa e aos demais membros da banca Prof. PhD. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa e Prof. Dr. Éder Pedroza Isquierdo pelo conhecimento, experiência e colaboração ao projeto.

Ao grupo do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas pela convivência, amizade, auxílio e parceria nesses dois anos de mestrado.

Ao Núcleo em Pós-Colheita do Café (PósCafé) por me proporcionar evolução profissional e pessoal ao longo desse período.

Ao CTT pela amizade, companheirismo, paciência, incentivo, carinho e dedicação, agradeço enormemente. Em especial à Camila de Almeida Dias pela convivência, dedicação e auxílio neste projeto.

À Cerealista Demarchi pelo fornecimento da matéria prima utilizada nesta pesquisa.

Muito obrigada!

RESUMO

O arroz em casca é composto por diversas estruturas, as quais, apresentam diferentes características anatômicas e químicas. Devido à essa diversidade, cada estrutura proporciona influência distinta no processo de secagem. O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras. Foram utilizados grãos de arroz do cultivar IRGA 424 RI, produzidos no município de Heliódora, MG, Brasil. Este estudo teve por objetivo avaliar a cinética de secagem de arroz em casca e suas partes constituintes, determinar suas propriedades termodinâmicas de secagem, determinar isotermas de sorção para o arroz em casca e cada parte constituinte e elaborar um modelo de secagem por meio da resistência imposta por cada parte constituinte do arroz em casca. Os grãos foram colhidos mecanicamente, limpos manualmente com auxílio de peneiras e foram selecionados, também de forma manual, apenas grãos saudáveis e maduros. Foi realizado o beneficiamento de amostras em beneficiadora de arroz para obter arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz. Por meio do descascamento no equipamento, foram obtidas as amostras de arroz integral e casca de arroz. Por meio do descascamento seguido de polimento, foram obtidas as amostras de arroz brunido e farelo de arroz. O arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz foram submetidos à secagem em secador de leito fixo nas temperaturas de $35\pm 1^\circ\text{C}$, $45\pm 1^\circ\text{C}$, $55\pm 1^\circ\text{C}$, $65\pm 1^\circ\text{C}$ e $75\pm 1^\circ\text{C}$, com fluxo de ar de $10\text{m}^3\cdot\text{min}\cdot\text{m}^{-2}$. Modelos matemáticos de cinética de secagem foram ajustados aos dados experimentais e foram calculadas a difusividade efetiva, energia de ativação e as propriedades termodinâmicas de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Para a obtenção das isotermas de sorção do arroz em casca e suas partes constituintes, foi utilizado o método estático, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C para atividades de água variando entre 0,1075 e 0,8511. Aos dados experimentais, foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas. O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou às curvas de cinética de secagem de arroz em casca, em todas as temperaturas; para arroz integral a 45°C ; para arroz brunido nas temperaturas de 35, 45 e 65°C ; para farelo de arroz nas temperaturas de 45, 55 e 65°C ; para casca de arroz a 55°C . O modelo de Aproximação da difusão adequou-se aos dados experimentais da cinética de secagem do arroz integral a 35, 55, 65 e 75°C ; do arroz brunido a 55 e 75°C ; do farelo de arroz a 35 e 75°C e da casca de arroz a 35, 45, 65 e 75°C . Os coeficientes de difusão efetiva de todos os tratamentos aumentaram com o incremento de temperatura e sua dependência com a temperatura foi descrita pela Equação de Arrhenius. Os valores de entalpia e entropia reduziram com a elevação da temperatura de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs foi ampliada na faixa de temperatura avaliada. Para a higroscopicidade, o modelo Copace é o que melhor representa as isotermas de sorção de arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, e o modelo de Sigma Copace para arroz integral, nas faixas de temperatura e atividade de água estudada. A resistência à desidratação aumentou com a elevação da temperatura de secagem, para arroz em casca e suas partes constituintes e cada parte do arroz em casca imprime uma resistência diferente, em que o farelo de arroz apresenta maior resistência, seguida pela casca de arroz e arroz brunido, respectivamente.

Palavras-chave: Secagem. Propriedades termodinâmicas. *Oryza sativa* L.

ABSTRACT

The paddy rice is composed of several structures, which, have different anatomical and chemical characteristics. Due to this diversity, each structure provides distinct influence on the drying process. This study was conducted in Agricultural Products Processing Laboratory of the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Lavras. The objective of this study was to assess the kinetics of drying paddy rice and their constituent parts; to determine its thermodynamic drying properties; to determine sorption isotherms and to develop a drying model by resistance imposed by each individual constituent of paddy rice. The grains were mechanically harvested, manually cleaned with the aid of sieves and selected, also manually, only healthy and ripe grains. The processing of rice-benefiting samples was carried out to obtain brown rice, polished rice, rice bran and rice-husk. By peeling the equipment, samples of brown rice and rice husk were obtained. Through peeling followed by polishing, samples of polished rice and rice bran were obtained. Paddy rice, brown rice, polished rice, rice bran and rice husk were submitted to drying in a flat-bed dryer at temperatures of $35\pm 1^\circ\text{C}$, $45\pm 1^\circ\text{C}$, $55\pm 1^\circ\text{C}$, $65\pm 1^\circ\text{C}$ and $75\pm 1^\circ\text{C}$ with air flow of $10\text{m}^3\cdot\text{min}\cdot\text{m}^{-2}$. Mathematical models of drying kinetics were adjusted to experimental data and effective diffusivity, activation energy, and the thermodynamic properties of enthalpy, entropy, and Gibbs free energy were calculated. To obtain the sorption isotherms of paddy rice and their constituent parts, the static method was used at temperatures of 20, 30, 55 and 70°C for water activities ranging from 0.1075 to 0.8511. The mathematical models frequently used to represent the hygroscopicity of agricultural products were adjusted to experimental data. The Midilli model was the one that best adjusted to the drying kinetic curves of paddy rice at all temperatures; for brown rice at 45°C ; for polished rice at temperatures of 35, 45 and 65°C ; for rice bran at temperatures of 45, 55 and 65°C ; rice husk at 55°C . The Diffusion Approximation model was adapted to the experimental data of the drying kinetics of brown rice at 35, 55, 65 and 75°C ; polished rice at 55 and 75°C ; 35 and 75°C rice bran and rice husk at 35, 45, 65 and 75°C . The effective diffusion coefficients of all treatments increased with temperature increase and their dependence on temperature was described by the Arrhenius Equation. The values of enthalpy and entropy reduced with the rise of the drying temperature. The Copace model is the one that best represents the sorption isotherms of paddy rice, polished rice, rice bran and rice husk, and the Sigma Copace model for brown rice, in the temperature ranges and water activity studied. The resistance to dehydration increased with the rise of the drying temperature, for husked rice and their constituent parts. Each part of the paddy rice prints a different resistance, in which the rice bran has higher resistance, followed by the rice husk and polished rice, respectively.

Keywords: Drying. Thermodynamic properties. *Oryza sativa* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grão de arroz e suas principais estruturas anatômicas.....	18
Figura 2 – Curvas típicas de secagem.	26
Figura 3 – Engenho de prova utilizado para beneficiamento do arroz.....	32
Figura 4 – Secador de leito fixo de bancada.....	33
Figura 5 – Acondicionamento das amostras durante a secagem.	33
Figura 6 – Desenho esquemático do grão de arroz com suas dimensões características.	34
Figura 7 – Acondicionamento das amostras durante a determinação das isotermas de sorção experimentais.	38
Figura 8 - Esquema de distribuição de resistência à saída de água das diversas partes intrínsecas do arroz em casca.	41
Figura 9 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para arroz em casca, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.	50
Figura 10 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para arroz integral, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	50
Figura 11 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para arroz brunido, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.	51
Figura 12 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para farelo de arroz, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	51
Figura 13 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para casca de arroz, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.	52
Figura 14 – Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz em casca nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	62
Figura 15 – Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz integral nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	62
Figura 16 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos,	

ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz brunido nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	63
Figura 17 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de farelo de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	63
Figura 18 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de casca de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	64
Figura 19 – Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.	67
Figura 20 – Coeficiente de resistência à desidratação ($m^2.s.kg^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral e arroz brunido em função da temperatura.	72
Figura 21 – Coeficiente de resistência à desidratação ($m^2.s.kg^{-1}$) para farelo de arroz e casca de arroz em função da temperatura.	72
Figura 22 – Valores de resistência à desidratação observados e estimados pelos modelo proposto para arroz em casca.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta e demanda mundial e nacional de arroz beneficiado, em milhões de toneladas.	17
Tabela 2 – Composição centesimal média (% na matéria seca) de arroz submetidos a diferentes processamentos (arroz brunido, arroz parboilizado brunido e arroz integral).....	20
Tabela 3 – Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.	37
Tabela 4 – Atividade de água de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.....	38
Tabela 5 – Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos agrícolas.	39
Tabela 6 – Teor de água inicial (U_i) e teor de água de equilíbrio (U_e), base seca ($\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$), de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz em equilíbrio com diferentes temperaturas (T , °C) e atividades de água (A_w , decimal).....	45
Tabela 7 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P , %) e desvio padrão da estimativa (SE , decimal), para os modelos de isotermas de sorção analisados para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.....	46
Tabela 8 – Coeficientes do modelo matemático de Copace ajustados às isotermas de sorção do arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, e do modelo matemático de Sigma Copace ajustado à isoterma de sorção do arroz integral.	49
Tabela 9 – Teor de água inicial (U_i) e teor de água final (U_f), base seca ($\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) e tempo total de secagem (h) para as temperaturas de secagem estudadas para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz	53
Tabela 10 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P , %), desvio padrão da estimativa (SE , decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz em casca, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	54
Tabela 11 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P , %), desvio padrão da estimativa (SE , decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz integral, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.....	55

Tabela 12 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz brunido, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	56
Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de farelo de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.....	58
Tabela 14 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de casca de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.7	59
Tabela 15 – Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.	60
Tabela 16 – Coeficientes de difusão efetiva ($\times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) médios obtidos na secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.....	65
Tabela 17 – Parâmetros da equação de Arrhenius ajustados aos coeficientes de difusão efetiva, seus coeficientes de determinação (R^2 ,%) e energia de ativação (E_a , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.....	67
Tabela 18 – Entalpia (ΔH , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), entropia (ΔS , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) e energia livre de Gibbs (ΔG , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz secados nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.....	68
Tabela 19 – Valores dos coeficientes de resistência à desidratação (η , $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz em função da temperatura.....	71
Tabela 20 – Valores das influências das espessuras da casca (I_c), farelo (I_f) e endosperma (I_e) na espessura do arroz em casca (decimal).	73
Tabela 21 – Coeficientes do modelo proposto (A, B e C, decimal) para analisar a resistência de cada parte componente do arroz em casca, coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal) do modelo proposto.	74

Tabela 22 – Somatório das resistências ($m^2.s.kg^{-1}$) de cada parte do arroz em casca considerando espessura média e o fator de correção em comparação com a resistência total.	75
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	Arroz – aspectos gerais	17
2.1.1.	Anatomia e composição química dos grãos de arroz	18
2.2.	Teor de água de equilíbrio	20
2.3.	Secagem	23
2.3.1.	Teoria da secagem	23
2.3.2.	Cinética de secagem.....	24
2.3.3.	Modelagem matemática e simulação da secagem.....	27
2.4.	Resistência à desidratação	29
3.	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1.	Caracterização do experimento	31
3.2.	Beneficiamento dos grãos de arroz	31
3.3.	Sistema de secagem	32
3.4.	Contração volumétrica.....	34
3.5.	Teor de água.....	35
3.6.	Razão de umidade	36
3.7.	Teor de água de equilíbrio higroscópico	37
3.8.	Coefficiente de difusão efetiva	39
3.9.	Propriedades termodinâmicas de secagem	40
3.10.	Sistema de resistência.....	41
3.11.	Delineamento experimental e análise estatística.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1.	Isotermas de sorção	45
4.2.	Cinética de secagem.....	53
4.3.	Coefficiente de difusão efetiva	64
4.4.	Propriedades termodinâmicas de secagem	66
4.5.	Sistema de resistência.....	70
5.	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

O arroz é considerado um alimento importante para a nutrição humana, em virtude da sua rica constituição de carboidratos e moderadas quantidades de proteínas, lipídios, vitaminas e minerais. É consumido por pelo menos dois terços da população mundial. Atualmente, a cultura tem relevância econômica e social no Brasil, visto que é produzida em praticamente todo o território nacional, em diferentes sistemas de cultivo, com estimativa de produção para a safra 2019/2020 de 10,9 milhões de toneladas de arroz em casca (CONAB, 2019; ELIAS et al., 2012; HEINEMANN et al., 2005).

O Brasil tem preparo tecnológico para oferecer altas produtividades no decorrer da colheita. Porém, há necessidade da secagem imediata dos grãos de arroz, para evitar a formação de grãos amarelos e ardidos. Este fator tem estimulado o desenvolvimento de métodos que aumentem a eficiência das instalações das unidades de pré-processamento e dos secadores, além de desenvolver novas tecnologias que não interfiram na qualidade final dos grãos.

A secagem de produtos agrícolas, como o arroz, é uma etapa de suma importância. Este processo garante a armazenabilidade dos grãos, uma vez que reduz o teor de água do produto e as perdas quantitativas e qualitativas. Além disso, é a etapa de maior consumo energético nesta cadeia produtiva. Por isso diversos estudos ainda são realizados neste campo, sendo que, muitos deles utilizam a modelagem matemática e a simulação para aprimorar fatores econômicos, ambientais e de qualidade do produto.

O processo de secagem de produtos agrícolas pode ser descrito por modelos matemáticos teóricos, semiempíricos e empíricos. Dentre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, os baseados na difusão é o mais estudado. Estes modelos consideram, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick. O mecanismo da difusão líquida é complexo, devido à diversidade de composição química e de estrutura física dos produtos (ALMEIDA et al., 2020; ARAÚJO et al., 2017; CARVALHO et al., 2018; CUEVAS et al., 2019; SILVA et al., 2019).

Os grãos de arroz em casca são constituídos por estruturas anatômicas diferenciadas em função e composição química. A casca do arroz é uma estrutura de proteção composta por celulose, hemicelulose, lignina e sílica. O farelo de arroz é composto pelo tegumento, camada de aleurona, embrião e pequenas partículas do endosperma; produto rico em proteínas, lipídios, sais minerais e fibras. O endosperma, que é a principal fonte de reserva do grão, rico em amido. Devido à essa diversidade, cada estrutura proporciona influência distinta no processo de difusão da água, durante a

secagem. Recentemente, Dias (2017) relacionou o coeficiente de difusão efetivo de cada estrutura anatômica de frutos de café natural com a resistência imposta por cada estrutura no processo de secagem.

Portanto, o conhecimento das propriedades intrínsecas de cada estrutura anatômica do arroz em casca, a relação de interdependência e a interação entre elas pode propiciar o desenvolvimento de novas estratégias de secagem. Assim, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a resistência à saída de água imposta pelas partes que compõem o arroz em casca, observando qual a influência de cada componente anatômico no processo de secagem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Arroz – aspectos gerais

O arroz é uma planta herbácea pertencente à família Poaceae (família das gramíneas), que necessita de calor e umidade para crescer. Pode medir de 0,30 a 1,80 m de altura, tem pontos de floração e hastes arredondadas, nas quais são produzidos os grãos de arroz. As espécies do gênero *Oryza*, em geral, estão distribuídas em quase todos os continentes, incluindo espécies silvestres, híbridos naturais, cultivares comerciais, variedades tradicionais, mutantes e linhagens de programa de melhoramento genético. Possui 21 espécies silvestres e apenas 2 cultiváveis comercialmente. As duas espécies cultiváveis são *Oryza sativa* L. e *Oryza glaberrima* Steud. A primeira pressupõe-se ser originária da Ásia e a segunda, da África Ocidental (FONSECA et al., 2006; MCLEAN et al., 2002).

O arroz (*Oryza sativa* L.) é consumido por mais da metade da população mundial, principalmente como fonte de carboidratos e proteínas (ZIEGLER et al, 2018). A demanda mundial do arroz beneficiado está na ordem de 469 milhões de toneladas e mostra crescimento constante (Tabela 1). Os estoques situam-se atualmente na faixa de 249 milhões de toneladas e vem crescendo progressivamente.

Tabela 1 – Oferta e demanda mundial e nacional de arroz beneficiado, em milhões de toneladas.

Safr	2015/16		2016/17		2017/18		2018/19	
	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil
Estoque Inicial	198,2	0,96	208,9	0,43	219,5	0,71	237,8	0,67
Produção	710,0	10,60	733,2	12,33	739,0	12,06	746,4	10,60
Consumo	684,7	11,43	700,5	12,02	707,7	11,24	718,3	11,20
Demanda	475,8	11,00	481,0	11,31	469,9	10,57	269,0	10,73
Estoques Finais	208,9	0,43	219,5	0,71	237,8	0,67	249,3	0,47

Fonte: USDA (2019).

A estimativa de produção de arroz no Brasil para a safra 2019/2020 é de até 10.918,8 mil toneladas de arroz em casca. Os principais estados produtores no país são Rio Grande do Sul e Santa Catarina que produzem cerca de 79,80% do arroz nacional. O estado de Minas Gerais, em 1990, chegou a produzir 7,8% da produção de arroz nacional, porém, na safra 2019/2020, sua produção corresponde a apenas 0,090% (CONAB, 2019).

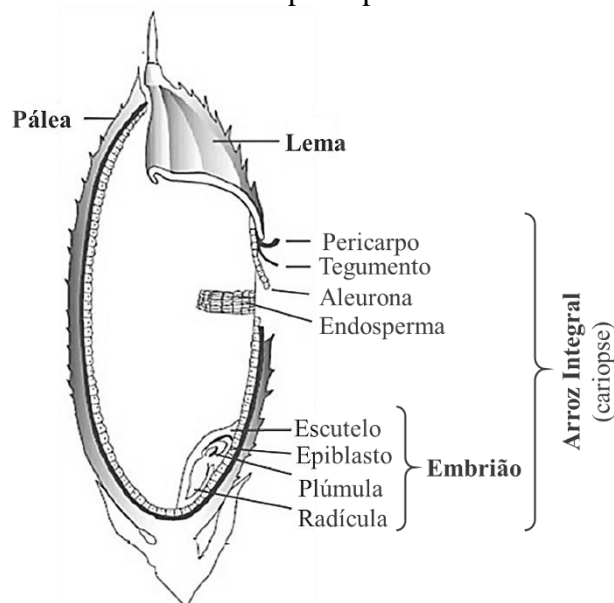
Em Minas Gerais, seguindo a tendência das últimas décadas, o cultivo de arroz vem sofrendo constante declínio no estado. A área de plantio estimada para a safra atual

é de 3,5 mil hectares. Dentre os principais fatores que motivam o declínio da cultura no estado apresenta-se a baixa rentabilidade, os elevados riscos devido ao clima e as restrições de cunho ambiental devido ao plantio em Áreas de Preservação Permanente, restrição hídrica e carência de mão-de-obra. O estado possui estimativa de produção para a safra 2019/2020 de 9,6 mil toneladas de grãos de arroz em casca (CONAB, 2019).

2.1.1. Anatomia e composição química dos grãos de arroz

Para entender as características nutricionais do arroz, é necessário saber que este cereal é composto por: (i) casca: constituída pela pálea e lema; (ii) cariopse: constituída pelo pericarpo, tegumento, camada de aleurona, endosperma de amido e embrião; (iii) embrião: que é composto pelo escutelo, epiblasto, plúmula e radícula (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008). Industrialmente, o arroz em casca é dividido em grão (endosperma), farelo (pericarpo + tegumento + camada de aleurona + embrião + pequenas partículas do endosperma) e casca (pálea + lema). Todas as estruturas que compõem o grão de arroz em casca são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Grão de arroz e suas principais estruturas anatômicas.



Fonte: MCLean et al. (2002) adaptado por Katsurayama & Taniwaki (2017).

A casca, composta de duas folhas modificadas, a pálea e a lema, corresponde a cerca de 20 a 23% da massa do produto. Possui como principal função proteger o fruto contra o ataque de insetos e fungos. Constitui um resíduo de bom valor energético devido ao seu alto poder calorífico, aproximadamente $16.720 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Por apresentar custo praticamente nulo à indústria, vem cada vez mais substituindo a lenha empregada na

geração de calor e de vapor, necessários para os processos de secagem e parboilização dos grãos de arroz. Sobre sua constituição química, os principais componentes da casca de arroz são celulose (45%), hemicelulose (19%), lignina (19,5%) e sílica (15%) (CIENITEC, 1986; DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001; FERRAN et al., 2006; WEBER, 1995). Celulose e hemicelulose são polissacarídeos que desempenham função estrutural nas paredes celulares (FENNEMA, 1976), e lignina é um polímero derivado de unidades fenilpropanóides, repetidas de forma irregular, que têm sua origem na polimerização desidrogenativa do álcool coniferílico, apresentando-se intimamente ligado à celulose e outros compostos (SALIBA et al., 2001). Estes compostos têm a característica de apresentarem a insolubilidade em água.

O farelo, composto pelo pericarpo, tegumento, camada de aleurona, embrião e pequenas partículas do endosperma, é obtido no processo de brunimento a partir do arroz descascado, correspondendo entre 5 e 8% do grão (SILVA; SANCHES; AMANTE, 2006). O farelo de arroz contém 12,25% de proteína, 11,6% de lipídeos, 43,25% de carboidratos, 13% de fibra bruta, 10,2% de cinzas, 104,69 mg% de cálcio e 14,71 mg% de fósforo, segundo Moro et al. (2004).

As principais proteínas encontradas no farelo de arroz são as albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas. Essa classificação é apresentada de acordo com a solubilidade da proteína, sendo, apenas solúveis em água as albuminas (SILVA et al., 2001). Os lipídios, dentre outros atributos, caracterizam-se pela insolubilidade em água (hidrofobia) e solubilidade em solventes orgânicos. A fibra é uma substância formada por vários componentes químicos de composição conhecida, porém com uma estrutura tridimensional variada e pouco conhecida. No seu aspecto químico, a fibra é composta pela celulose, hemicelulose e lignina, embora este último trata-se de um composto fenólico e não carboidrato (ALVES et al., 2016).

O endosperma forma a maior parte do grão integral, de 89 a 94 %, sendo constituído por células ricas em grânulos de amido e de alguns corpos proteicos (WALTER; MARCHEZAN; ÁVILA, 2008). Os grânulos de amido são compostos basicamente de dois polissacarídeos a amilose (de cadeia linear) e amilopectina (de cadeia ramificada). Na conformação amilose e amilopectina, as cadeiras ficam rígidas tornando a cadeia curva ao invés de linear, como na celulose. Este arranjo produz estruturas compactas e helicoidais produzindo grânulos densos que podem ser visualizados em muitas células (FERREIRA et al., 2009). Amido é altamente hidratado devido à quantidade de hidroxilas, que são pontos de polaridade, e formam ligações de hidrogênio com a água (FRANCISCO JUNIOR, 2008).

A composição química do arroz varia em função das condições de pré-armazenamento, de armazenamento, da variedade e do sistema de beneficiamento (AMATO & ELIAS, 2005). O arroz em casca é constituído de proteínas (6,7 a 8,3 %), lipídios (2,1 a 2,7%), cinzas (3,4 a 6,0%) e carboidratos (70,5 a 84,2%). Após o beneficiamento, o grão de arroz pode apresentar diferentes constituições nutricionais conforme seu processamento, sendo apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição centesimal média (% na matéria seca) de arroz submetidos a diferentes processamentos (arroz brunido, arroz parboilizado brunido e arroz integral)

Constituinte	Arroz Brunido	Arroz Parboilizado Brunido	Arroz Integral
Amido digestível	84,5 a	80,7 b	70,6 c
Amilose	22,7 ns	19,3 ns	19,3 ns
Amido resistente	3,08 c	4,38 a	3,52 b
Proteína bruta	8,94 ns	9,44 ns	10,5 ns
Matéria mineral	0,30 c	0,67 b	1,15 a
Extrato etéreo	0,36 b	0,69 b	2,52 a
Fibra total	2,87 c	4,15 b	11,8 a
Fibra insolúvel	1,05 b	1,63 b	8,93 a
Fibra solúvel	1,82 b	2,52 ab	2,82 a

* Letras distintas entre as médias dos constituintes químicos (entre colunas) indicam diferença significativa ($p < 0,05$) por Tukey.

Fonte: adaptado de Stork, Silva e Comarella (2005).

2.2. Teor de água de equilíbrio

Os grãos possuem a propriedade de higroscopicidade, que consiste na capacidade de ceder ou absorver água do ar que os envolve. Segundo Milman (2002), esta habilidade de realizar trocas varia diretamente em função da temperatura e da umidade relativa do ar envolvente, sendo que a umidade relativa tem uma influência mais acentuada do que a temperatura; e o teor de água de equilíbrio dos grãos depende: da temperatura e da umidade relativa do ar, da variedade, do grau de maturidade e das condições prévias a que o grão foi submetido. No equilíbrio higroscópico não há igualdade nos conteúdos de água e, sim, uma igualdade nas pressões de vapor (P_v).

Assim se:

- i. $P_v \text{ grão} < P_v \text{ ar}$: o grão sorve umidade do ar (adsorção)
- ii. $P_v \text{ grão} > P_v \text{ ar}$: o grão cede umidade para o ar (dessorção)
- iii. $P_v \text{ grão} = P_v \text{ ar}$: equilíbrio higroscópico.

Quando ocorre o equilíbrio higroscópico, a atmosfera apresenta uma pressão parcial de vapor (P_v) e os grãos uma determinada quantidade de água, denominada teor

de água de equilíbrio (U_e). Para uma mesma temperatura e pressão, a atmosfera possui uma pressão de vapor máxima conhecida como pressão de vapor de saturação (P_{v_s}). Na condição de equilíbrio, e considerando que o vapor d'água é um gás perfeito, a atividade de água (a_w) pode ser numericamente definida como sendo a razão entre a pressão parcial de vapor d'água (P_v), na condição de equilíbrio, e a pressão de vapor de saturação (P_{v_s}) para a mesma temperatura (T) e pressão atmosférica (P) (BORÉM, 2008).

$$a_w = \left(\frac{P_v}{P_{v_s}} \right)_{T,P} = \frac{\text{U.R. \%}}{100} \quad (1)$$

Em que, a_w = atividade da água (adimensional); U.R. = umidade relativa do ar (%).

Deve-se enfatizar, em relação ao conceito de atividade de água, que nas soluções está relacionado ao potencial químico da água ligada aos sistemas, ou seja, expressa a forma como a água está disponível para participar de reações químicas, bioquímicas e no desenvolvimento fúngico, e umidade relativa está relacionado à pressão parcial de vapor de água na atmosfera; então, mesmo se houver uma correlação estrita entre atividade de água e umidade relativa, ambos os conceitos são bem diferentes (MULTON; BIZOT; SAVET, 1980).

A dependência do teor de água de equilíbrio de determinado produto com a umidade relativa e temperatura de equilíbrio, pode ser expressa por equações matemáticas, que são denominadas isotermas de sorção ou curvas de equilíbrio higroscópico (CORRÊA et al., 2014). As condições do ar na secagem com ar ambiente não são constantes, o que torna a determinação das isotermas de equilíbrio indispensável à avaliação da interação do sólido com o vapor d'água presente no ar de secagem (LEHN & PINTO, 2004). O comportamento das isotermas de sorção é ainda necessário para se conhecer bem a sua relação com as características físicas, químicas e de estabilidade dos produtos desidratados ou parcialmente desidratados (HUBINGER et al., 2009; SILVA & RODOVALHO, 2012), como também as faixas de atividade de água no produto, que reduzam a possibilidade de desenvolvimento de fungos e outros patógenos, além de manter a qualidade do produto armazenado (GONELI et al., 2007; SILVA et al., 2015).

A atividade de água descrita por modelos matemáticos contribui para prever fenômenos que envolvem a troca de vapor de água e manter a qualidade dos produtos agrícolas. Além disso, estudos sobre isotermas ajudam a compreender as relações entre o

teor de água e umidade relativa do ar, em dada temperatura, nas operações de pós-colheita como secagem e armazenamento (CAVALCANTE et al., 2018).

A determinação das isotermas de sorção de um material pode ser efetuada, medindo-se a variação de umidade do material ou do meio em que este se encontra, por meio dos métodos gravimétrico (variação da massa do material) e higrométrico (variação da umidade relativa do ar circundante). Tais métodos podem, ainda, apresentar uma variante quanto à movimentação do ar ambiente, podendo ser: estático, no qual o ar que circunda o material está sob condições estáticas, ou dinâmico, no qual o fluido gasoso está sendo movimentado, mecanicamente. A vantagem do método estático refere-se à maior facilidade em obter condições termodinâmicas constantes.

A determinação e modelagem de isotermas de sorção, em diferentes temperaturas, são essenciais para definir limites de desidratação, estimar mudanças no teor de água do produto quando armazenado a determinada temperatura e umidade relativa do ar ambiente (CHAVES et al., 2015). Um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas têm sido propostas para estimativa do teor de água de equilíbrio de materiais biológicos. Os modelos teóricos, consideram condições externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem e os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. Os modelos empíricos e semi-empíricos, consideram apenas as condições externas ao produto e baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições são isotérmicas e que a transferência de água se restringe à superfície do produto (ANDRADE & BORÉM, 2008).

Diversos modelos têm sido ajustados as isotermas de sorção de produtos agrícolas. Dentre eles, estão os modelos de Chung Pfof, Copace, GAB modificado, Halsey modificado, Henderson, Henderson modificado, Oswin, Sabbab e Sigma Copace. Estes modelos matemáticos foram empregados para estudar a higroscopicidade de castanha do Brasil (BOTELHO et al., 2019), polpa de cajá (CAVALCANTE et al., 2018), pinhão manso (CHAVES et al., 2015), mamona (GONELI et al., 2016), trigo (GRANELLA et al., 2019), semente de pêra (HASSINI et al., 2015), fruto de baru (OLIVEIRA et al., 2017a), arroz em casca (OLIVEIRA et al., 2014), semente de pimenta (SILVA et al., 2015), niger (SIQUEIRA et al., 2018), milho (SMANIOTTO et al., 2012), sorgo (ULLMANN et al., 2016), tecidos do perisperma e endosperma do café (DIAS, 2017).

2.3. Secagem

O arroz é uma cultura sazonal, portanto, necessita de armazenamento na entressafra. Os grãos, quando se apresentam fisiologicamente maduros e prontos para a colheita, exibem teor de água entre 18 e 23% base úmida (b.u.), dependendo da variedade. A secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e a estabilidade de grãos e sementes durante o armazenamento e deve ser realizada imediatamente após a colheita. Quanto maior o intervalo entre a colheita e a secagem, maiores serão as perdas na qualidade como a incidência de quebrados, trincamentos e defeitos de origem biológica como os manchados, picados, amarelos e ardidos (ELIAS, 2003; ELIAS, 2004; MOHANTY, 2013).

A utilização da secagem como forma de propiciar a conservação dos grãos. Microrganismos e todo o mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades. Dessa forma, com a redução da quantidade de água disponível, por meio da secagem, até níveis seguros para o armazenamento, são reduzidas a atividade de água, a taxa das reações químicas no produto e o desenvolvimento de microrganismos. O nível seguro de teor de água para se armazenar o arroz durante um ano é de 13% (b.u.) e para períodos superiores a um ano é de 12% (b.u.) (BOTELHO et al., 2018; GONELI et al., 2007; LAZZARI, 1993).

Lima et al. (2013) enfatizaram 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 microrganismos e insetos, permitindo também a formação de estoques e propiciando ao produtor melhores preços no período de entressafra.

2.3.1. Teoria da secagem

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água, contida no grão por meio de evaporação, geralmente, causada por convecção forçada de ar aquecido. Numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos. Dependendo do produto que a água pode movimentar-se no seu interior por mecanismos

diferentes durante a secagem. Dentre os diversos mecanismos prováveis, tem-se (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992):

– *Difusão líquida*: a definição deste termo foi introduzida por Lewis e assume que a taxa de transferência de umidade é proporcional ao gradiente de concentração de umidade dentro do produto.

– *Difusão de vapor*: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura.

– *Escoamento de líquido e vapor*: ocorre devido à diferença de pressão e de gradiente de concentração.

Em geral, cada mecanismo predominar por um dado período do processo de secagem, sendo substituído por outro no período seguinte. Todos estes fatores, tais como, teor de água inicial do material, teor de água final que o material pode chegar (teor de água de equilíbrio), a relação entre a água e a estrutura do sólido e a relação entre o transporte de água do interior à superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

Durante a secagem, a redução do teor de água ocorre por diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. Para que ocorra secagem do produto, é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua superfície seja maior do que a pressão de vapor do ar de secagem. Para que o processo seja realizado de forma rápida, o ar é aquecido para ser usado como elemento de entrega de calor aos grãos ao mesmo tempo que extrai a água do produto (PABIS; JAYAS; CENKOWSK, 1998).

A temperatura mais elevada produz maior força motriz para a transferência de calor e massa. Assim, ocorre aumento da pressão de vapor na amostra, favorecendo a remoção de água do seu interior para a superfície, o que, por consequência, reduz o tempo de secagem. Apesar do aumento de temperatura reduzir o tempo de secagem, sabe-se que tanto uma condição térmica elevada, quanto a exposição excessiva ao calor podem degradar componentes termossensíveis do arroz (ARAL & BEŞE, 2016; NIAMNUY et al., 2011; SANTOS et al., 2019b; UDOMKUN et al., 2015).

2.3.2. Cinética de secagem

O estudo da cinética de secagem de produtos agrícolas é de suma importância, para selecionar a combinação de temperatura de secagem e tempo necessário para o

processo, podendo obter um produto de melhor qualidade, pois é possível o melhor controle de fatores que podem danificar o produto (AVHAD & MARCHETTI, 2016).

A taxa de secagem é a relação entre a quantidade de água que é perdida pelo produto em certo período de tempo. A taxa de secagem é influenciada por fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem e teor de água inicial. A falta do controle desses fatores pode comprometer a qualidade final (BORÉM, 2008). Em determinados produtos, o processo de secagem, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, pode ser dividido em um período de taxa constante e outro de taxa decrescente.

No período de taxa constante, a superfície do material é mantida em um nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água livre evaporando. Se o sólido for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período é mantido enquanto a quantidade de umidade transportada à superfície for a mesma que é evaporada nesta mesma superfície. As resistências à transferência de calor e massa são ocasionadas somente pelas condições da corrente de ar. Assim a taxa de evaporação de água não varia com o tempo. 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 do teor de água deste ponto é denominado teor de água crítica. Os valores de umidade crítica não são somente característicos de cada material alimentício, 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 (CHIRIFE, 1983; GEANKOPLIS, 1983).

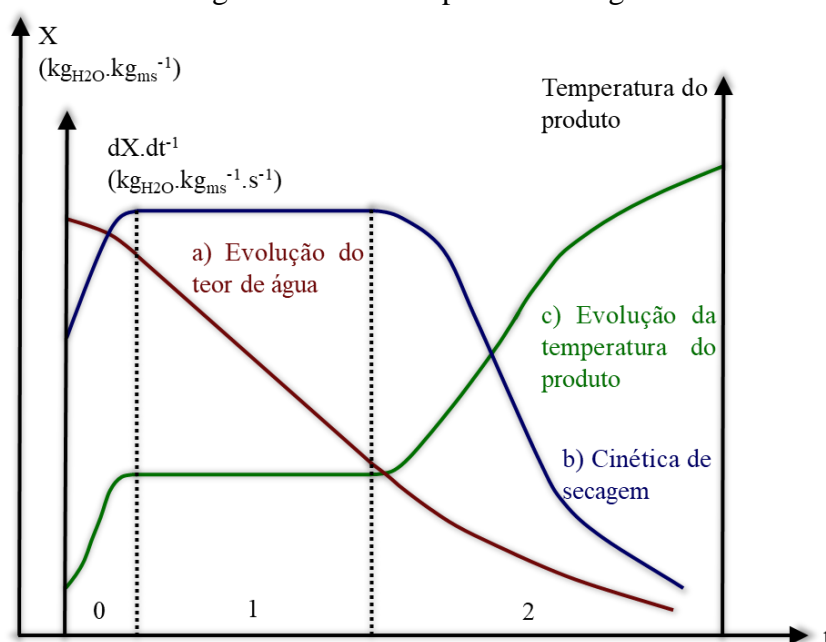
Os grãos de produtos agrícolas, em geral, apresentam o período de secagem com taxa constante muito curto, ou inexistente, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície. Isto se deve basicamente às diferentes velocidades da migração das moléculas de água do interior para a periferia do produto e a de evaporação das moléculas de água da superfície (CORRÊA et al., 2010).

No período de taxa decrescente de secagem, a taxa interna de transporte de água é menor do que a evaporação superficial. Quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir há redução progressiva da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a taxa de secagem também diminui, até que, ao final desse período, o produto está em equilíbrio com o ar (equilíbrio entre as pressões parciais de vapor) e a velocidade de secagem torna-se nula. Dessa forma, a transferência de calor

do ar para o produto não é compensada e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem. Nesta fase ocorrem os maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos (BORÉM, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; PARK; BROD; ALONSO, 1999).

Na Figura 2, pode ser observada a curva típica de secagem, em que são representadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), da temperatura (T) e da taxa de secagem ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar com propriedades constantes.

Figura 2 – Curvas típicas de secagem.



Fonte: adaptado de Park et al. (2007)

A curva (a) representa a variação do teor de água do produto (X), no decorrer da secagem, em relação ao tempo de secagem (t). A curva (b) representa a taxa de secagem, variação do teor de água do produto em relação ao tempo, $dX \cdot dt^{-1}$. A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante o tempo de secagem.

Segundo Carvalho et al. (2018), com o aumento da temperatura do ar de secagem, há uma maior taxa de remoção de água dos grãos em um menor espaço de tempo, ou seja, o teor de água dos grãos diminui acentuadamente em consequência do aumento da temperatura, como observado pelos autores para grãos de girassol, por Furtado et al. (2019) para polpa de jabuticaba e Santos et al. (2019b) em fatias de acuri.

O princípio da secagem em altas temperaturas envolve o estabelecimento de um gradiente de umidade entre a superfície e o centro do grão através da evaporação nas camadas mais externas. Dessa forma, a parte interna permanece mais úmida que a

superficial, o que desenvolve tensões internas no grão. Quanto maior for o gradiente formado, maiores serão as tensões internas e, conseqüentemente, maiores serão os riscos de danos físicos e fisiológicos no produto (ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

Diferentes teorias procuram explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O principal objetivo é descrever como a água é transferida do interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem são dois: os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos. A formulação desses modelos, desenvolvida a partir da análise de comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de transporte constantes, possibilitando uma descrição similar da taxa de secagem (MAYTA; MASSARANI; PINTO, 1996).

2.3.3. Modelagem matemática e simulação da secagem

A representação matemática do processo de secagem de diversos produtos agrícolas vem, já há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que ocorrem durante este processo. Inúmeros modelos matemáticos têm sido estudados com o objetivo de projetar, controlar e otimizar processos secagem. A simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos. O uso de modelos matemáticos, no decorrer da secagem, contribui para a execução dos projetos e dimensionamento dos equipamentos, bem como a compreensão dos processos relacionados (CORRÊA et al., 2011; COSTA et al., 2015a; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010; ROCHA et al., 2005).

Existem diferentes tipos de modelos do processo de secagem, todos eles têm a variável temporal. A complexidade do processo depende, entre outras coisas, da espessura da camada do material, pode-se então classificá-los em modelos de camada fina e de camada espessa. Os modelos de camada fina não consideram a variável espacial. Nestes modelos, toda a massa de grãos a ser secada está sob condições uniformes, ou seja, os parâmetros dos grãos (teor de água e temperatura) e do ar (umidade relativa e temperatura) em todo o volume considerado são iguais, em cada instante de tempo. Os modelos de camada espessa são de uma, duas ou três dimensões e os parâmetros mencionados acima variam conforme a posição considerada. Para simplificar o problema,

as vezes o leito de grãos é considerado como uma sequência de camadas finas ortogonais ao fluxo principal de ar ou com um conjunto de dimensões reduzidas (elementos finitos e volumes finitos) para os quais parâmetros do grão e do ar sofrem variações consideráveis (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Estes modelos podem ser descritos por diferentes métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos). As equações empíricas possuem uma relação direta entre o conteúdo de água no produto e o tempo de secagem. As semiempíricas são análogas à lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu o respectivo teor de água e de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. As equações teóricas, geralmente, levam em consideração a difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto.

Diversos modelos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles, estão os modelos de Midilli (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002), de Page (PAGE, 1949), de Thompson (THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968), de Verma (VERMA et al., 1985), de Henderson e Pabis (HENDERSON & PABIS, 1961), de Henderson e Pabis modificado (KARATHANOS & BELESSIOTIS, 1999), de dois termos (HENDERSON, 1974), de exponencial de dois termos (SHARAF-ELDEE; BLAISDELL; HAMDY, 1980), de Newton (LEWIS, 1921), de Wang e Singh (WANG & SINGH, 1978) e de Valcam (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2013). Estes modelos matemáticos foram empregados para estudar a cinética de secagem de soja (BOTELHO et al., 2018), girassol (CARVALHO et al., 2018), banana (COELHO et al., 2019), crambe (COSTA et al., 2015a), arroz em casca (FOROUGH-DHAR et al., 2014; MENEGHETTI et al., 2012), jabuticaba (FURTADO et al., 2019), milho (OLIVEIRA et al., 2012), fruta pão (RESENDE et al., 2019), acuri (SANTOS et al., 2019b).

A simulação se baseia em modelos, ou seja, em conjuntos de suposições, geralmente na forma de relações lógicas ou matemáticas, utilizadas para descrever como um sistema se comporta. A credibilidade da simulação somente é alcançada através da validação da mesma, ou seja, se o modelo avaliado representa com acurácia um fenômeno físico real, e para isso, é necessária sua comparação com dados experimentais (SILVA, 2016).

2.4. Resistência à desidratação

O estudo da resistência à desidratação vem sendo utilizado como um novo fator de aprimoramento do estudo do processo de secagem. Recentemente, Dias (2017) desenvolveu um modelo matemático que avalia a resistência à desidratação na cinética de secagem de café natural. Em que foi comprovado que cada componente anatômico do café imprime resistência à desidratação numericamente diferente no processo de secagem.

Dentre os diferentes índices usados para avaliar a cinética de secagem dos produtos agrícolas, o coeficiente de difusão é um dos mais importantes. Esse índice possibilita avaliar e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Além disso, por meio de análise da dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, pode-se determinar alguns índices termodinâmicos que possibilitam analisar energeticamente o processo de secagem (BOTELHO et al., 2015; BOTELHO et al., 2018).

O coeficiente de difusão descreve a velocidade de saída de água do produto submetido ao processo de secagem e envolve os efeitos de todos os fenômenos que podem interferir sobre a migração da água, visto que seu valor é obtido por meio do ajuste de valores experimentais. Como a difusividade pode alterar, à medida que mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material. Sendo assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA; OLIVEIRA; PARK, 2006).

Santos et al. (2019b) comprovaram que a elevação da temperatura de secagem aumenta o coeficiente de difusão efetiva. Esse fenômeno se deve ao fato de que em temperaturas mais elevadas a energia cinética das moléculas de água é acelerada em virtude da maior energia de aquecimento (ARAL & BEŞE, 2016; DENG et al., 2017; SANTOS et al., 2014). Além disso, Corrêa et al. (2010) destacaram que à medida que a temperatura de secagem é aumentada, a viscosidade da água é reduzida, afetando diretamente a resistência do fluido ao escoamento, ou seja, a redução da viscosidade da água promove maior facilidade da difusão das moléculas de água.

A partir do uso do modelo da difusão, podem-se determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas no fenômeno de desidratação, a exemplo da entalpia, da entropia e da energia livre de Gibbs (ARAÚJO et al., 2017). O conhecimento das propriedades termodinâmicas na secagem é importante fonte de informação para projetar equipamentos, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades

da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como para o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos mesmos (CORRÊA et al., 2010).

A energia de ativação é determinada como a capacidade que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto. E assim compreende-se que nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (CORRÊA et al., 2006). Skaar & Babiak (1982) equacionaram a relação entre a energia de ativação e o coeficiente de resistência, ou seja, relacionaram a energia que a molécula de água necessita ultrapassar para movimentar-se com a resistência imposta pelo produto para que ocorra sua migração.

Dessa forma, por meio da determinação do coeficiente de difusão e da energia de ativação do processo de secagem, apresentados pelas estruturas que compõem o arroz em casca, estes parâmetros podem ser utilizados para o desenvolvimento de modelos que descrevam a resistência imposta por cada componente anatômico à saída de água.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do experimento

O presente trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola e Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras em Lavras - Minas Gerais. Foram utilizados grãos de arroz (*Oryza sativa* L.), safra 2018/2019, do cultivar IRGA 424 RI, produzidos no município de Heliódora, MG, Brasil, latitude 22°04'01"S, longitude 45°32'31"O e altitude 820 m. Foram colhidos mecanicamente, 45kg de arroz com teor de água de aproximadamente 0,30 kg_{água}.kg_{ms}⁻¹. Após a colheita, foi realizada a limpeza e seleção da amostra, de forma manual com auxílio de pinça. Foram retirados da amostra grãos mal granados (chocos) e verdes (imaturos), assim como, materiais estranhos e impurezas (folhas, talos, flores, insetos e pedras).

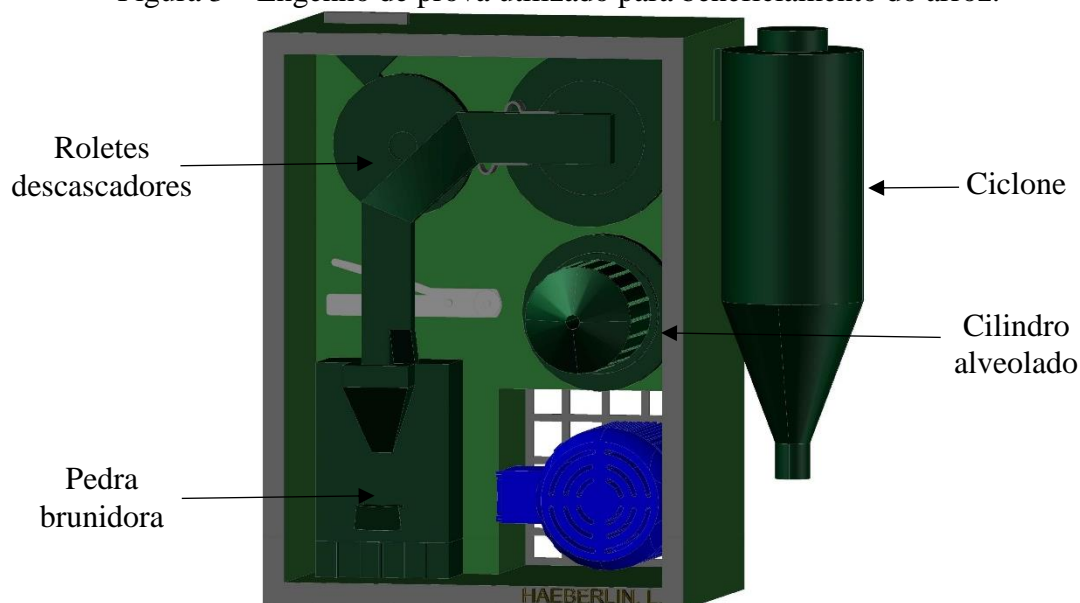
3.2. Beneficiamento dos grãos de arroz

O beneficiamento foi realizado em um engenho de prova de arroz, apresentado na Figura 3, localizado na Usina de Beneficiamento de Sementes do Setor de Sementes do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras, com a finalidade de obter as partes anatômicas para a realização da secagem compartimentada. Este equipamento é composto por roletes descascadores, os quais realizam pressão nos grãos para que os mesmos sejam descascados; pedra brunidora, que por meio de abrasão realiza o brunimento dos grãos de arroz já descascados; cilindro alveolado (A1) que realiza a separação de grãos inteiros e grãos quebrados; ciclone para captação de cascas e farelo.

Por meio do descascamento de grãos de arroz em casca foram obtidas as amostras de casca do arroz e grãos de arroz integral. Através do descascamento seguido de brunimento foram obtidas as amostras de grãos de arroz brunido e de farelo do arroz. Para proporcionar maior uniformidade das amostras de grãos de arroz integral e brunido foi realizada a separação de grãos inteiros e grãos quebrados no cilindro alveolado. Por fim foi realizado o peneiramento (20 mesh) das amostras de farelo de arroz para uniformizar a granulometria da mesma.

O descascamento de 0,100kg de arroz foi realizado no período de 20s e a separação de grãos inteiros e grãos quebrados por um período de 1min15s. O período para o brunimento foi estipulado para garantir a retirada de 7% de massa dos grãos de arroz.

Figura 3 – Engenho de prova utilizado para beneficiamento do arroz.



Fonte: Da autora (2020).

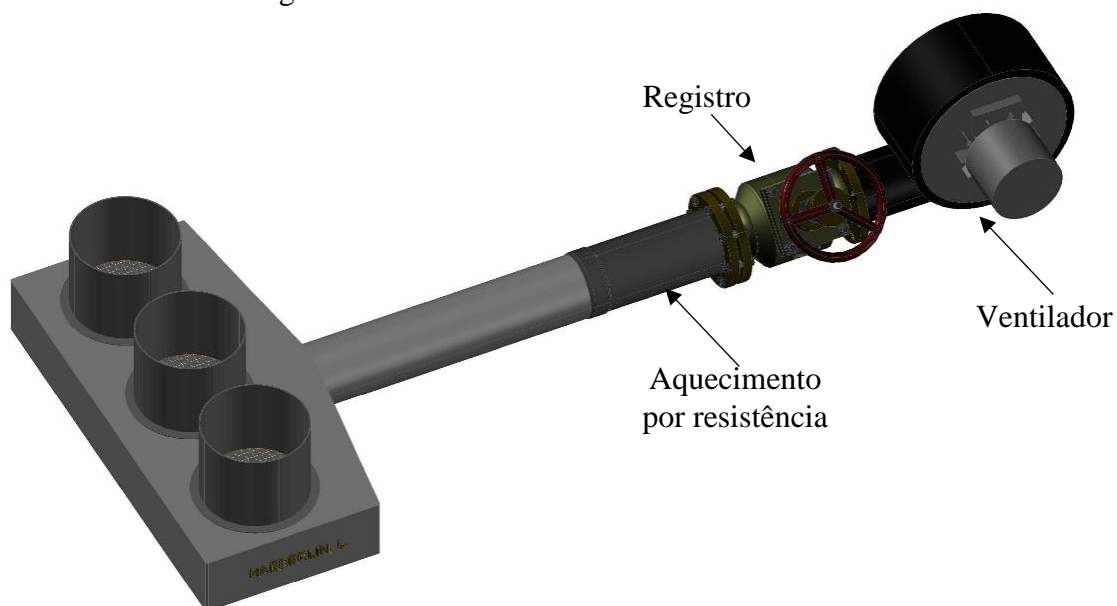
Após o beneficiamento foi realizada a secagem de grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, casca do arroz e farelo do arroz.

3.3. Sistema de secagem

O sistema de secagem foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras. A secagem das amostras de grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, casca do arroz e farelo do arroz foi realizada em secador de leito fixo (Figura 4), em triplicata, em camada de aproximadamente 0,03m. Foram utilizadas cinco temperaturas de secagem, $35\pm 1^{\circ}\text{C}$, $45\pm 1^{\circ}\text{C}$, $55\pm 1^{\circ}\text{C}$, $65\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $75\pm 1^{\circ}\text{C}$, aferidas experimentalmente por termômetro de mercúrio em todo processo de secagem. O fluxo do ar de secagem foi de $10\text{m}^3.\text{min}.\text{m}^{-2}$ foi aferido por anemômetro digital de hélice.

Aproximadamente cem gramas de grãos de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido e casca de arroz foram acondicionados durante a secagem em sacos de tecido poroso não higroscópico (tipo voil). Já o farelo de arroz, com aproximadamente trinta gramas, foi acondicionado em placas de petri com 0,015m de diâmetro envoltos em tecido poroso não higroscópico (tipo voil). Esta forma de acondicionamento foi utilizada devido a granulometria do farelo. As amostras durante o processo da secagem estão apresentadas na Figura 5.

Figura 4 – Secador de leito fixo de bancada.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 5 – Acondicionamento das amostras durante a secagem.



Fonte: Da autora (2020).

Durante o processo de secagem, foi realizado o acompanhamento gravimétrico das amostras para a determinação das curvas de secagem experimentais que, consiste em determinar a massa das amostras em intervalos de tempo pré-determinados. Para as amostras de grãos de arroz em casca, arroz integral e arroz brunido os intervalos de tempo pré-determinados foram: a cada meia hora, nas duas primeiras horas de secagem; a cada uma hora, nas próximas sete horas seguintes; a cada duas horas, nas próximas quatorze horas seguintes; a cada três horas, até completar trinta e cinco horas de secagem. Para as amostras de farelo de arroz e casca de arroz os intervalos de tempo pré-determinados foram: a cada dez minutos, nas três primeiras horas; a cada meia hora, nas próximas quatro horas. O processo de secagem foi finalizado quando as amostras apresentaram variação de 1×10^{-6} kg em três pesagens consecutivas.

3.4. Contração volumétrica

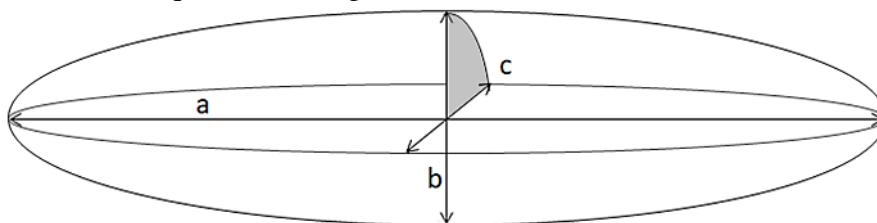
A contração volumétrica dos grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, casca do arroz e farelo do arroz foi determinada, por meio de medidas com paquímetro digital, das dimensões no início, durante e ao final da secagem. Com estas medidas, foi possível estimar e equacionar a contração volumétrica, em função do teor de água e de diferentes condições do ar de secagem, para cálculo do coeficiente de difusão efetiva utilizado como parâmetro do coeficiente de resistência à desidratação.

Considerando a forma do grão de arroz um esferoide prolato, o volume dos grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral e grãos de arroz brunido foram obtidos por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura, conforme apresentado na Figura 6), em 10 grãos ao longo do processo de secagem, com auxílio de um paquímetro digital, de acordo com a expressão proposta por MOHSENIN (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{6} \quad (2)$$

Em que: V_g – Volume do grão, m^3 ; a – maior eixo do grão, m ; b – eixo médio do grão, m ; c – menor eixo do grão, m .

Figura 6 – Desenho esquemático do grão de arroz com suas dimensões características.



Fonte: Da autora (2020).

O volume da casca de arroz foi determinado conforme a Equação 3. A espessura da casca foi determinada por paquímetro digital pela medição da espessura de 10 cascas ao longo do processo de secagem.

$$V = \left(\frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{6} \right) - \left[\frac{\pi \cdot (a-e) \cdot (b-e) \cdot (c-e)}{6} \right] \quad (3)$$

Em que: e – Espessura da casca, m.

O volume do farelo de arroz foi determinado conforme a Equação 4. A secagem do farelo foi realizada em uma placa de petri com diâmetro de 0,015m. Dessa forma o volume de farelo foi determinado pelo volume do cilindro que continha a amostra.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot e \quad (4)$$

Em que: r – Raio da placa de petri, m; e – Espessura do farelo na placa de petri, m.

O raio da esfera equivalente (r), utilizado na determinação do coeficiente de difusão efetiva, pela Equação 5:

$$r = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

O índice de contração volumétrica dos materiais foi determinado pela relação:

$$\Psi = \left(\frac{V_0 - V}{V_0} \right) \quad (6)$$

Em que: Ψ – Índice de contração volumétrica, decimal; V – Volume dos grãos para cada teor de água, m³; V₀ – Volume inicial dos grãos, m³.

3.5. Teor de água

O teor de água dos grãos de arroz no início da secagem, final da secagem e início da análise de teor de água de equilíbrio, foram determinados utilizando-se o método padrão de estufa com circulação de ar à temperatura de 105±3°C, durante 24 horas, em duas repetições de acordo com as recomendações da Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Para determinação do teor de água inicial e final das amostras grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, farelo do arroz e casca do arroz, foi utilizado o método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz, em que duas repetições das amostras foram levadas para a estufa de circulação forçada com temperatura de ar a 105±3°C, realizando a pesagem do produto com intervalo de 3 horas até massa constante (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2005).

Os resultados foram obtidos por meio da Equação 7, onde a diferença entre as duas repetições não excedeu 0,5%:

$$U_{b.s.} = \frac{m_a}{m_{ms}} \quad (7)$$

Em que: $U_{b.s.}$ – Teor de água da amostra (base seca), $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$; m_a – massa de água, kg; m_{ms} – massa de matéria seca, kg.

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos grãos de arroz em casca e das suas partes, o acompanhamento da secagem foi realizado por perda de massa (método gravimétrico) utilizando-se uma balança analítica com resolução de 1×10^{-6} kg. A secagem foi finalizada quando as amostras atingiram massa constante. O teor de água no tempo foi determinado de acordo com a Equação 8:

$$U_t = \frac{M_{ai} - (M_{ti} - M_{tt})}{M_{ms}} \quad (8)$$

Em que: U_t – Teor de água no tempo t, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$; M_{ai} – Massa de água inicial, kg; M_{ti} – Massa total inicial, kg; M_{tt} – Massa total no tempo t, kg; M_{ms} – Massa de matéria seca, kg.

3.6. Razão de umidade

Na análise de dados da secagem, a razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A razão de umidade, durante a secagem, para as temperaturas de secagem avaliadas, foi determinada pela Equação 9. Os valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos apresentados na Tabela 3, para todas as temperaturas de secagens testadas, com a finalidade de descrever a cinética de secagem de grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, casca do arroz e farelo do arroz.

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

Em que: RU – Razão de umidade (adimensional); U – Teor de água do produto no tempo t, kg água.kg matéria seca⁻¹; U_e – Teor de água de equilíbrio do produto, kg água.kg matéria seca⁻¹; U_i – Teor de água inicial do produto, kg água.kg matéria seca⁻¹.

Tabela 3 – Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Newton ¹	$RU = \exp(-k.t)$	(10)
Henderson & Pabis ²	$RU = a. \exp(-k.t)$	(11)
Page ³	$RU = \exp(-k.t^n)$	(12)
Wang & Singh ⁴	$RU = 1 + a.t + b.t^2$	(13)
Valcam ⁵	$RU = a + b.t + c.t^{1,5} + d.t^2$	(14)
Midilli ⁶	$RU = a. \exp(-k.t^n) + b.t$	(15)
Dois termos ⁷	$RU = a. \exp(-k_0.t) + b. \exp(-k_1.t)$	(16)
Exponencial de dois termos ⁸	$RU = a. \exp(-k.t) + (1-a). \exp(-k.t)$	(17)
Thompson ⁹	$RU = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4.b.t)^{1/2}}{2.b}\right)$	(18)
Verma ¹⁰	$RU = a. \exp(-k.t) + (1-a). \exp(-k_1.t)$	(19)
Aproximação da difusão ¹¹	$RU = a. \exp(-k.t) + (1-a). \exp(-k.b.t)$	(20)
Henderson & Pabis modificado ¹²	$RU = a. \exp(-k.t) + b. \exp(-k_0.t) + c. \exp(-k_1.t)$	(21)

¹Lewis (1921); ²Henderson e Pabis (1961); ³Page (1949); ⁴Wang e Singh (1978); ⁵Siqueira, Resende e Chaves (2013); ⁶Midilli, Kucuk e Yapar (2002); ⁷Henderson (1974); ⁸Sharaf-Eldee, Blaisdell e Hamdy (1980); ⁹Thompson, Peartt e Foster (1968); ¹⁰Verma et al. (1985); ¹¹Akpinar, Bicer e Yildiz (2003); ¹²Karathanos & Belessiotis (1999);

Em que: RU – Razão de umidade, adimensional; t – Tempo de secagem, h; k, k₀ e k₁ – Constantes de secagem; a, b, c, d, n – Coeficientes dos modelos.

3.7. Teor de água de equilíbrio higroscópico

Os teores de água de equilíbrio higroscópico foram determinados experimentalmente pelo método estático, em triplicata, para os grãos de arroz em casca, grãos de arroz integral, grãos de arroz brunido, casca do arroz e farelo do arroz.

As amostras, com aproximadamente 2 x 10⁻³kg, foram colocadas sob tela de inox dentro de caixas acrílicas, do tipo gerbox, contendo 50ml de soluções salinas saturadas específicas que proporcionaram a atividade de água de acordo com a temperatura (Figura 7). As soluções salinas saturadas feitas conforme Medeiros (2006). As caixas acrílicas foram vedadas por diversas camadas de fita impermeável e acondicionadas dentro de estufa incubadora tipo B.O.D (*Biochemical Oxygen Demand*) regulada nas temperaturas de 20 e 30°C, e acondicionadas dentro de estufa de circulação forçada de ar regulada nas temperaturas de 55 e 70°C.

Figura 7 – Acondicionamento das amostras durante a determinação das isotermas de sorção experimentais.



Fonte: Da autora (2020).

As soluções utilizadas para o experimento e suas respectivas atividades de água de equilíbrio, em função da temperatura do ar ambiente, estão dispostas na Tabela 4 (GREENSPAN, 1977).

Tabela 4 – Atividade de água de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.

Temperatura °C	Sais	Atividade de água (decimal)	
20	Cloreto de Lítio	LiCl	0,1131± 0,0031
	Acetato de Potássio	CH ₃ COOK	0,2311± 0,0025
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	0,5438± 0,0023
	Cloreto de Potássio	KCl	0,8511± 0,0029
30	Cloreto de Lítio	LiCl	0,1131± 0,0031
	Acetato de Potássio	CH ₃ COOK	0,2311± 0,0025
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	0,5438± 0,0023
	Cloreto de Potássio	KCl	0,8511± 0,0029
55	Cloreto de Lítio	LiCl	0,1103± 0,0023
	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	0,2993± 0,0016
	Brometo de Sódio	NaBr	0,5015± 0,0065
	Cloreto de Potássio	KCl	0,8070± 0,0035
70	Cloreto de Lítio	LiCl	0,1075± 0,0033
	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	0,2777± 0,0025
	Nitrato de Sódio	NaNO ₃	0,6604± 0,0078
	Cloreto de Potássio	KCl	0,7949± 0,0057

Fonte: Greenspan (1977).

Para obtenção do teor de água de equilíbrio dos produtos com as condições de temperatura e umidade relativa que foram testadas, foi realizado um acompanhamento gravimétrico, em intervalos de 24h. O equilíbrio higroscópico foi obtido quando a variação entre três pesagens consecutiva foi de 1×10^{-6} kg.

Os valores de teor de água de equilíbrio obtidos para as condições testadas foram ajustados aos modelos matemáticos comumente utilizados para prever o fenômeno de

higroscopicidade de produtos agrícolas. Os modelos utilizados para modelagem das isotermas de sorção estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos agrícolas.

Designação do Modelo	Modelo	Equação
Cavalcanti Mata	$U_e = [\ln(1-a_w)/(-aT^b)]^{1/c}$	(22)
Chen Clayton	$U_e = [-1/(cT^b)] \ln[\ln(a_w)/(-aT^b)]$	(23)
Chang Pfof	$U_e = a - b \ln[-(T+c) \ln(a_w)]$	(24)
Chang Pfof modificado	$U_e = (-1/b) \ln[(T+c) \ln(a_w) / (-a)]$	(25)
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)]$	(26)
Corrêa	$U_e = 1/(aT^b + a_w^c)$	(27)
GAB modificado	$U_e = \{ab(c/T)a_w\} / \{[1 - ba_w][1 - ba_w + b(c/T)a_w]\}$	(28)
Halsey modificado	$U_e = [\exp(a-bT) / -\ln(a_w)]^{1/c}$	(29)
Henderson	$U_e = [\ln(1-a_w)/(-a T_{abs})]^{1/b}$	(30)
Henderson modificado	$U_e = \{\ln(1-a_w)/[-a(T+b)]\}^{1/c}$	(31)
Oswin	$U_e = (a-bT) / [(1-a_w)/a_w]^{1/c}$	(32)
Sabbah	$U_e = a(a_w^b / T^c)$	(33)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\}$	(34)
Smith	$U_e = a - (bT) - c \ln(1-a_w)$	(35)

Fonte: Silva et al. (2015). Em que U_e : teor de água de equilíbrio do produto, b.s.; a_w : atividade de água, decimal; T: temperatura do ar ambiente, °C; T_{abs} : temperatura absoluta do ar ambiente, K; a, b, c, d: parâmetros dos modelos que dependem da natureza do produto.

3.8. Coeficiente de difusão efetiva

Os coeficientes de difusão efetiva de grão de arroz em casca, grão de arroz integral e grão de arroz brunido foram obtidos por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 36, aos dados experimentais. Essa equação é a solução analítica para a segunda Lei de Fick, considerando a forma geométrica teórica de um cilindro infinito, considerando a contração volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de equilíbrio de umidade conhecida na superfície do grão (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left[\frac{-\lambda_n^2 D_{ef} t}{r^2}\right] \quad (36)$$

Em que: RU – Razão de umidade, adimensional; λ_n – Raízes da função de Bessel de ordem zero; n – Número de termos, nesse caso, fez-se a aproximação e cinco termos; D_{ef} – Coeficiente de difusão efetiva, $m^2 \cdot s^{-1}$; t – Tempo, h; r – Raio equivalente, m.

Para a determinação da difusividade efetiva do farelo de arroz, ajustaram-se os dados da secagem das amostras ao modelo matemático da difusão líquida com aproximação por três termos, descrito pela Equação 37, considerando distribuição da água inicial uniforme e ausência de resistência térmica. Esta equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando-se a forma geométrica do produto como forma aproximada a uma placa plana.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (37)$$

Em que: RU – Razão de umidade, adimensional; n – Número de termos, nesse caso, fez-se a aproximação de três termos; D_{ef} – Coeficiente de difusão efetiva, $m^2 \cdot s^{-1}$; t – Tempo, h; L – Dimensão característica (meia espessura da placa), m.

Os coeficientes de difusão efetiva da casca de arroz, foram obtidos por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 38, aos dados experimentais. Essa equação é a solução analítica para a segunda Lei de Fick, considerando a forma geométrica teórica de um cilindro infinito oco (CRANK, 1975).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = 1 - \frac{4}{b^2 - a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(a\lambda_n) - J_0(b\lambda_n)}{\lambda_n^2 \{J_0(a\lambda_n) - J_0(b\lambda_n)\}} \exp[-\lambda_n^2 D_{ef} t] \quad (38)$$

Em que: RU – Razão de umidade, adimensional; λ_n – Raízes da função de Bessel de ordem zero; n – Número de termos, nesse caso, fez-se a aproximação e cinco termos; J_0 – Função de Bessel de primeiro tipo de ordem zero; D_{ef} – Coeficiente de difusão efetiva, $m^2 \cdot s^{-1}$; t – Tempo, h; b – Espessura do grão de arroz em casca, m; a – Espessura do arroz em casca menos a espessura da casca, m.

3.9. Propriedades termodinâmicas de secagem

A relação entre o coeficiente de difusão efetiva e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita por meio da equação de Arrhenius:

$$D = D_0 \cdot \exp \left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{abs}} \right) \quad (39)$$

Em que: D_0 – Fator pré-exponencial equivalente ao coeficiente de difusão para temperaturas tendendo ao infinito, $m^2.s^{-1}$; E_a – Energia de ativação, $kJ.mol^{-1}$; R – Constante universal dos gases, $8,134 \times 10^{-3} kJ.mol^{-1}.K^{-1}$; T_{abs} – Temperatura absoluta, K. Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo de acordo com a Equação 40:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{abs}} \quad (40)$$

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem foram obtidas pelas relações termodinâmicas, assim como realizado no trabalho de Jideani e Mpotokwana (2009):

$$\Delta H = E_a - R.T \quad (41)$$

$$\Delta S = R \cdot \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} \right) - \ln T_{abs} \quad (42)$$

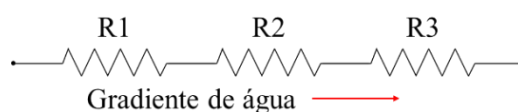
$$\Delta G = \Delta H - T_{abs} \Delta S \quad (43)$$

Em que: ΔH – Entalpia, $J.mol^{-1}$; ΔS – Entropia, $J.mol^{-1}$; ΔG – Energia livre de Gibbs, $J.mol^{-1}$; h_p – Constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J.s^{-1}$; e k_B – Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$.

3.10. Sistema de resistência

O sistema de resistência das partes do grão de arroz em casca à saída de água foi considerado como uma resistência em série, de acordo com metodologia desenvolvida por Dias (2017), da seguinte forma (Figura 8):

Figura 8 - Esquema de distribuição de resistência à saída de água das diversas partes intrínsecas do arroz em casca.



$$R_S = R_1 + R_2 + R_3 \quad (44)$$

Em que: R_s – Resistência total; R_1 – Resistência da casca do arroz; R_2 – Resistência do farelo do arroz; R_3 – Resistência do grão de arroz brunido.

Para o desenvolvimento do modelo de resistência utilizado, foi levado em consideração que a resistência de cada componente anatômico depende do valor da energia de ativação.

Para a modelagem da secagem de cada parte do arroz em casca, foi considerado um coeficiente de correção determinado, experimentalmente, para cada uma das partes, de forma a corrigir o erro do fato de as partes já estarem separadas e não unidas, (DIAS, 2017). Dessa forma, poderá ser afirmada a resistência total à desidratação estabelecida seguindo a Equação 45:

$$R_s = \left(\frac{1}{R_1} A \right) + \left(\frac{1}{R_2} B \right) + \left(\frac{1}{R_3} C \right) \quad (45)$$

Em que: R_s – Resistência total; R_1 – Resistência da casca do arroz; R_2 – Resistência do farelo do arroz; R_3 – Resistência do grão de arroz brunido; A – Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pela casca do arroz; B – Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pelo farelo do arroz; C – Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pelo grão de arroz brunido.

O coeficiente de resistência foi determinado pela Equação 46, utilizada por Skaar & Babiak (1982). O coeficiente de resistência foi calculado para arroz em casca e suas partes constituintes em todas condições de secagem estudadas.

$$\eta = \frac{\delta}{\mu_w} \exp \left[- \frac{E_a - E_w}{RT_{abs}} \right] \quad (46)$$

Em que: η – Coeficiente de resistência, $m^2.s.kg^{-1}$; δ – Espaçamento médio entre moléculas de água adsorvidas, m ; μ_w – Viscosidade da água $Pa.s^{-1}$; E_a – Energia de ativação, $J.mol^{-1}$; E_w – Energia de ativação para viscosidade, $J.mol^{-1}$; R – Constante universal dos gases, $8,134 J.kmol^{-1}.K^{-1}$; T_{abs} – Temperatura absoluta, K . Para δ foi utilizado o valor de $3,0 \times 10^{-10} m$, que corresponde à espessura da camada monomolecular de água, utilizada por Aguerre et al. (1989). E_w é obtido a partir da taxa de variação entre

a viscosidade da água (μ_w) com a temperatura (T_{abs}), baseado na equação de Arrhenius é de cerca de $16,736 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (SKAAR & BABIAK, 1982).

Para realizar a modelagem matemática dos dados, a fim de corrigir o fato de realizar a separação as partes do grão de arroz em casca, foi necessária a criação de coeficientes de correção para cada parte. Levando em consideração que a resistência total equivale à resistência do grão de arroz em casca, o modelo proposto para a resistência à saída de água é descrito na Equação 47:

$$\eta_t = A.X_c.\eta_c + B.X_f.\eta_f + C.X_e.\eta_e \quad (47)$$

Em que: η_t – Coeficiente de resistência total, $\text{m}^2.\text{s.kg}^{-1}$; η_c – Coeficiente de resistência da casca do arroz, $\text{m}^2.\text{s.kg}^{-1}$; η_f – Coeficiente do farelo do arroz, $\text{m}^2.\text{s.kg}^{-1}$; η_e – Coeficiente de resistência do grão de arroz brunido, $\text{m}^2.\text{s.kg}^{-1}$; X_c , X_f , X_e – Influência da espessura média na saída de água, decimal (adimensional); A, B, C – Coeficientes de correção.

A influência da espessura média, na saída de água, foi calculada levando em consideração que a influência da espessura do grão de arroz em casca é a maior influência que se pode encontrar à saída de água. Assim:

$$I_c = \frac{\text{espessura média da casca de arroz}}{\text{espessura média do arroz em casca}} \quad (48a)$$

$$I_f = \frac{\text{espessura média do farelo de arroz}}{\text{espessura média do arroz em casca}} \quad (48b)$$

$$I_e = \frac{\text{espessura média do grão de arroz}}{\text{espessura média do arroz em casca}} \quad (48c)$$

Os coeficientes de correção (A, B e C) do modelo proposto foram obtidos por meio de análise de regressão não linear pelo método de Gauss-Newton pelo *software* STATISTICA 5.0® (STATSOFT, 1995).

3.11. Delineamento experimental e análise estatística

Em decorrência das combinações entre processamento e temperaturas, foram obtidas as diferentes condições de secagem. Para cada tratamento, foram realizadas três repetições. O fluxo de ar adotado foi de $10\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ com temperaturas do ar de $35\pm 1^\circ\text{C}$, $45\pm 1^\circ\text{C}$, $55\pm 1^\circ\text{C}$, $65\pm 1^\circ\text{C}$ e $75\pm 1^\circ\text{C}$. O experimento foi montado em um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 3 repetições.

Para o ajuste dos modelos matemáticos para prever a cinética de secagem e o fenômeno da higroscopicidade foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0[®] (STATSOFT, 1995). Sendo que a escolha do melhor modelo foi realizada em função dos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2). O coeficiente de determinação foi obtido pelo software e o padrão da estimativa e erro médio relativo obtidos pelas Equações 49 e 50.

$$SE = \sqrt{\sum (Y - \hat{Y})^2 / GLR} \quad (49)$$

$$P = [(100/n) \sum |Y - \hat{Y}| / Y] \quad (50)$$

Em que: SE - Desvio padrão da estimativa, decimal; Y - Valor observado experimentalmente; \hat{Y} - Valor calculado pelo modelo; GLR - Graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo); P - Erro médio relativo, %; n - Número de dados observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Isotermas de sorção

Utilizando o teor de água de equilíbrio obtido pela análise da higroscopicidade, foram determinadas as isotermas de sorção do arroz em casca e suas partes constituintes. Os teores da água de equilíbrio obtidos experimentalmente para as condições ambiente de 20, 30, 55 e 70°C em diferentes atividades de água, os quais foram utilizados para a modelagem matemática das isotermas de sorção de arroz em casca e suas partes constituintes, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de água inicial (U_i) e teor de água de equilíbrio (U_e), base seca ($\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$), de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz em equilíbrio com diferentes temperaturas (T , °C) e atividades de água (A_w , decimal).

Tratamento		Arroz em casca	Arroz integral	Arroz brunido	Farelo de arroz	Casca de arroz
U_i (b.s.)		0,1022	0,1174	0,1181	0,1099	0,0939
T (°C)	a_w	U_e (b.s.)				
20	0,1131	0,0697	0,0863	0,0874	0,0670	0,0637
	0,2311	0,0842	0,0998	0,1032	0,0838	0,0780
	0,5438	0,1210	0,1395	0,1330	0,1204	0,1113
	0,8511	0,1809	0,1963	0,1974	0,1741	0,1640
30	0,1131	0,0618	0,0812	0,0789	0,0616	0,0550
	0,2311	0,0761	0,0926	0,0942	0,0757	0,0683
	0,5438	0,1120	0,1260	0,1273	0,1109	0,0998
	0,8511	0,1627	0,1858	0,1859	0,1521	0,1360
55	0,1103	0,0419	0,0608	0,0610	0,0405	0,0338
	0,2993	0,0607	0,0750	0,0751	0,0604	0,0494
	0,5015	0,0828	0,0943	0,1063	0,0816	0,0631
	0,8070	0,1176	0,1431	0,1378	0,1034	0,0964
70	0,1075	0,0401	0,0514	0,0523	0,0400	0,0293
	0,2777	0,0523	0,0626	0,0623	0,0503	0,0428
	0,6604	0,0821	0,1008	0,1044	0,0752	0,0624
	0,7949	0,1076	0,1237	0,1235	0,0932	0,0877

Fonte: Da autora (2020).

Os teores de água de equilíbrio do arroz integral e do arroz brunido apresentaram-se com magnitude muito próxima em todas as condições ambientais estudadas. Assim como Choi (2005) e Reddy & Chakraverty (2004), os teores de água de equilíbrio do arroz integral apresentaram-se maiores que do arroz em casca para todas condições de

temperatura e atividade de água. Os menores teores de água de equilíbrio, entre todos os tratamentos, para todas as condições estudadas, foram obtidos pela casca de arroz.

A grande composição de carboidratos solúveis do endosperma do arroz faz com que seu teor de água de equilíbrio seja maior, comparado com o arroz em casca. A casca possui função protetora contra insetos, microrganismos e controla as trocas gasosas entre o ar ambiente e o grão. Por ser constituída de carboidratos insolúveis, sua presença proporciona menor lacunas para a ligação da água, conseqüentemente, teor de água de equilíbrio do arroz em casca é menor do que o arroz integral e brunido.

O farelo de arroz apresentou menores valores de teor de água de equilíbrio que o arroz em casca, em todas as condições estudadas, estando de acordo com Reddy & Chakraverty (2004). Como o farelo possui menor constituição de carboidratos solúveis que o arroz em casca, faz com que apresente menos sítios de ligação com a água, dessa forma seu teor de água de equilíbrio é menor.

Os valores de coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das isotermas de sorção de arroz em casca e suas partes constituintes, para as diferentes condições de temperatura e atividade de água, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos de isotermas de sorção analisados para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.

(Continua)

Modelos	Arroz em casca			Arroz integral		
	R^2 (%)	P (%)	SE	R^2 (%)	P (%)	SE
Cavalcanti Mata	99,27	4,81	0,0053	98,18	6,57	0,0086
Chen Clayton	99,03	7,14	0,0060	98,62	6,60	0,0075
Chang Pfost	98,97	5,80	0,0062	99,02	5,24	0,0063
Copace	99,73	3,09	0,0032	99,66	3,17	0,0037
Corrêa	93,09	14,65	0,0159	44,41	31,04	0,0405
GAB modificado	95,81	13,09	0,0125	93,50	13,69	0,0160
Halsey modificado	99,26	5,33	0,0053	99,61	3,45	0,0040
Henderson	89,66	18,36	0,0193	89,54	16,23	0,0201
Henderson modificado	99,25	4,86	0,0053	98,19	6,58	0,0085
Oswin	99,63	3,34	0,0037	99,54	3,40	0,0043
Sabbah	97,82	8,52	0,0090	96,00	9,93	0,0126
Sigma Copace	99,29	5,37	0,0052	99,70	2,95	0,0035
Smith	98,79	7,02	0,0068	99,67	2,78	0,0037

Tabela 7 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos de isotermas de sorção analisados para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.

(Conclusão)

Modelos	Arroz brunido			Farelo de arroz		
	R^2 (%)	P (%)	SE	R^2 (%)	P (%)	SE
Cavalcanti Mata	98,52	5,52	0,0077	99,40	4,22	0,0045
Chen Clayton	98,74	6,34	0,0071	99,25	5,55	0,0050
Chang Pfof	99,01	5,23	0,0063	97,98	7,85	0,0082
Copace	99,56	3,32	0,0042	99,57	3,47	0,0038
Corrêa	91,96	13,19	0,0176	94,88	12,14	0,0129
GAB modificado	94,17	12,77	0,0151	95,45	12,75	0,0121
Halsey modificado	99,32	4,53	0,0052	98,96	5,45	0,0059
Henderson	89,70	15,65	0,0198	85,49	20,55	0,0211
Henderson modificado	98,53	5,64	0,0077	99,20	4,98	0,0051
Oswin	99,53	3,58	0,0044	99,54	3,63	0,0039
Sabbah	96,71	8,39	0,0114	98,41	6,31	0,0072
Sigma Copace	99,34	4,50	0,0051	98,91	6,05	0,0060
Smith	99,17	4,02	0,0058	97,51	9,54	0,0090

Modelos	Casca de arroz		
	R^2 (%)	P (%)	SE
Cavalcanti Mata	99,23	5,75	0,0049
Chen Clayton	98,71	9,13	0,0063
Chang Pfof	98,61	7,82	0,0066
Copace	99,39	5,12	0,0044
Corrêa	93,59	16,01	0,0140
GAB modificado	95,91	13,99	0,0112
Halsey modificado	98,43	9,75	0,0072
Henderson	83,76	25,20	0,0217
Henderson modificado	99,02	6,53	0,0055
Oswin	99,06	5,57	0,0054
Sabbah	98,09	8,15	0,0077
Sigma Copace	98,92	6,89	0,0058
Smith	99,33	5,67	0,0047

Fonte: Da autora (2020).

Na seleção do melhor modelo para predizer o teor de água de equilíbrio foi considerada a magnitude dos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro relativo (P) e o erro médio estimado (SE).

O coeficiente de determinação (R^2) é baseado no número de parâmetros do modelo, sendo um critério que define o sucesso do modelo ao mesmo tempo em que avalia a variação dos dados experimentais. Considerando assim, neste trabalho, que os coeficientes de determinação superiores a 90% representam satisfatoriamente o fenômeno estudado. Todavia, o coeficiente de determinação deve ser utilizado apenas como índice auxiliar e não como critério de avaliação de modelos não lineares (AVIARA; AJIBOLA;

ONI, 2004; BOTELHO et al., 2010; CANO-HIGUITA et al., 2015; CUNNINGHAM; MCMINN; RICHARDSON, 2007; KASHANINEJAD et al., 2007).

O erro relativo médio (P) indica o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo. Um modelo mostra um ajuste satisfatório aos dados experimentais quando o erro relativo médio é inferior a 10% (HENAO; QUEIROZ; HAJISA, 2009; MOHAPATRA & RAO, 2005; ROSA; MORAES; PINTO, 2010).

De acordo com Draper & Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (SE). Dessa forma, quanto mais próximo a zero for o valor desta variável, melhor será o ajuste do modelo aos dados observados (LIMA et al., 2008; RESENDE et al., 2006).

Perante os treze modelos matemáticos estudados, de acordo com a magnitude dos parâmetros estatísticos os modelos de Corrêa, GAB modificado e Henderson não ajustaram aos dados observados de todos os tratamentos estudados. Assim, os modelos Cavalcanti Mata, Chen Clayton, Chang Pfof, Copace, Halsey modificado, Henderson modificado, Oswin, Sabbah, Sigma Copace e Smith representam adequadamente a higroscopicidade de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.

Dentre os modelos que apresentaram bom ajuste, o melhor ajuste foi obtido pelo modelo Copace, o qual foi escolhido para representar as isotermas de sorção de arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, e o modelo de Sigma Copace, o qual foi escolhido para representar as isotermas de sorção de arroz integral.

O modelo de Copace foi considerado satisfatório para a representação dos fenômenos de dessorção e adsorção de arroz em casca para as temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50°C (GONELI; CORRÊA; MARTINS, 2007). Representou satisfatoriamente o fenômeno de dessorção de diversos produtos agrícolas, como de grãos de niger (SIQUEIRA et al., 2018); de castanha-do-pará (BOTELHO et al., 2019); de crambe (COSTA; RESENDE; OLIVEIRA, 2013), sementes de nabo forrageiro (SOUSA; RESENDE; COSTA, 2013); de feijão Adzuki (ALMEIDA et al., 2013); de aquênios de cajuzinho-do-cerrado (BARBOSA et al., 2016); dos frutos de sucupira branca (OLIVEIRA et al., 2017b); de semente de beterraba (CORRÊA et al., 2016) e de sementes de boca boa (*Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler) (COSTA et al., 2015b).

Igualmente ao modelo de Copace, o modelo Sigma Copace também representou de forma satisfatória a higroscopicidade de diversos produtos, como: milho pipoca (CORRÊA et al., 1998); sementes e fibras de algodão herbáceo (CORRÊA & ALMEIDA,

1999); café solúvel (CORRÊA et al., 2000); sementes de jacarandá-da-bahia e angico-vermelho (MESQUITA; ANDRADE; CORRÊA, 2001); albumina (CHRIST et al., 2012); grãos de niger (SIQUEIRA et al., 2018); frutos de café *Coffea canephora* (CORRÊA et al., 2014); frutos de sucupira branca (OLIVEIRA et al., 2017); aquênios de cajuzinho-do-cerrado (BARBOSA et al., 2016); feijão com danificação mecânica (CAMPOS et al., 2016) e sementes de pinhão-manso (CHAVES et al., 2015).

Conforme Corrêa et al. (1998) e Corrêa & Moure (2000), os modelos de Copace e Sigma-Copace têm apresentado ajuste satisfatório e menores erros médios relativos e estimados, quando comparados com modelos semiteóricos, portanto, descrevendo convenientemente o comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas.

Na Tabela 8 estão apresentados os coeficientes dos modelos matemáticos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais às isotermas de sorção de arroz em casca e suas partes constituintes, para as diferentes condições de temperatura e atividade de água.

Tabela 8 – Coeficientes do modelo matemático de Copace ajustados às isotermas de sorção do arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, e do modelo matemático de Sigma Copace ajustado à isoterma de sorção do arroz integral.

Tratamento	Modelo	Coeficientes		
		a	b	c
Arroz em casca	Copace	-2,60786	0,010192	1,298973
Arroz integral	Sigma Copace	-3,02929	0,008391	0,681006
Arroz brunido	Copace	-2,41227	0,008621	1,139948
Farelo de arroz	Copace	-2,53988	0,011717	1,20078
Casca de arroz	Copace	-2,62408	0,013244	1,260146

Fonte: Da autora (2020).

Nas Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 são apresentados os valores médios do teor de água de equilíbrio (base seca, $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) de arroz em casca e suas partes constituintes, para diferentes condições de temperatura e atividade de água, bem como as isotermas de sorção descritas pelo modelo matemático melhor ajustado, para cada produto.

Conforme pode-se observar nas figuras das isotermas, os modelos selecionados adequaram-se bem aos dados experimentais, para toda a faixa de atividade de água nas temperaturas estudadas para arroz em casca e suas partes constituintes.

Figura 9 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para arroz em casca, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.

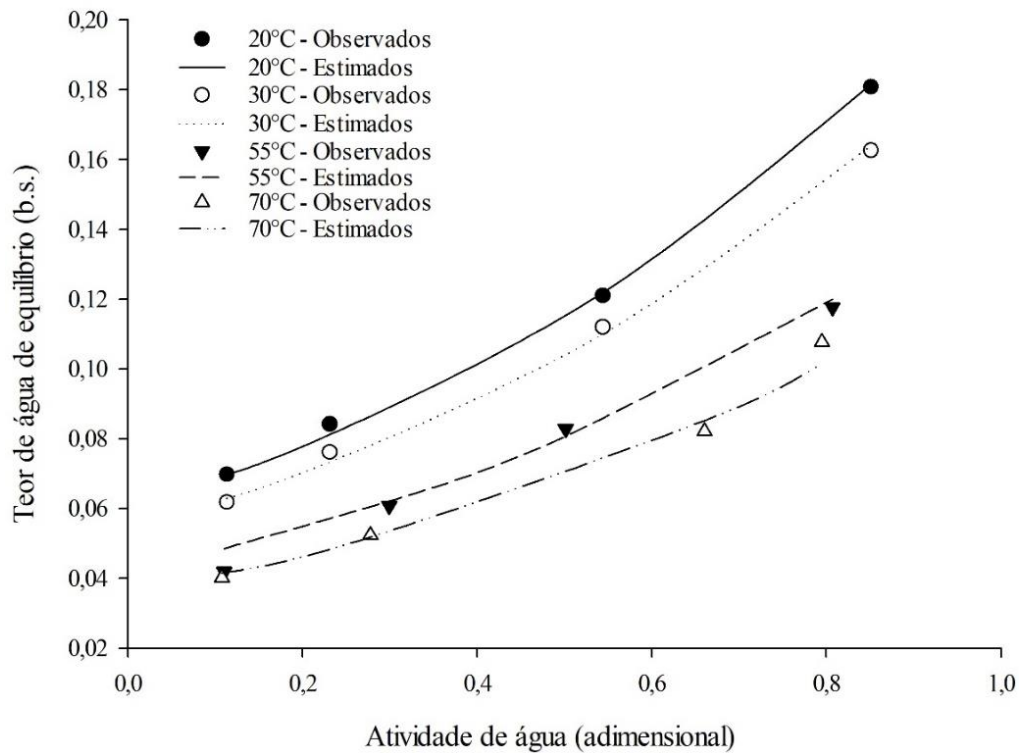


Figura 10 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Sigma Copace para arroz integral, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.

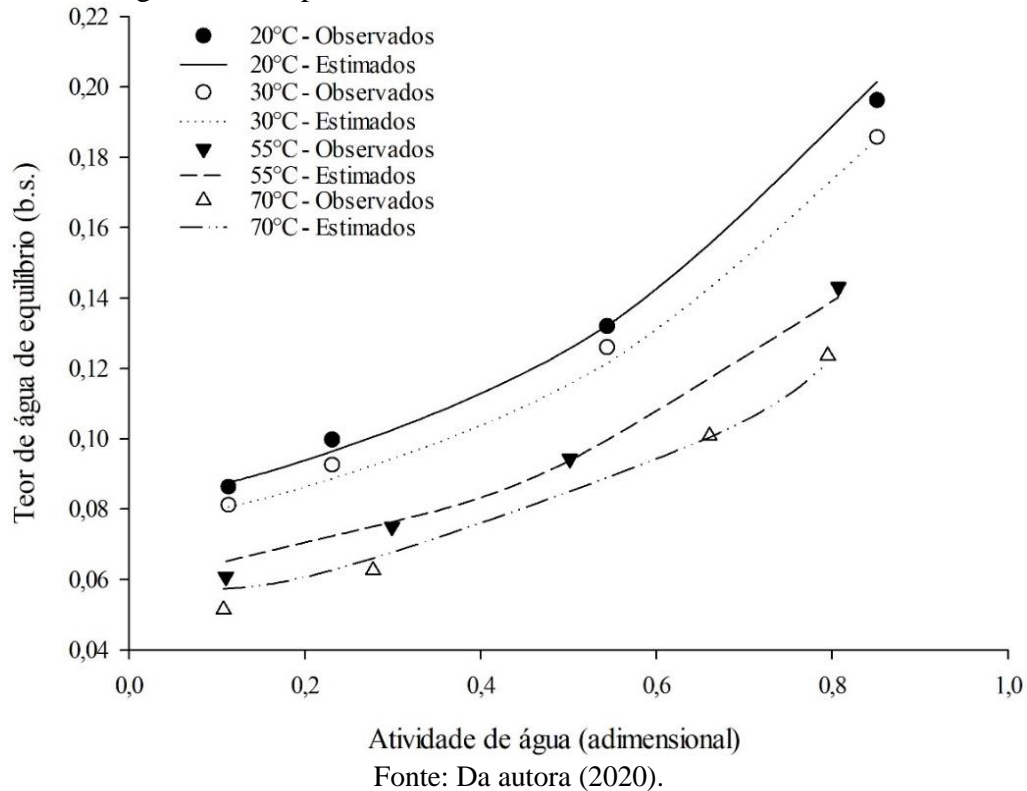


Figura 11 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para arroz brunido, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.

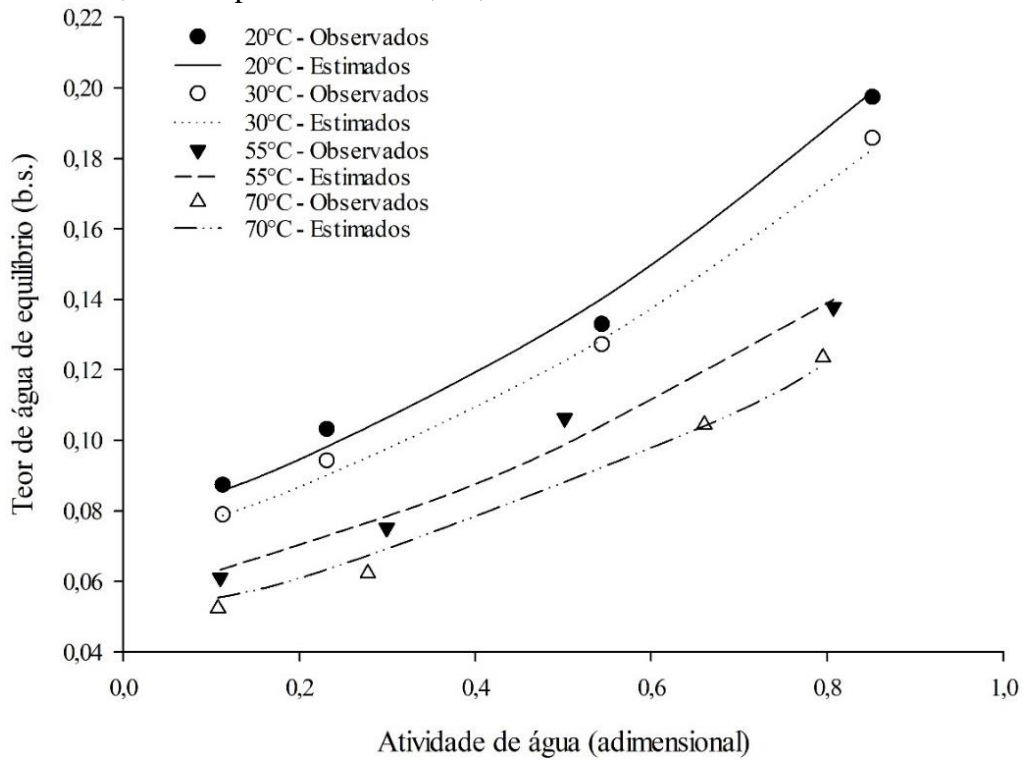


Figura 12 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para farelo de arroz, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.

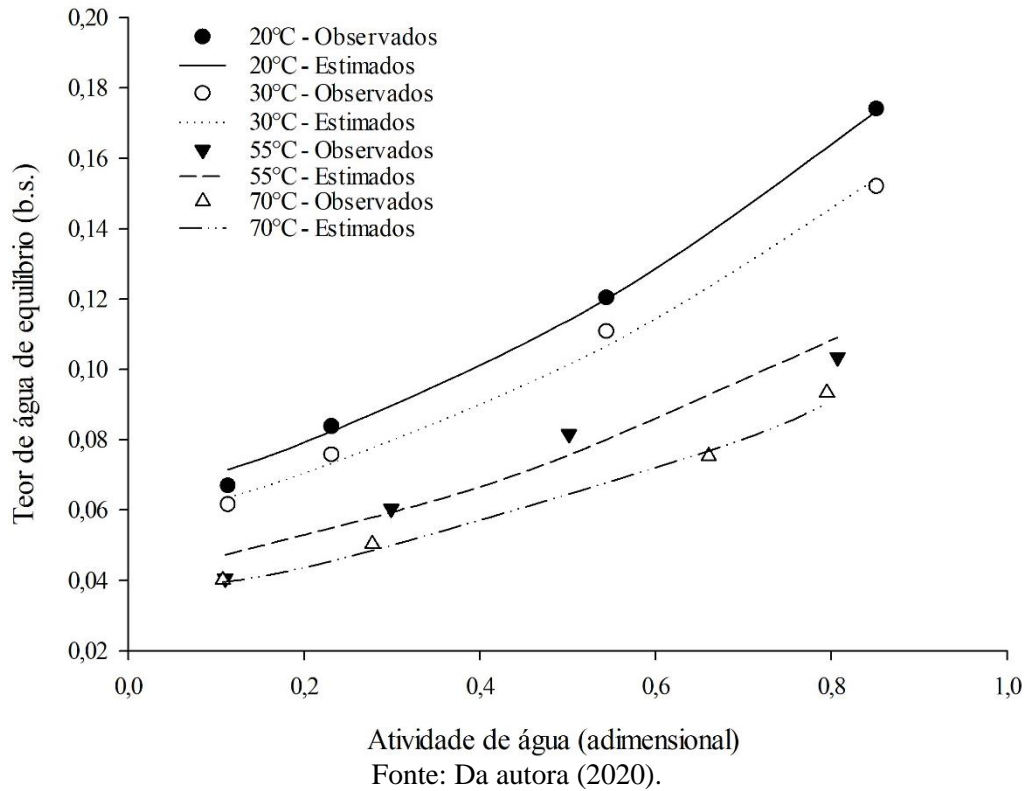
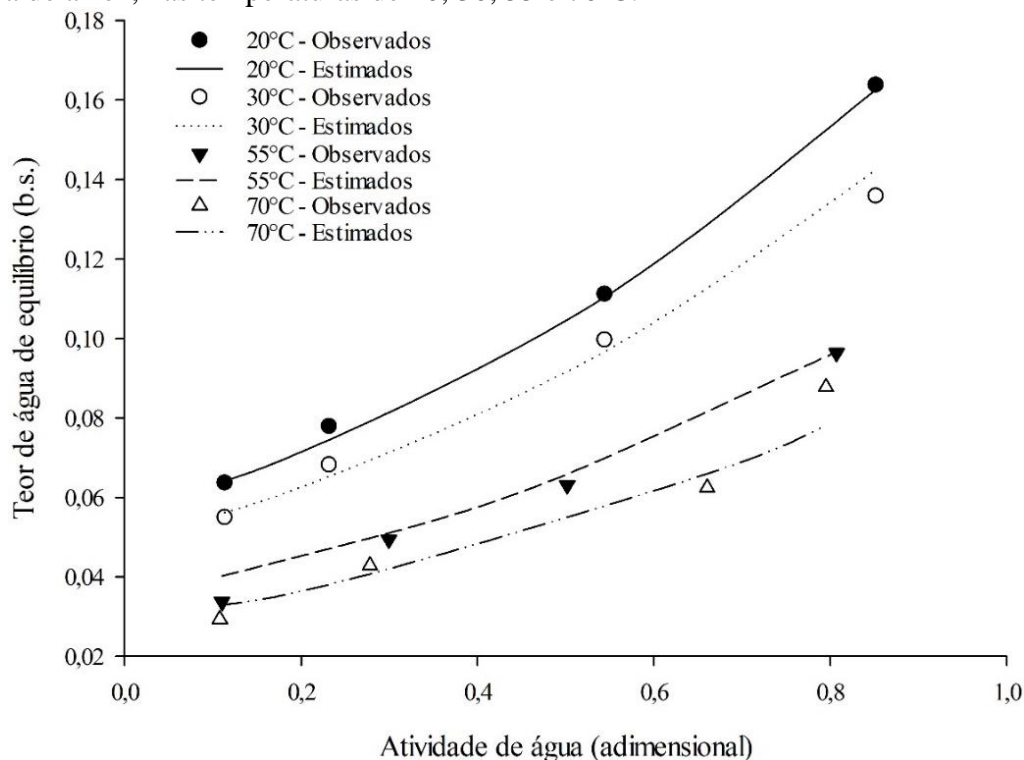


Figura 13 – Isotermas de sorção observadas e estimadas pelo modelo de Copace para casca de arroz, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2020).

As isotermas obtidas para o arroz em casca e seus constituintes possuem forma sigmoidal, que é característico das curvas de Tipo II (BRUNAUER et al., 1938) e é considerada o padrão para produtos agrícolas. Oliveira et al. (2014), obtiveram resultados semelhantes, em que as isotermas de desorção obtidas para as sementes de arroz em casca do cultivar BRS Sertanejo apresentaram-se no formato sigmoidal, típico de diversos produtos agrícolas.

Ao analisar o comportamento das isotermas, percebe-se que, para uma mesma temperatura, com o aumento da atividade de água verificou-se um aumento no teor de água de equilíbrio. E, para uma atividade de água constante, com o aumento da temperatura, os valores de teor de água de equilíbrio diminuíram, efeito que pode ser explicado com base no aumento da pressão de vapor da água no ar e na superfície do produto (CAMPOS et al., 2019). Estes resultados também foram obtidos para arroz em casca (OLIVEIRA et al., 2014; ZEYMER et al., 2019), assim como para outros produtos agrícolas: grãos de café Arábica (SANTOS et al., 2020b); sementes de girassol (CAMPOS et al., 2019); sementes de trigo (GRANELLA et al., 2019); sementes de quinoa (BUSTOS-VANEGAS et al., 2018).

4.2. Cinética de secagem

Os teores da água ao fim da secagem para o arroz em casca e suas partes constituintes, obtidos experimentalmente para as temperaturas de secagem de 35, 45, 55, 65 e 75°C e seus respectivos tempos de secagem são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Teor de água inicial (U_i) e teor de água final (U_f), base seca ($\text{kg água} \cdot \text{kg matéria seca}^{-1}$) e tempo total de secagem (h) para as temperaturas de secagem estudadas para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz

Tratamento	Temperatura (°C)	U_i (b.s.)	U_f (b.s.)	Tempo (h)
Arroz em casca	35	0,2650	0,1242	35
	45	0,2472	0,0788	29
	55	0,2494	0,0513	19
	65	0,2448	0,0432	13
	75	0,2447	0,0398	07
Arroz integral	35	0,2881	0,1255	23
	45	0,3039	0,0754	15
	55	0,3123	0,0667	11
	65	0,3135	0,0622	09
	75	0,3095	0,0534	06
Arroz brunido	35	0,2713	0,1118	19
	45	0,2812	0,0871	13
	55	0,2910	0,0655	07
	65	0,2851	0,0665	06
	75	0,2952	0,0507	05
Farelo de arroz	35	0,2497	0,1221	07
	45	0,3038	0,0871	05
	55	0,2957	0,0681	2,5
	65	0,3136	0,0472	2,5
	75	0,3586	0,0385	2,2
Casca de arroz	35	0,2715	0,0852	4,5
	45	0,3035	0,0726	2,8
	55	0,2932	0,0470	1,3
	65	0,2871	0,0366	1,3
	75	0,2945	0,0304	1,0

Fonte: Da autora (2020).

Observa-se que em todos os produtos, com o aumento da temperatura diminui-se o tempo de secagem. Segundo Botelho et al. (2018) ao elevar a temperatura a temperatura de secagem o potencial de secagem do ar e a transferência de calor para o material são aumentados, fazendo com que a velocidade de formação e migração do vapor d'água do interior para a superfície e ambiente torne-se maior.

Além disso, observa-se que com o aumento da temperatura de secagem, o teor de água é reduzido. García-Pérez et al. (2008) argumentam que, à medida que a temperatura

aumenta, ocorre um aumento do grau de desordem molecular da água presente na superfície adsorvente, levando à instabilidade e facilitando a quebra das conexões intermoleculares entre moléculas de água e locais de sorção, permitindo a vaporização da água e, conseqüentemente, diminuindo o teor água de equilíbrio. O efeito da temperatura sobre o tempo de secagem também foi observado na secagem de arroz vermelho em casca (SOUSA et al., 2016); arroz em casca (MENEGHETTI et al., 2012).

Os valores de coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais para as cinco temperaturas de secagem experimentadas em arroz em casca e suas partes constituintes, estão apresentados pelas Tabelas 10, 11, 12, 13 e 14.

Os critérios estatísticos utilizados para a seleção do modelo que melhor prediz a cinética de secagem do arroz em casca e suas partes constituintes foram: coeficiente de determinação (R^2) maior que 90%; erro relativo médio (P) menor que 10% e desvio padrão da estimativa (SE) mais próximo de zero. Da mesma forma que foram selecionados os modelos matemáticos de isotermas de sorção, apresentados no tópico anterior.

Tabela 10 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz em casca, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Continua)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Newton	R^2 (%)	95,28	97,71	99,98	99,99	99,98
	P (%)	24,86	38,90	10,36	3,21	3,45
	SE (decimal)	0,0871	0,0664	0,0072	0,0039	0,0066
Henderson & Pabis	R^2 (%)	97,77	98,68	99,98	99,99	99,98
	P (%)	14,59	29,95	9,08	2,55	2,80
	SE (decimal)	0,0602	0,0506	0,0064	0,0037	0,0062
Page	R^2 (%)	99,83	99,91	99,98	99,99	99,99
	P (%)	3,71	8,06	8,12	4,22	3,84
	SE (decimal)	0,0167	0,0134	0,0064	0,0028	0,0038
Wang & Singh	R^2 (%)	93,16	86,69	91,55	90,31	96,57
	P (%)	23,99	76,19	76,79	117,41	77,05
	SE (decimal)	0,0989	0,1468	0,1364	0,1467	0,0825
Valcam	R^2 (%)	99,72	99,67	99,95	99,93	99,98
	P (%)	5,09	10,88	27,66	11,56	6,40
	SE (decimal)	0,0214	0,0255	0,0111	0,0127	0,0055
Midilli	R^2 (%)	99,92	99,97	99,98	99,99	99,99
	P (%)	2,45	2,08	6,74	2,33	1,44
	SE (decimal)	0,0109	0,0066	0,0062	0,0028	0,0036

Tabela 10 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz em casca, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Conclusão)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Dois termos	R^2 (%)	99,87	99,86	99,98	99,99	99,98
	P (%)	3,83	6,17	9,08	2,55	2,80
	SE (decimal)	0,0145	0,0161	0,0064	0,0037	0,0062
Exponencial de dois termos	R^2 (%)	98,08	99,09	99,98	99,99	99,99
	P (%)	15,80	26,99	7,89	10,37	6,68
	SE (decimal)	0,0559	0,0419	0,0069	0,0027	0,0044
Thompson	R^2 (%)	99,91	99,92	99,98	99,99	99,98
	P (%)	3,04	4,40	7,92	9,35	2,80
	SE (decimal)	0,0111	0,0111	0,0064	0,0029	0,0055
Verma	R^2 (%)	97,77	98,68	99,98	99,99	99,98
	P (%)	14,59	29,95	9,08	2,55	2,80
	SE (decimal)	0,0571	0,0477	0,0059	0,0034	0,0055
Aproximação da difusão	R^2 (%)	99,84	97,71	99,98	99,99	99,99
	P (%)	3,96	38,90	10,36	3,21	3,77
	SE (decimal)	0,0158	0,0664	0,0072	0,0035	0,0036
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)	99,91	99,95	99,98	99,99	99,98
	P (%)	2,35	2,17	9,08	2,55	2,80
	SE (decimal)	0,0119	0,0041	0,0064	0,0037	0,0061

Fonte: Da autora (2020).

Dentre estes modelos ajustados para a secagem de arroz em casca, o modelo que obteve melhores parâmetros estatísticos foi o modelo de Midilli para as temperaturas de secagem de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Tabela 11 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz integral, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Continua)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Newton	R^2 (%)	96,45	99,97	99,99	99,96	99,99
	P (%)	37,68	7,78	2,48	5,31	3,27
	SE (decimal)	0,0827	0,0074	0,0015	0,0114	0,0003
Henderson & Pabis	R^2 (%)	96,92	99,98	99,99	99,96	99,99
	P (%)	34,97	5,35	0,98	5,36	3,26
	SE (decimal)	0,0770	0,0061	0,0015	0,0103	0,0003
Page	R^2 (%)	98,77	99,99	99,99	99,97	99,99
	P (%)	19,73	7,89	3,64	9,15	2,11
	SE (decimal)	0,0488	0,0029	0,0014	0,0084	0,0001
Wang & Singh	R^2 (%)	88,30	90,15	76,25	97,31	85,31
	P (%)	53,93	210,63	71,64	15,10	25,60
	SE (decimal)	0,1375	0,1460	0,2141	0,0815	0,1869

Tabela 11 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz integral, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Conclusão)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Valcam	R^2 (%)	99,88	99,92	99,53	99,98	99,77
	P (%)	6,22	23,28	35,85	7,78	34,17
	SE (decimal)	0,0147	0,0139	0,0356	0,0061	0,0284
Midilli	R^2 (%)	99,82	99,99	99,99	99,98	87,84
	P (%)	7,69	5,95	2,93	7,39	14,24
	SE (decimal)	0,0184	0,0026	0,0014	0,0068	0,3114
Dois termos	R^2 (%)	99,95	99,98	99,99	99,96	99,99
	P (%)	3,15	5,35	0,98	5,36	3,26
	SE (decimal)	0,0093	0,0061	0,0015	0,0103	0,0003
Exponencial de dois termos	R^2 (%)	97,86	99,99	99,99	99,96	99,99
	P (%)	30,17	18,51	8,30	9,19	2,54
	SE (decimal)	0,0644	0,0051	0,0014	0,0104	0,0001
Thompson	R^2 (%)	99,20	99,99	99,99	99,96	99,98
	P (%)	16,63	18,15	7,54	9,24	7,16
	SE (decimal)	0,0369	0,0045	0,0012	0,0089	0,0001
Verma	R^2 (%)	96,92	99,98	99,99	99,96	99,99
	P (%)	34,97	5,35	0,98	5,36	3,26
	SE (decimal)	0,0721	0,0055	0,0013	0,0089	0,0002
Aproximação da difusão	R^2 (%)	99,95	99,97	99,99	99,99	99,99
	P (%)	3,11	7,78	3,09	2,95	1,96
	SE (decimal)	0,0094	0,0074	0,0013	0,0057	0,0003
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)	99,95	99,98	99,99	99,96	99,99
	P (%)	3,15	5,35	0,98	5,36	3,26
	SE (decimal)	0,0093	0,0061	0,0015	0,0103	0,0003

Fonte: Da autora (2020).

Dentre estes modelos ajustados, os que obtiveram melhores parâmetros estatísticos foram os modelos de Aproximação da difusão para 35, 55, 65 e 75°C, e de Midilli para 45°C.

Tabela 12 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz brunido, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Continua)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Newton	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,65	99,99
	P (%)	3,34	7,01	5,00	30,24	2,43
	SE (decimal)	0,0033	0,0055	0,0002	0,0340	0,0006
Henderson & Pabis	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,67	99,99
	P (%)	3,17	7,14	5,00	29,07	2,43
	SE (decimal)	0,0031	0,0055	0,0002	0,0328	0,0006

Tabela 12 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de arroz brunido, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Conclusão)

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Page	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,92	99,99
	P (%)	2,83	6,56	4,99	13,41	2,43
	SE (decimal)	0,0031	0,0055	0,0001	0,0161	0,0005
Wang & Singh	R^2 (%)	93,67	88,33	80,50	93,59	83,69
	P (%)	29,28	57,03	65,58	51,54	51,17
	SE (decimal)	0,1204	0,1594	0,2035	0,1220	0,2055
Valcam	R^2 (%)	99,98	99,89	99,61	99,92	99,56
	P (%)	55,07	19,60	39,76	12,25	24,34
	SE (decimal)	0,0071	0,0174	0,0346	0,0154	0,0427
Midilli	R^2 (%)	99,99	99,99	86,44	99,99	78,38
	P (%)	2,13	6,36	47,44	3,61	42,52
	SE (decimal)	0,0031	0,0055	0,1992	0,0048	0,2856
Dois termos	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,67	99,99
	P (%)	3,17	7,14	5,01	29,07	2,43
	SE (decimal)	0,0031	0,0055	0,0002	0,0328	0,0006
Exponencial de dois termos	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,91	99,99
	P (%)	2,50	7,09	4,89	15,22	2,43
	SE (decimal)	0,0033	0,0055	0,0002	0,0166	0,0004
Thompson	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,96	99,99
	P (%)	2,58	7,63	4,91	10,31	2,53
	SE (decimal)	0,0030	0,0050	0,0001	0,0095	0,0005
Verma	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,86	99,99
	P (%)	3,61	10,08	5,70	8,87	2,43
	SE (decimal)	0,0029	0,0050	0,0001	0,0179	0,0005
Aproximação da difusão	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,97	99,99
	P (%)	3,34	8,06	4,81	7,00	2,42
	SE (decimal)	0,0033	0,0055	0,0002	0,0091	0,0002
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)	99,99	99,98	99,99	99,67	99,99
	P (%)	3,17	7,14	5,01	29,07	2,43
	SE (decimal)	0,0031	0,0055	0,0001	0,0328	0,0006

Fonte: Da autora (2020).

Dentre estes modelos ajustados, os que obtiveram melhores parâmetros estatísticos foram os modelos de Midilli para 35, 45 e 65°C e de Aproximação da difusão para 55 e 75°C.

Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de farelo de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Newton	R^2 (%)	97,74	99,76	99,81	99,92	99,98
	P (%)	3,79	3,38	9,93	9,61	11,18
	SE (decimal)	0,0362	0,0114	0,0191	0,0132	0,0061
Henderson & Pabis	R^2 (%)	98,87	99,76	99,84	99,92	99,98
	P (%)	2,14	1,80	9,06	8,87	10,83
	SE (decimal)	0,0248	0,0095	0,0177	0,0128	0,0060
Page	R^2 (%)	99,78	99,78	99,92	99,95	99,98
	P (%)	1,87	2,31	5,97	7,09	5,38
	SE (decimal)	0,0065	0,0112	0,0125	0,0102	0,0049
Wang & Singh	R^2 (%)	97,67	99,10	98,87	98,59	97,04
	P (%)	9,17	6,33	19,44	13,02	22,41
	SE (decimal)	0,0436	0,0112	0,0438	0,0519	0,0760
Valcam	R^2 (%)	99,86	99,95	99,97	99,96	99,99
	P (%)	1,52	2,27	4,23	7,93	4,61
	SE (decimal)	0,0126	0,0080	0,0064	0,0088	0,0035
Midilli	R^2 (%)	89,48	99,96	99,96	99,95	99,99
	P (%)	12,97	1,24	2,50	6,83	5,65
	SE (decimal)	0,1046	0,0080	0,0078	0,0101	0,0046
Dois termos	R^2 (%)	98,87	99,76	99,84	99,92	99,98
	P (%)	2,60	3,38	9,06	8,87	10,83
	SE (decimal)	0,0253	0,0114	0,0177	0,0128	0,0060
Exponencial de dois termos	R^2 (%)	99,41	99,81	99,94	99,96	99,99
	P (%)	1,61	3,23	4,67	7,31	3,14
	SE (decimal)	0,0160	0,0123	0,0107	0,0095	0,0043
Thompson	R^2 (%)	99,79	99,81	99,94	99,95	99,99
	P (%)	1,95	3,29	4,52	9,55	3,65
	SE (decimal)	0,0127	0,0119	0,0098	0,0090	0,0036
Verma	R^2 (%)	98,87	99,95	99,84	99,92	99,98
	P (%)	2,60	1,66	9,06	8,87	8,14
	SE (decimal)	0,0243	0,0083	0,0164	0,0119	0,0047
Aproximação da difusão	R^2 (%)	99,97	99,88	99,96	99,92	99,99
	P (%)	1,27	2,44	2,97	9,61	2,51
	SE (decimal)	0,0132	0,0119	0,0083	0,0132	0,0042
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)	98,87	99,76	99,84	99,92	99,98
	P (%)	2,60	3,38	9,06	8,87	10,83
	SE (decimal)	0,0253	0,0114	0,0177	0,0128	0,0060

Fonte: Da autora (2020).

Dentre estes modelos ajustados, os que obtiveram melhores parâmetros estatísticos foram os modelos de Aproximação da difusão para 35 e 75°C e Midilli para 45, 55e 65°C.

Tabela 14 – Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem de casca de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Modelos	Parâmetros	Temperaturas de Secagem (°C)				
		35	45	55	65	75
Newton	R^2 (%)	99,42	97,03	99,82	99,98	99,97
	P (%)	13,74	20,44	21,61	8,23	20,42
	SE (decimal)	0,0250	0,0655	0,0242	0,0082	0,0111
Henderson & Pabis	R^2 (%)	99,47	97,71	99,82	99,98	99,97
	P (%)	12,95	17,03	21,39	7,95	19,88
	SE (decimal)	0,0238	0,0576	0,0239	0,0079	0,0109
Page	R^2 (%)	99,70	99,79	99,98	99,99	99,99
	P (%)	8,31	5,55	7,98	6,04	1,63
	SE (decimal)	0,0163	0,0173	0,0076	0,0027	0,0003
Wang & Singh	R^2 (%)	56,66	89,46	91,71	96,50	97,72
	P (%)	69,82	28,03	55,91	19,40	18,26
	SE (decimal)	0,1852	0,1133	0,1377	0,0927	0,0851
Valcam	R^2 (%)	98,75	99,68	99,83	99,98	99,99
	P (%)	11,82	3,65	18,88	18,26	6,32
	SE (decimal)	0,0349	0,0214	0,0235	0,0073	0,0056
Midilli	R^2 (%)	99,90	84,60	99,99	92,77	94,39
	P (%)	4,78	37,31	1,09	16,01	15,82
	SE (decimal)	0,0100	0,1445	0,0012	0,1561	0,1709
Dois termos	R^2 (%)	99,47	97,71	99,82	99,98	99,97
	P (%)	12,95	17,03	21,39	7,95	19,89
	SE (decimal)	0,0238	0,0576	0,0239	0,0079	0,0109
Exponencial de dois termos	R^2 (%)	99,74	98,69	99,97	99,99	99,99
	P (%)	8,45	13,90	11,54	7,56	1,43
	SE (decimal)	0,0148	0,0437	0,0097	0,0043	0,0003
Thompson	R^2 (%)	99,82	99,86	99,99	99,99	99,99
	P (%)	5,75	4,42	5,20	7,08	11,39
	SE (decimal)	0,0113	0,0133	0,0043	0,0035	0,0025
Verma	R^2 (%)	99,47	97,71	99,82	99,98	99,98
	P (%)	12,95	17,03	21,39	7,95	18,65
	SE (decimal)	0,0229	0,0539	0,0202	0,0067	0,0075
Aproximação da difusão	R^2 (%)	99,99	99,89	99,99	99,99	99,99
	P (%)	0,76	3,28	4,91	5,80	1,15
	SE (decimal)	0,0021	0,0168	0,0048	0,0024	0,0002
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)	99,47	97,71	99,82	99,98	99,97
	P (%)	12,95	17,03	21,39	7,95	19,88
	SE (decimal)	0,0238	0,0576	0,0239	0,0079	0,0109

Fonte: Da autora (2020).

Dentre estes modelos ajustados para casca de arroz os que obtiveram melhores parâmetros estatísticos foram os modelos de Aproximação da difusão para 35, 45, 65 e 75°C; e Midilli para 55°C.

O modelo de Aproximação da difusão apresentou ajuste satisfatório para descrever a cinética de secagem de casca de kino (BARROS et al., 2020); casca de toranja

(SANTOS et al., 2020a); polpa de manga (NOBRE et al., 2019); feijão cultivar IPR Tangará (QUEQUETO et al., 2017); fruto de palma (SANTOS et al., 2016); folhas de nim (VIDAL et al., 2016); grãos de abóbora inteiro e sem tegumento (DIÓGENES et al., 2013); arroz em casca (HACIHAFIZOGLU; CIHAN; KAHVECI, 2008)

Em trabalhos recentes com secagem de outros produtos agrícolas, o modelo de Midilli também apresentou os bons ajustes aos dados experimentais, tais como na cinética de jambo vermelho (RIGUETO et al., 2020); mesocarpo de pequi (SOUZA et al., 2019); epicarpo de fruto de cajá (PINHEIRO et al., 2020); feijão guandu (MAIA et al., 2019); polpa de patauí (SANTOS et al., 2019a); folhas de capim-limão (GARCIA et al., 2019); soja (BOTELHO et al., 2018); grãos de quinoa (MASCON et al., 2017). De acordo com Kashaninejad et al. (2007), o modelo matemático Midilli é considerado um dos mais práticos e de simples aplicação devido à menor quantidade de coeficientes, sendo frequentemente aplicado em simulações de secagem.

Na Tabela 15 estão apresentados os coeficientes dos modelos matemáticos melhores ajustados aos dados experimentais das curvas de secagem de arroz em casca e suas partes constituintes, para as temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Tabela 15 – Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Continua)

Modelos ajustados para	Temperatura (°C)	Coeficientes do modelo			
		a	k	n	B
Arroz em casca					
Midilli	35	1,0042	0,2065	0,7024	0,0018
Midilli	45	0,9966	0,3290	0,7347	0,0013
Midilli	55	0,9942	0,3768	0,9892	0,0001
Midilli	65	1,0006	0,5747	0,9822	-0,0001
Midilli	75	1,0006	0,6961	0,9608	-0,0004
Modelos ajustados para					
Arroz integral					
Aproximação da difusão	35	0,8343	0,3681	-	0,0446
Midilli	45	0,9980	0,5104	0,9596	-0,0001
Aproximação da difusão	55	0,9861	0,9641	-	2,3080
Aproximação da difusão	65	0,0407	1,5415	-	0,0389
Aproximação da difusão	75	0,1291	1,5431	-	1,0000
Modelos ajustados para					
Arroz brunido					
Midilli	35	0,9977	0,3389	0,9963	-0,0001
Midilli	45	0,9985	0,6149	1,0038	0,0001
Aproximação da difusão	55	0,0008	0,9801	-	1,4698
Midilli	65	1,0001	0,9985	0,8942	0,0052
Aproximação da difusão	75	0,3735	2,1057	-	1,0127

Tabela 15 – Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Conclusão)					
Modelos ajustados para Farelo de arroz	Temperatura (°C)	Coeficientes do modelo			
		a	k	n	b
Aproximação da difusão	35	0,4091	0,5279	-	0,1973
Midilli	45	0,9834	0,6701	1,1029	0,0145
Midilli	55	0,9982	1,3466	0,9909	0,0141
Midilli	65	0,9942	1,6319	1,0616	0,0004
Aproximação da difusão	75	24,492	2,7021	-	1,0088
Modelos ajustados para Casca de arroz	Temperatura (°C)	Coeficientes do modelo			
		a	k	n	b
Aproximação da difusão	35	0,0764	0,1918	-	9,3287
Aproximação da difusão	45	0,3178	0,5940	-	5,8782
Midilli	55	1,0000	3,3728	0,8563	0,0099
Aproximação da difusão	65	0,9169	3,5612	-	3,5420
Aproximação da difusão	75	1,4213	5,8473	-	1,5913

k – constantes de secagem; a, b, n – coeficientes dos modelos.

Fonte: Da autora (2020).

O coeficiente k dos modelos selecionados apresentou uma tendência de aumento com a elevação da temperatura de secagem. Este parâmetro representa a difusividade efetiva no processo de secagem (ALMEIDA et al., 2020; MARTINS et al., 2015). Gomes et al. (2017) observaram que o aumento da temperatura no processo de secagem pode provocar a redução da viscosidade da água, indicando que a água encontrada no interior consegue migrar com maior facilidade quando comparada a menores temperaturas de secagem, fato evidenciado quando foi observado aumento nos valores do coeficiente k. Além disso, esse parâmetro representa o efeito das condições externas de secagem (GONELI et al., 2011; SANTOS et al., 2020a). Os demais coeficientes dos modelos não apresentaram tendência de comportamento em relação à temperatura de secagem.

Nas Figuras 14 a 18 apresentam-se os comportamentos da razão de umidade com valores observados e estimados pelos modelos matemáticos melhores ajustados, para o arroz em casca e suas partes constituintes, nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C, durante a secagem.

Figura 14 – Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz em casca nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

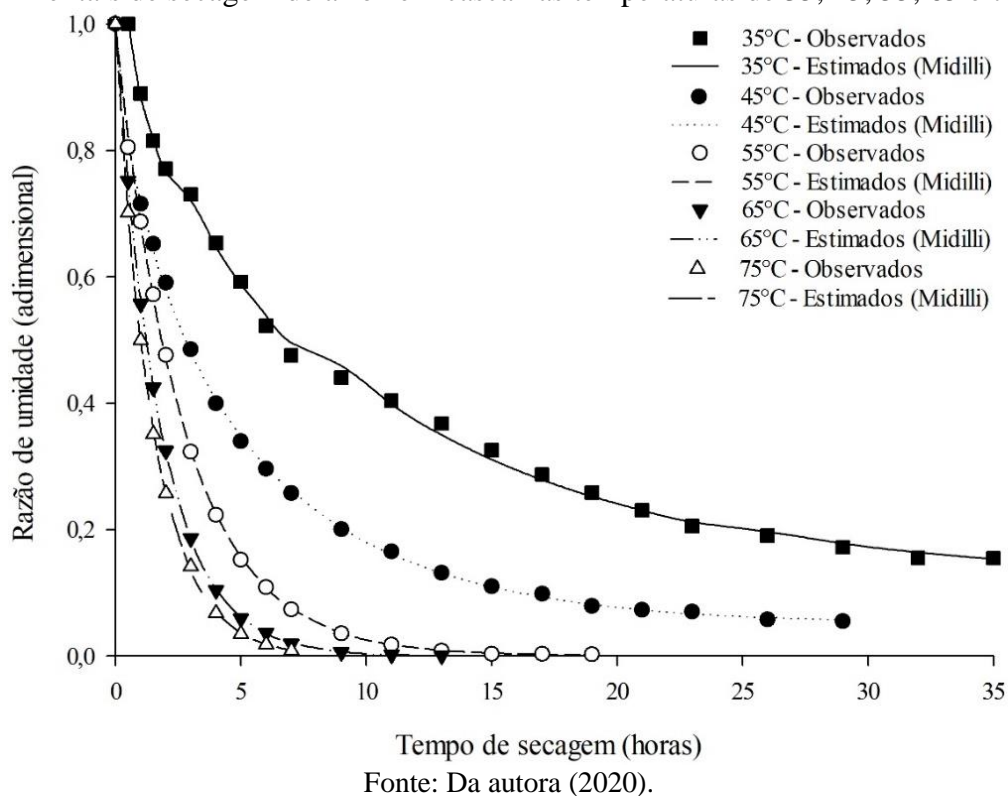


Figura 15 – Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz integral nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

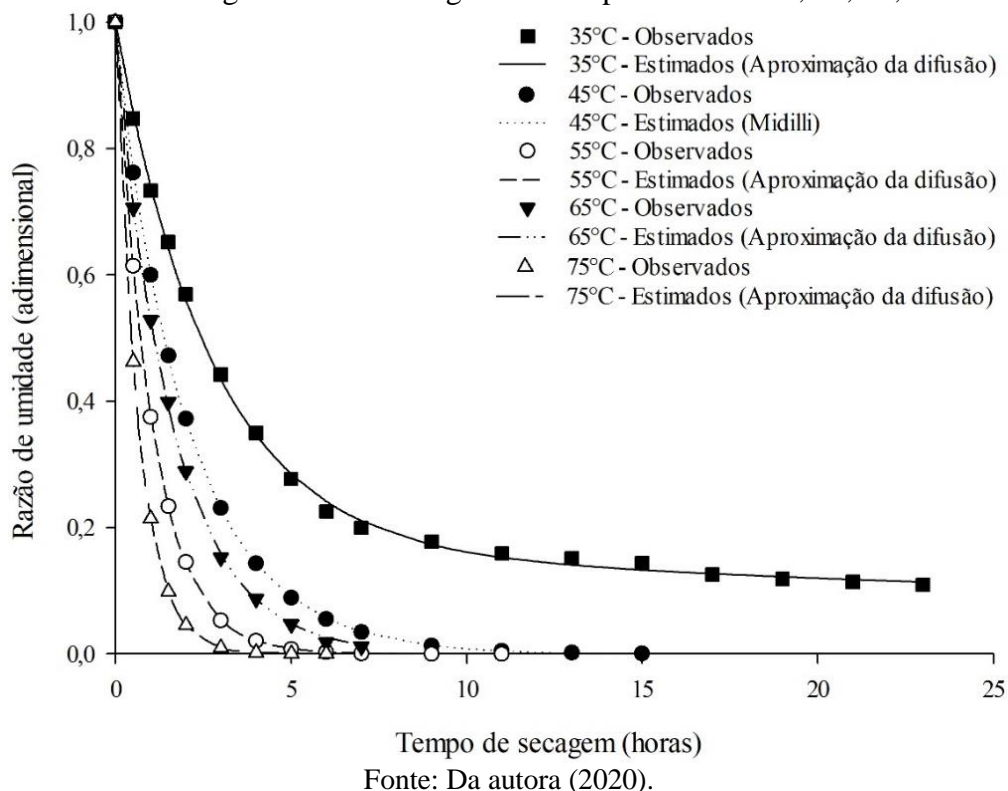


Figura 16 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de arroz brunido nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

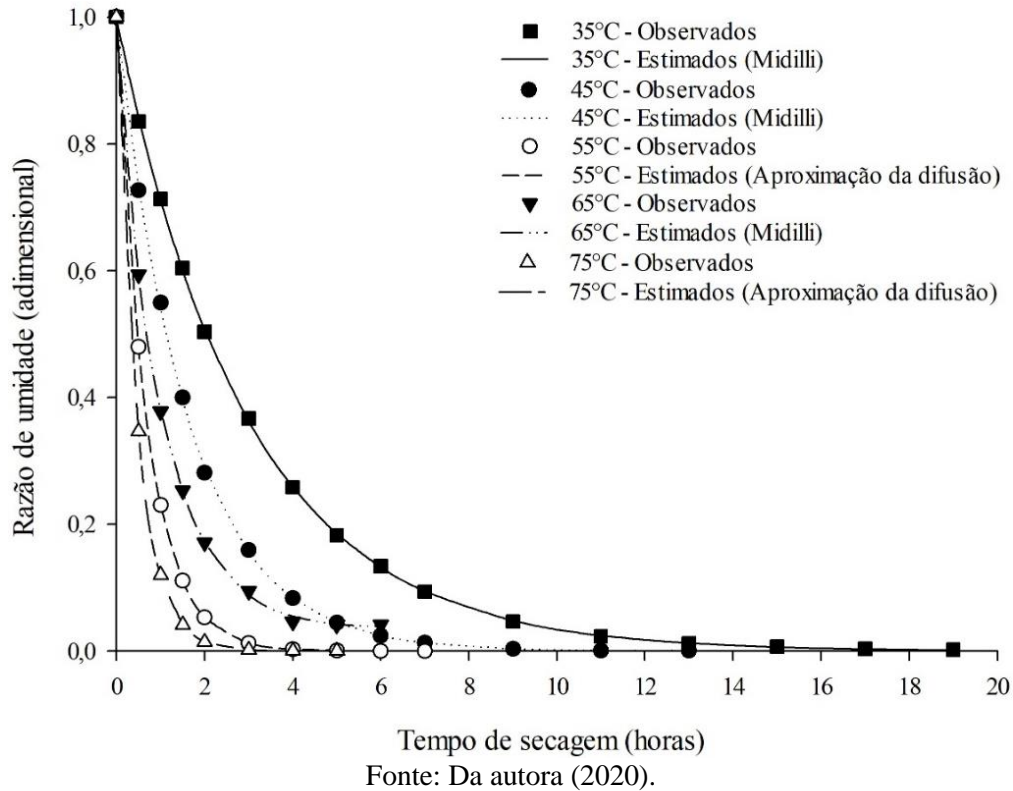


Figura 17 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de farelo de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

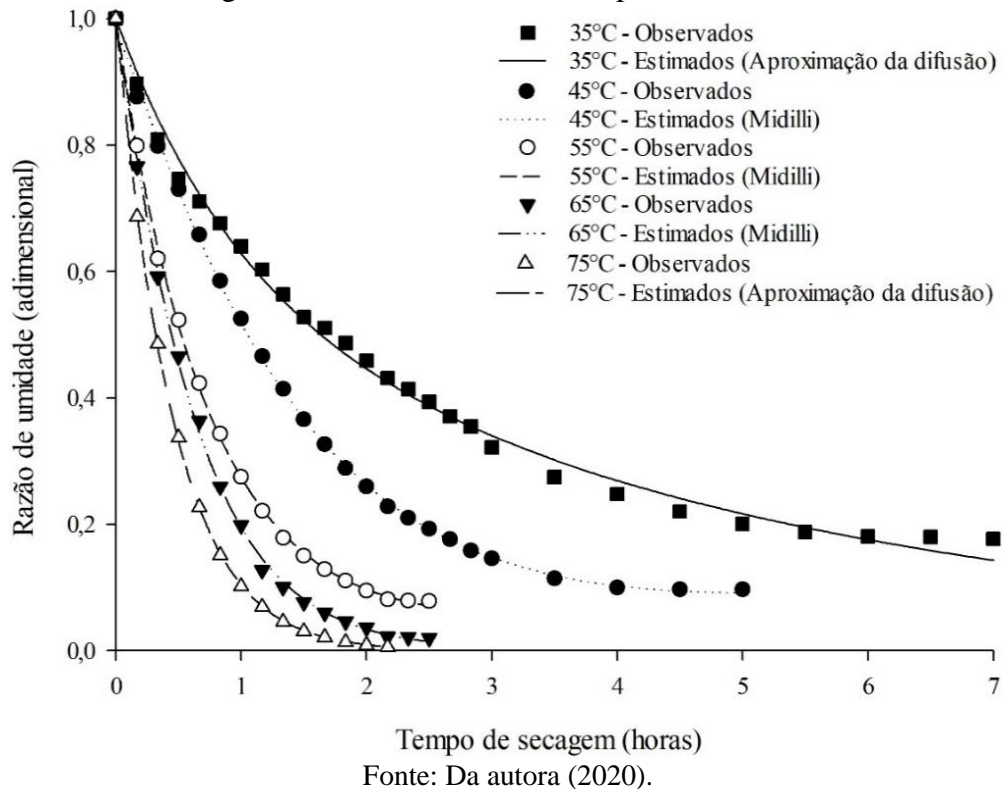
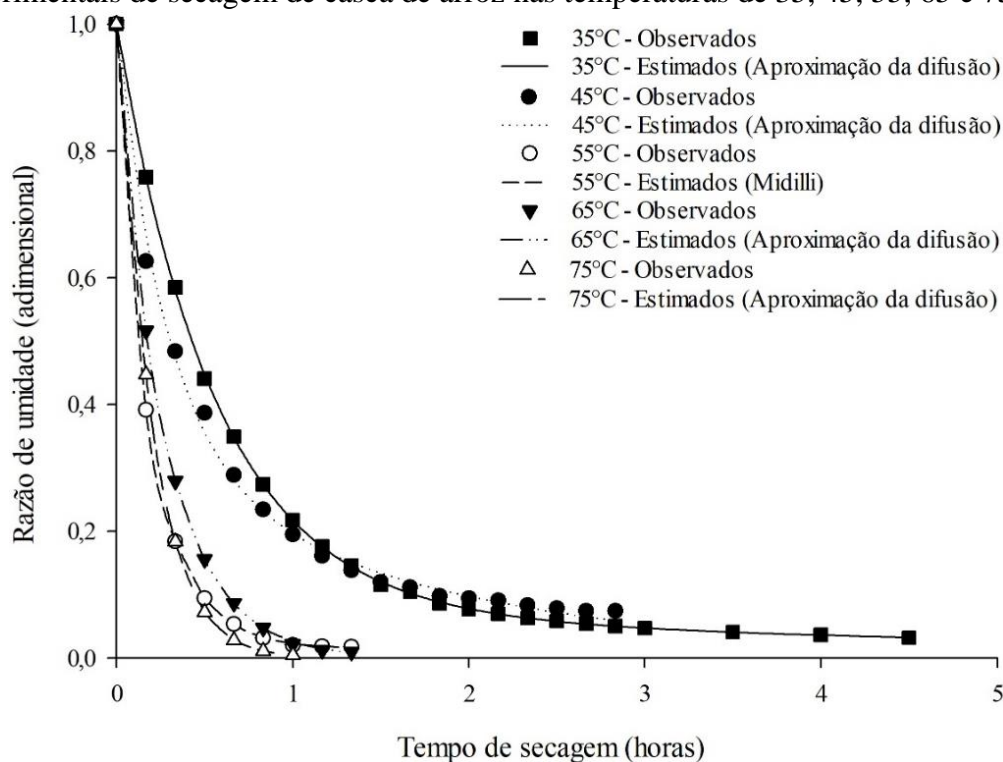


Figura 18 - Valores da razão de umidade observados e estimados pelos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados aos dados experimentais de secagem de casca de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.



Fonte: Da autora (2020).

Observou-se, nas Figuras 14 a 18, uma elevada correlação entre os dados observados experimentalmente e os dados estimados pelos modelos escolhidos, evidenciando que os índices estatísticos empregados foram eficazes para selecionar o modelo. Além disso, as curvas de secagem apresentaram uma tendência exponencial típica, observada em produtos agrícolas durante o período de secagem com taxa decrescente (CAMICIA et al., 2015; MARTINS et al., 2014).

Segundo Santos et al. (2020a) e Botelho et al. (2018) percebe-se maiores inclinações das curvas durante os instantes iniciais do processo de secagem, indicando maiores gradientes de temperatura entre o ar de secagem e o produto. É evidente que a taxa de secagem diminui continuamente com o tempo, de acordo com a proximidade do teor de água do produto ao seu teor de água de equilíbrio.

4.3. Coeficiente de difusão efetiva

Para realizar o cálculo das propriedades termodinâmicas e do coeficiente de resistência do arroz em casca e suas partes constituintes, foram considerados os valores de coeficientes de difusão efetiva apresentados na Tabela 16. O coeficiente de difusão

efetiva do arroz em casca, arroz integral e arroz brunido foram obtidos pela Equação 39; do farelo pela Equação 40 e da casca de arroz pela Equação 41.

Tabela 16 – Coeficientes de difusão efetiva ($\times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) médios obtidos na secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Tratamento	Temperatura (°C)	Coeficiente de difusão efetiva ($\times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$)
Arroz em casca	35	1,2177
	45	2,2457
	55	4,0817
	65	6,3047
	75	7,2241
Arroz integral	35	1,5867
	45	3,5705
	55	4,5718
	65	6,9249
	75	11,2463
Arroz brunido	35	1,6397
	45	3,5154
	55	4,0065
	65	6,4194
	75	10,1035
Farelo de arroz	35	5,8592
	45	10,0729
	55	11,2194
	65	20,0543
	75	24,4130
Casca de arroz	35	6,6580
	45	8,4575
	55	10,7202
	65	21,2742
	75	27,2209

Fonte: Da autora (2020).

O farelo de arroz apresenta os maiores valores de coeficiente de difusão efetiva dentre os tratamentos estudados, seguido pela casca de arroz, em todas as condições de temperaturas. Segundo Madamba (2003) os valores do coeficiente de difusividade para produtos agrícolas encontram-se dentro de uma faixa de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, dessa forma os resultados obtidos estão de acordo com a faixa encontrada para produtos agrícolas.

Nota-se que os coeficientes de difusão efetiva na secagem de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, estimados pelo modelo de Fick, apresentam comportamento crescente com a elevação da temperatura, pois a difusividade representa a velocidade com que a água migra do interior para o exterior do produto. Sousa et al. (2016) também obtiveram o aumento do coeficientes de difusão com a

elevação da temperatura, variando entre $2,332$ a $6,451 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ em arroz vermelho em casca, para temperaturas de 40 a 80°C . Almeida et al. (2020), em estudos com feijão azuki, observaram que, o coeficiente de difusão aumentou com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $3,49$ a $10,30 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ para a faixa de temperatura de 40 a 80°C . Silva et al. (2019) observaram o mesmo comportamento para grãos de sorgo, em que os coeficientes de difusão variaram entre $0,39$ a $2,43 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ para temperaturas de 40 a 100°C .

A difusividade efetiva é um parâmetro importante para secagem de produtos agrícolas, uma vez que é útil para projetar e modelar a transferência de massa durante este período, podendo variar com a espessura do material e as condições externas de secagem, como observado pela variação com o aumento da temperatura (CUEVAS et al., 2019).

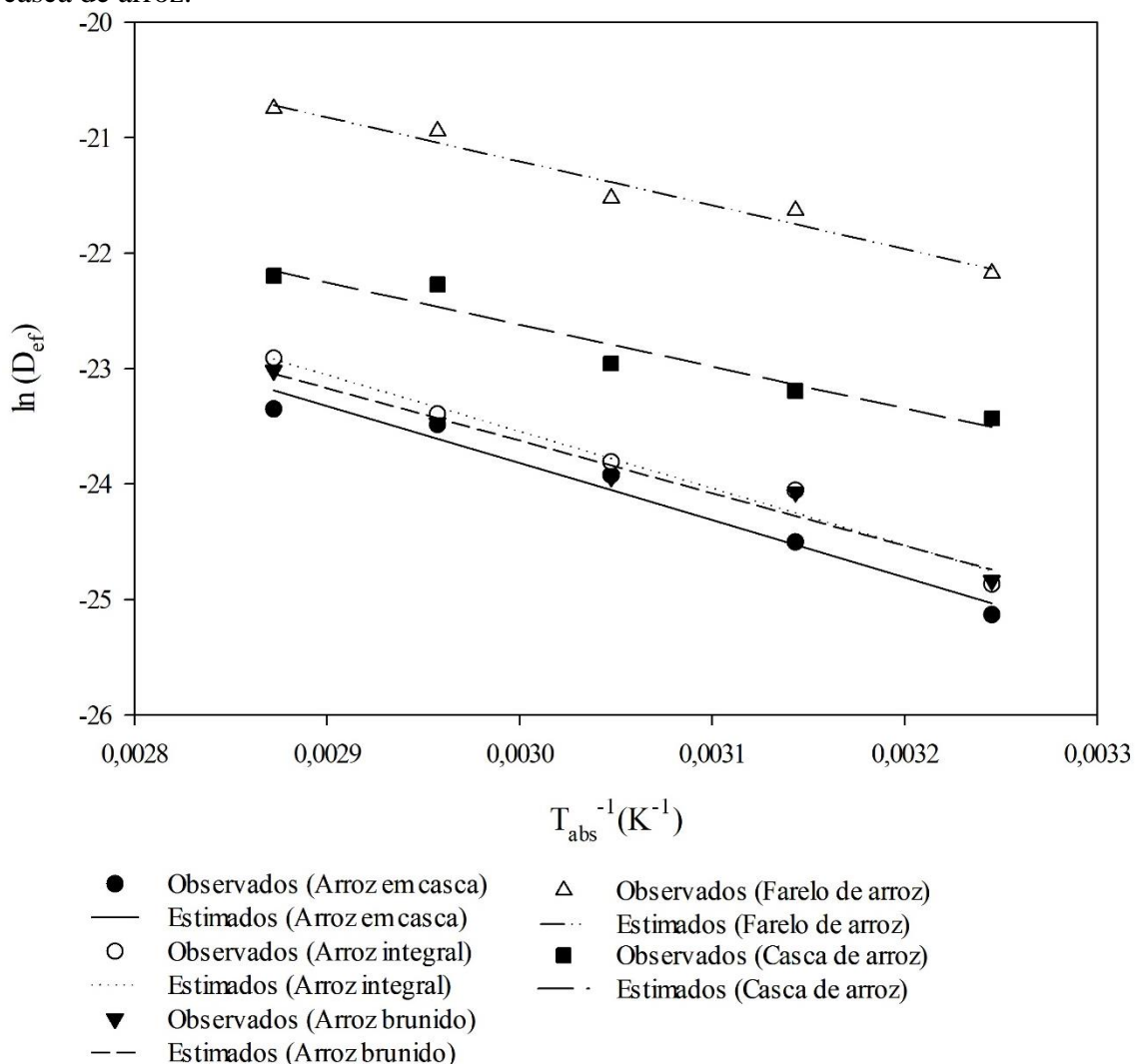
4.4. Propriedades termodinâmicas de secagem

Na Figura 19 está representada a dependência da difusividade efetiva com relação à temperatura do ar de secagem, descrita pela linearização da equação de Arrhenius, para o arroz em casca e suas partes constituintes.

Analisando a figura, é confirmada a dependência do coeficiente de difusão efetiva com a temperatura do ar de secagem, sendo representados satisfatoriamente por uma equação do tipo Arrhenius. As equações obtidas apresentaram bons valores de coeficiente de variação (R^2), que foram superiores a 98% para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido e farelo de arroz; e próximo a 97% para casca de arroz. Além disso, a linearidade decrescente evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada (SANTOS et al., 2013).

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação $E_a.R^{-1}$, ou seja, a relação entre a energia de ativação (E_a) e a constante universal dos gases (R). Enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor do fator pré-exponencial (D_0). Assim, por meio da equação linearizada de Arrhenius, obteve-se a energia de ativação (E_a) do arroz em casca e de suas partes constituintes, apresentados na Tabela 17.

Figura 19 – Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 17 – Parâmetros da equação de Arrhenius ajustados aos coeficientes de difusão efetiva, seus coeficientes de determinação (R^2 ,%) e energia de ativação (E_a , $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) de arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.

Tratamento	Equação	R^2 (%)	E_a ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
Arroz em casca	$D_{ef}=1,26 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-4.946,58}{T_{abs}}\right)$	98,41	40,23
Arroz integral	$D_{ef}=1,56 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-4.925,57}{T_{abs}}\right)$	98,71	40,06
Arroz brunido	$D_{ef}=4,71 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-4.553,99}{T_{abs}}\right)$	98,29	37,04
Farelo de arroz	$D_{ef}=5,62 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-3.805,18}{T_{abs}}\right)$	98,23	30,95
Casca de arroz	$D_{ef}=8,25 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-3.637,04}{T_{abs}}\right)$	96,89	29,58

Fonte: Da autora (2020).

Pode-se observar que a energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem foi de aproximadamente 40,2354 kJ.mol⁻¹ para arroz em casca; 40,0646 kJ.mol⁻¹ para arroz integral; 38,5461 kJ.mol⁻¹ para arroz brunido; 30,9513 kJ.mol⁻¹ para farelo de arroz e 29,5837 kJ.mol⁻¹ para casca de arroz, na faixa de temperatura estudada, de 35, 45, 55, 65 e 75°C. A energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, uma vez que, nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade da água no produto (CORRÊA et al., 2007).

Segundo Zogzas, Maroulis e Marinoukouris (1996), a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ.mol⁻¹, dessa forma, os valores obtidos adequam-se dentro desta faixa. Na literatura, encontram-se valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas: feijão azuki 27,69 kJ.mol⁻¹ (ALMEIDA et al., 2020); girassol 26,28 kJ.mol⁻¹ (CARVALHO et al., 2018); soja NS7901RR 16,30 kJ.mol⁻¹, TMG1180RR 14,45 kJ.mol⁻¹, TMG132RR 13,34 kJ.mol⁻¹ e P98Y70 13,53 kJ.mol⁻¹ (BOTELHO et al., 2018); arroz vermelho em casca 20,13 kJ.mol⁻¹ (SOUSA et al., 2016).

Na Tabela 18, estão apresentadas as propriedades termodinâmicas entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) encontradas no processo de secagem de arroz em casca e suas partes constituintes nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

Tabela 18 – Entalpia (ΔH , kJ.mol⁻¹), entropia (ΔS , kJ.mol⁻¹) e energia livre de Gibbs (ΔG , kJ.mol⁻¹) para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz secados nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Continua)

Tratamento	Temperatura (°C)	ΔH (kJ.mol ⁻¹)	ΔS (x10 ⁻² kJ.mol ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
Arroz em casca	35	37,7290	-27,2011	121,5491
	45	37,6476	-27,2043	124,1981
	55	37,5663	-27,2074	126,8473
	65	37,4849	-27,2104	129,4969
	75	37,4036	-27,2133	132,1467
Arroz integral	35	37,5581	-27,0313	120,8551
	45	37,4767	-27,0345	123,4871
	55	37,3954	-27,0376	126,1193
	65	37,3141	-27,0406	128,7519
	75	37,2327	-27,0435	131,3848
Arroz brunido	35	36,0796	-27,4782	120,7538
	45	35,9983	-27,4814	123,4304
	55	35,9170	-27,4845	126,1073
	65	35,8356	-27,4875	128,7846
	75	35,7543	-27,4904	131,4622

Tabela 18 – Entalpia (ΔH , $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), entropia (ΔS , $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) e energia livre de Gibbs (ΔG , $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz secados nas temperaturas de 35, 45, 55, 65 e 75°C.

(Conclusão)				
Tratamento	Temperatura (°C)	ΔH ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	ΔS ($\times 10^{-2}\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	ΔG ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
Farelo de arroz	35	28,4448	-27,8597	114,2945
	45	28,3635	-27,8629	117,0093
	55	28,2822	-27,8660	119,7244
	65	28,2008	-27,8690	122,4398
	75	28,1195	-27,8719	125,1555
Casca de arroz	35	27,0772	-29,4204	117,7361
	45	26,9958	-29,4235	120,6070
	55	26,9145	-29,4267	123,4781
	65	26,8332	-29,4297	126,3496
	75	26,7518	-29,4325	129,2214

Fonte: Da autora (2020)

Constata-se que para os tratamentos investigados, os valores de entalpia apresentaram-se na faixa entre 37,7290 e 37,4036 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz em casca, 37,5581 e 37,2327 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz integral, 36,0769 e 35,7543 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz brunido, 28,4448 e 28,1195 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para farelo de arroz e 27,0772 e 26,7518 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para casca de arroz. Para todas as temperaturas de secagem, o arroz em casca apresentou maior entalpia, seguido de arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz.

Em todas as situações os valores de entalpia (ΔH) foram positivos, indicando que houve reações endergônicas, isto é, houve necessidade de energia na forma de calor para que o processo de secagem ocorresse (COSTA et al., 2016). Observa-se também, que os resultados de entalpia reduziram sua magnitude conforme aumentou a temperatura de secagem. De acordo com Oliveira et al. (2010), os valores menores de entalpia obtidos para temperaturas maiores de secagem indicam que há uma necessidade menor de energia para remover a água ligada ao produto durante a secagem. Esse comportamento está relacionado com o aumento da pressão parcial de vapor de água nos grãos com a elevação da temperatura do ar de secagem. Desta forma, ocorre o aceleração de difusão da água do interior para a superfície do grão, ocorrendo perda da água do produto por dessorção (SOUSA et al., 2016).

Os valores para entropia (ΔS) variaram entre -27,2011 e -27,2133 $\times 10^{-2}$ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz em casca, -27,0313 e -27,0435 $\times 10^{-2}$ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz integral, -27,4782 e -27,4904 $\times 10^{-2}$ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz brunido, -27,8597 e -27,8719 $\times 10^{-2}$ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para farelo de arroz e -29,4204 e -29,4325 $\times 10^{-2}$ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para casca de arroz. Para todas as temperaturas de secagem, o arroz em integral apresentou maior entropia, seguido de arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz. A entropia é uma propriedade

termiônica que pode ser associado com o grau de desordem entre a água e o produto (GONELI et al., 2010). Os valores negativos da entropia podem ser atribuídos à existência de adsorção química ou modificações estruturais dos grãos durante o processo de secagem (MOREIRA et al., 2008).

Observa-se que, assim como a entalpia, e entropia também diminui com o aumento da temperatura de secagem. Conforme Corrêa et al. (2011), esse fenômeno acontece durante o processo de secagem devido que o teor de água de equilíbrio diminui e, dessa forma, o movimento das moléculas de água fica mais restrito, porque há menos sítios disponíveis.

A energia livre de Gibbs (ΔG) apresentou valores positivos para todas as situações estudadas e apresentaram a tendência de aumento com a elevação da temperatura de secagem, variando de 121,5491 a 132,1467 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz em casca, 120,8551 a 131,3848 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz integral, 120,7538 a 131,4622 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para arroz brunido, 114,2945 a 125,1555 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para farelo de arroz e 117,7361 a 129,2214 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para casca de arroz. Este comportamento demonstra que a secagem foi um processo não espontâneo, pois os valores de energia livre de Gibbs positivos são característicos de uma reação exógena, ou seja, aquela que necessita de um agente externo fornecendo energia ao ambiente (ALVES & RODOVALHO, 2016). Portanto, com o aumento da temperatura de secagem observou-se a redução da entalpia e entropia, e o aumento da energia livre de Gibbs para arroz em casca e suas partes constituintes. Esse comportamento também foi apresentado recentemente na secagem de outros produtos agrícolas como: feijão azuki (ALMEIDA et al., 2020); mesocarpo de pequi (SOUZA et al., 2019); fatias de acuri (SANTOS et al., 2019b) e feijão guandu (MAIA et al., 2019).

4.5. Sistema de resistência

Por meio das propriedades termodinâmicas foram obtidos os coeficientes de resistência médio (η) para arroz em casca e suas partes constituintes, nas temperaturas de secagem de 35, 45, 55, 65 e 75°C, sendo apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores dos coeficientes de resistência à desidratação (η , $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz em função da temperatura.

Tratamento	Temperatura (°C)	η ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Arroz em casca	35	$3,5326 \times 10^{-11}$
	45	$5,7300 \times 10^{-11}$
	55	$8,9362 \times 10^{-11}$
	65	$1,3464 \times 10^{-10}$
	75	$1,9758 \times 10^{-10}$
Arroz integral	35	$3,7818 \times 10^{-11}$
	45	$6,1211 \times 10^{-11}$
	55	$9,5270 \times 10^{-11}$
	65	$1,4327 \times 10^{-10}$
	75	$2,0987 \times 10^{-10}$
Arroz brunido	35	$1,2630 \times 10^{-10}$
	45	$1,9682 \times 10^{-10}$
	55	$2,9562 \times 10^{-10}$
	65	$4,2991 \times 10^{-10}$
	75	$6,1020 \times 10^{-10}$
Farelo de arroz	35	$1,4346 \times 10^{-9}$
	45	$2,0713 \times 10^{-9}$
	55	$2,8957 \times 10^{-9}$
	65	$3,9363 \times 10^{-9}$
	75	$5,2427 \times 10^{-9}$
Casca de arroz	35	$2,4757 \times 10^{-9}$
	45	$3,5136 \times 10^{-9}$
	55	$4,8337 \times 10^{-9}$
	65	$6,4720 \times 10^{-9}$
	75	$8,4977 \times 10^{-9}$

Fonte: Da autora (2020).

Observando-se a Tabela 19, os maiores valores de coeficientes de resistência foram apresentados pela casca do arroz, seguido do farelo, arroz brunido, arroz integral e, por fim, arroz em casca. Os coeficientes de resistência aumentaram com a elevação da temperatura de secagem para todos os tratamentos de secagem, como é evidenciado nas Figuras 20 e 21. Esta tendência de aumento do coeficiente com o aquecimento do ar de secagem também foi verificada por Resio, Aguerre e Suarez (2005), no estudo da secagem de amaranto, que observaram um aumento no coeficiente de resistência de $1,29 \times 10^{-9}$ para $1,78 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ com a elevação da temperatura de secagem de 40 para 70°C.

Figura 20 – Coeficiente de resistência à desidratação ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) para arroz em casca, arroz integral e arroz brunido em função da temperatura.

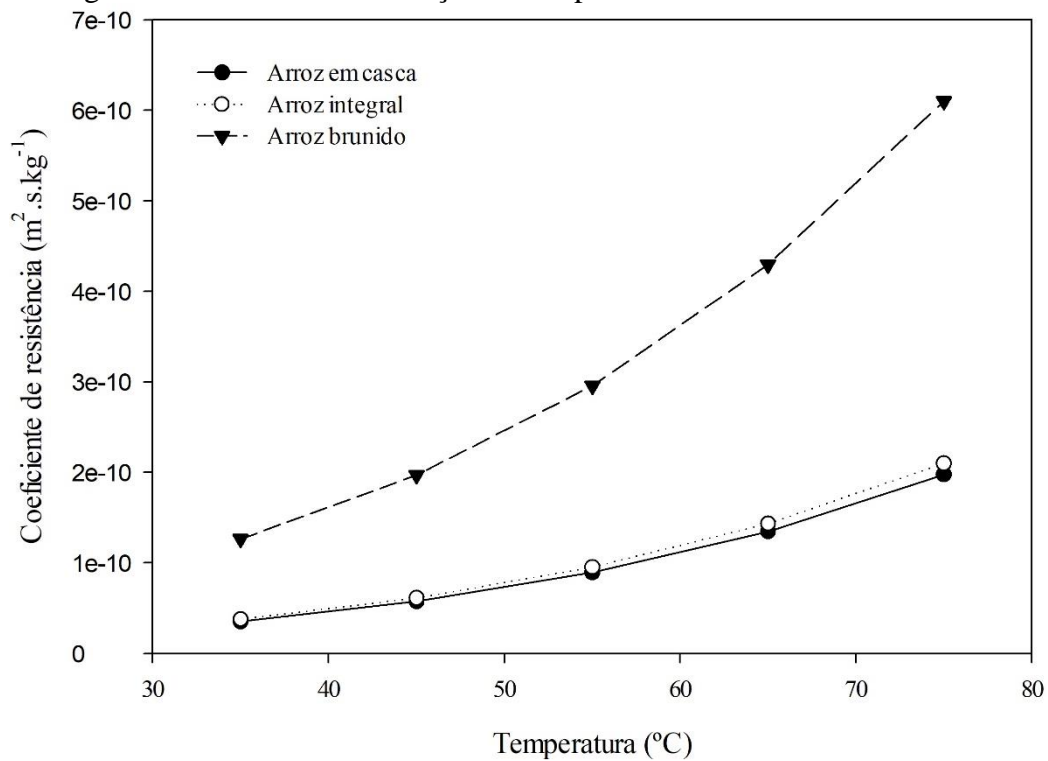
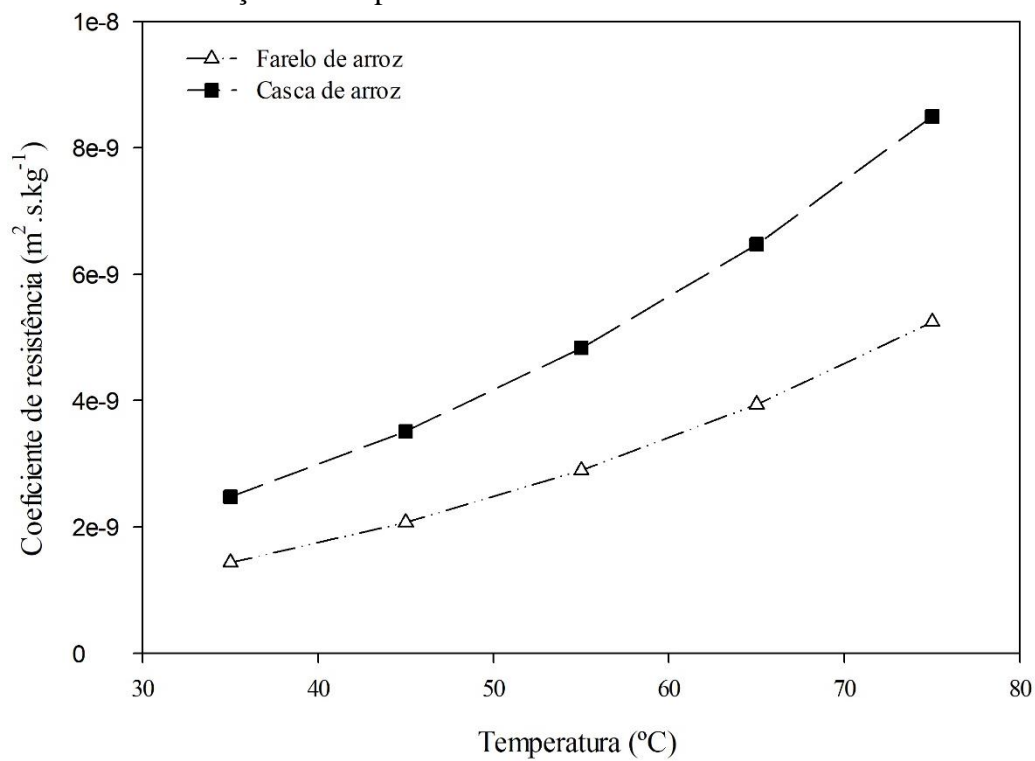


Figura 21 – Coeficiente de resistência à desidratação ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) para farelo de arroz e casca de arroz em função da temperatura.



Nas menores temperaturas de secagem, ocorre uma diferença de pressão de vapor entre o ar de secagem e o produto menor se comparada à que ocorrem em temperaturas mais elevadas. Quando o gradiente foi menor, o produto impôs uma resistência menor à saída de água, pois a movimentação da água do produto para o ar ocorreu de forma mais branda e lenta. Já quando a diferença do gradiente de pressão de vapor apresentou-se maior o produto apresentou maior resistência à desidratação, pois a secagem ocorreu de forma abrupta.

Em estudo sob o efeito da umidade relativa de secagem de frutos de café e suas partes anatômicas, Dias (2017) obteve coeficientes de resistência à desidratação para o café natural de 7,65657; 6,17111; 6,4715; $4,74079 \times 10^{-13} \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente. Neste trabalho também foi observado o aumento do coeficiente de resistência conforme aumentava o gradiente de pressão de vapor entre o produto e o ar de secagem, ou seja, quando foi diminuída a umidade relativa do ar de secagem.

Considerando que a resistência total equivale à resistência do arroz em casca para a resistência à saída de água para cada temperatura de secagem estudada, foram consideradas as influências da espessura média de cada parte anatômica. Os valores médios obtidos para a influência destas partes estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores das influências das espessuras da casca (I_c), farelo (I_f) e endosperma (I_e) na espessura do arroz em casca (decimal).

Influência das partes	Temperatura (°C)				
	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
I_c	0,0555	0,0592	0,0595	0,0523	0,0522
I_f	0,0663	0,0653	0,0676	0,0669	0,0693
I_e	0,8782	0,8755	0,8729	0,8809	0,8785

Fonte: Da autora (2020).

Observa-se que a espessura do endosperma, ou seja, o arroz brunido, apresenta maior influência na espessura total do grão de arroz em casca, seguido pelo farelo e a casca, respectivamente.

A partir da determinação da influência das espessuras e dos coeficientes de resistência do arroz em casca e suas partes constituintes, foi possível determinar os coeficientes de correção (A para casca de arroz, B para farelo de arroz e C para arroz brunido), do modelo proposto (Equação 50). Estes parâmetros foram calculados experimentalmente pela simulação computacional no software STATISTICA 5.0®. Os

coeficientes do modelo e os parâmetros estatísticos do modelo estão apresentados na Tabela 21.

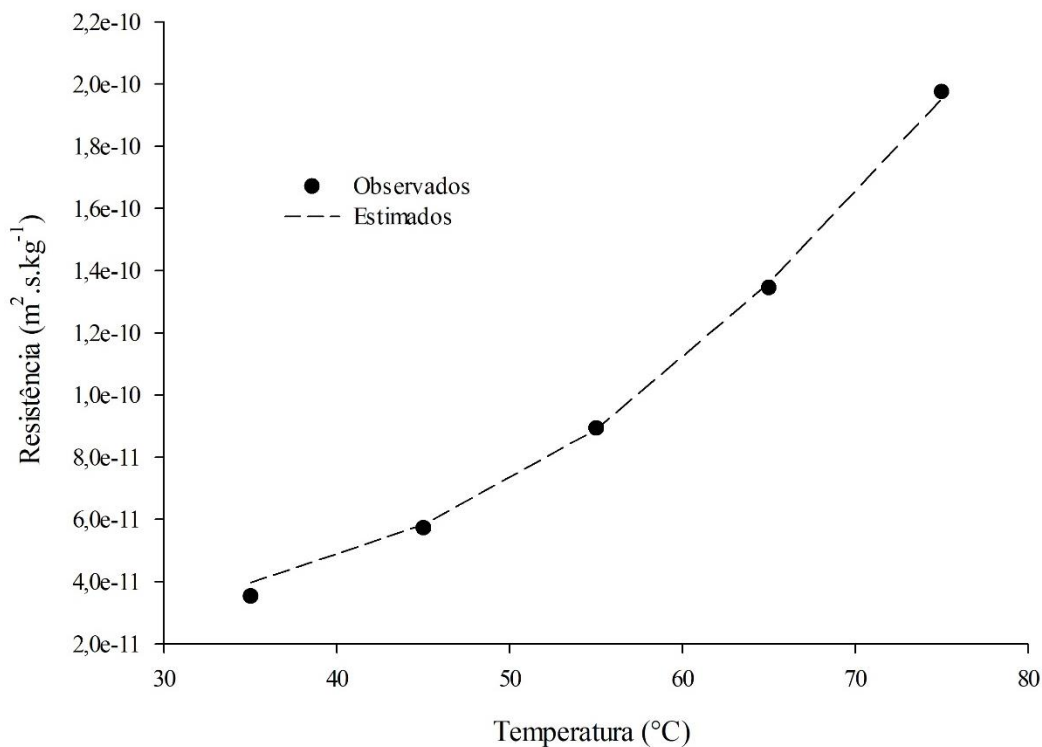
Tabela 21 – Coeficientes do modelo proposto (A, B e C, decimal) para analisar a resistência de cada parte componente do arroz em casca, coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal) do modelo proposto.

Modelo	Coeficientes do modelo			Parâmetros estatísticos		
	A	B	C	R^2	SE	P
Modelo proposto	-0,1630	0,3380	0,2700	99,9174	$5,2672 \times 10^{-12}$	3,3636

Fonte: Da autora (2020).

Considerando os critérios estatísticos para seleção dos modelos matemáticos já utilizados neste trabalho de: coeficiente de determinação (R^2) superior a 90%, erro médio relativo (P) menor que 10% e desvio padrão da estimativa próximo a zero; o modelo proposto representa satisfatoriamente o comportamento da resistência à desidratação de grãos de arroz em casca. Na Figura 29 são apresentados os dados observados e estimados pelo modelo para a resistência à desidratação de arroz em casca.

Figura 22 – Valores de resistência à desidratação observados e estimados pelo modelo proposto para arroz em casca.



Fonte: Da autora (2020).

A Tabela 22 apresenta os valores corrigidos das resistências, considerando a influência da espessura das estruturas e os coeficientes de correção do modelo, de acordo os parâmetros encontrados no *Statistica 5.0*[®].

Tabela 22 – Somatório das resistências ($m^2.s.kg^{-1}$) de cada parte do arroz em casca considerando espessura média e o fator de correção em comparação com a resistência total.

Tratamento	Temperatura de secagem (°C)				
	35	45	55	65	75
Arroz em casca	$3,53 \times 10^{-11}$	$5,73 \times 10^{-11}$	$8,94 \times 10^{-11}$	$1,35 \times 10^{-10}$	$1,98 \times 10^{-10}$
Arroz integral	$6,21 \times 10^{-11}$	$9,22 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-10}$	$1,91 \times 10^{-10}$	$2,68 \times 10^{-10}$
Arroz brunido	$3,22 \times 10^{-11}$	$4,65 \times 10^{-11}$	$6,97 \times 10^{-11}$	$1,02 \times 10^{-10}$	$1,45 \times 10^{-10}$
Farelo de arroz	$2,99 \times 10^{-11}$	$4,57 \times 10^{-11}$	$6,62 \times 10^{-11}$	$8,90 \times 10^{-11}$	$1,23 \times 10^{-10}$
Casca de arroz	$-2,24 \times 10^{-11}$	$-3,39 \times 10^{-11}$	$-4,69 \times 10^{-11}$	$-5,51 \times 10^{-11}$	$-7,23 \times 10^{-11}$
Resistência total	$3,97 \times 10^{-11}$	$5,83 \times 10^{-11}$	$8,90 \times 10^{-11}$	$1,36 \times 10^{-10}$	$1,95 \times 10^{-10}$

Fonte: Da autora (2020).

Os valores de resistência para arroz em casca são os coeficientes de resistência obtidos pela Equação 49. Os valores resistência do arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz apresentados, foram obtidos conforme o modelo proposto, multiplicando seus coeficientes de resistência pela influência na espessura total do arroz em casca e seus coeficientes de correção. Os valores de arroz integral foram obtidos por meio do somatório das resistências do farelo de arroz e o arroz brunido, conforme o modelo. A resistência total, que no modelo proposto equivale ao arroz em casca, foi obtido pela soma das resistências entre casca de arroz, farelo de arroz e arroz brunido.

Observa-se que a resistência total obtida apresentou valores semelhantes aos coeficientes de resistência obtidos pelo arroz em casca. Além dos bons parâmetros estatísticos obtidos, este resultado confirma a representatividade do modelo proposto para a secagem compartimentada realizada.

5. CONCLUSÕES

Isotermas de sorção:

- Os teores de água de equilíbrio do arroz integral e do arroz brunido apresentam magnitude muito próxima em todas as condições ambientais estudadas. Apresentando-se maiores que o farelo de arroz, arroz em casca e casca de arroz, respectivamente;
- O modelo de Copace apresenta melhores ajustes estatísticos para as isotermas de sorção de arroz em casca, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz;
- O modelo de Sigma Copace representa adequadamente a higroscopicidade do arroz integral;
- Em todas as condições estudadas, obteve-se considerando-se o mesmo teor de água de equilíbrio, que com a elevação da temperatura resulta no aumento da atividade de água do produto;
- Para uma atividade de água constante, o aumento da temperatura ocasiona a diminuição do teor de água de equilíbrio, para arroz em casca e suas partes constituintes.

Cinética de Secagem:

- O aumento da temperatura de secagem diminui o tempo de secagem e o teor de água de equilíbrio do produto no final do processo;
- O modelo de Midilli é o que melhor se ajusta aos dados experimentais da cinética de secagem do arroz em casca, nas cinco temperaturas de secagem estudadas;
- O modelo de Aproximação da difusão descreve os dados experimentais da cinética de secagem do arroz integral, exceto na temperatura de 45°C, em que o processo foi melhor descrito pelo modelo de Midilli;
- Para o arroz brunido, o modelo matemático de Midilli obtém os melhores ajustes para as temperaturas de secagem de 35, 45 e 65°C, enquanto para 55 e 75°C os melhores ajustes foram para o modelo de Aproximação da difusão;
- O modelo matemático de Midilli apresenta os melhores parâmetros de ajustes aos dados experimentais e foi selecionado como o mais adequado para representar a cinética de secagem de farelo de arroz nas temperaturas de 45, 55 e 65°C, e o modelo de Aproximação da difusão selecionado para as temperaturas de 35 e 75°C, do mesmo produto;
- Com base nos parâmetros estatísticos, o modelo de Aproximação da difusão descreve a cinética de secagem da casca de arroz, exceto na temperatura de 55°C, em que o processo foi melhor descrito pelo modelo de Midilli.

Coeficiente de Difusão Efetiva:

- Os coeficientes de difusão efetiva aumentam com a elevação da temperatura do ar de secagem, para arroz em casca, arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz;
- O farelo de arroz apresenta os maiores valores de coeficiente de difusão efetiva dentre os tratamentos estudados, em todas as condições de temperaturas.

Propriedades Termodinâmicas:

- O arroz em casca apresenta a maior energia de ativação e entalpia, seguido de arroz integral, arroz brunido, farelo de arroz e casca de arroz, respectivamente;
- O aumento da temperatura de secagem proporciona a redução da entalpia e entropia para todos os tratamentos estudados;
- A energia livre de Gibbs aumenta proporcionalmente com a elevação da temperatura de secagem, para arroz em casca e suas partes constituintes.

Sistema de Resistência:

- O arroz em casca apresenta maior resistência à desidratação de $3,5326 \times 10^{-11}$; $5,7300 \times 10^{-11}$; $8,9362 \times 10^{-11}$; $1,3464 \times 10^{-10}$; $1,9758 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ nas temperaturas de secagem de 35, 45, 55, 65 e 75°C, respectivamente;
- A elevação da temperatura de secagem proporciona um aumento na resistência à desidratação, para arroz em casca e suas partes constituintes;
- Cada parte do arroz em casca imprime diferente resistência a desidratação, em que o farelo de arroz apresenta maior resistência, seguido pela casca de arroz e arroz brunido, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Relationship between energies of water sorption and diffusion in grains. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 24, p. 317-320, 1989

AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C. Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki. **Científica**, v.41, p.130-137, 2013.

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; PEREIRA, T. dos S.; QUEIROGA, A. P. R. de; SILVA, V. M. de A.; RIBEIRO, V. H. de A.; ARAÚJO, R. D. A.; CABRAL, M. B.; SILVA, L. R. I. da; BORGES, E. M. E. S. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, e27932316, 2020

ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate CV ‘Quintal’ (*Persea Americana* Mill). **Revista Agrotecnologia**, 7(1), 86-98. 2016

ALVES, A. R.; PASCOAL, L. A. F.; CAMBUI, G. B.; TRAJANO, J. da S.; SILVA, C, M, da; GOIS, G. C. Fibra para ruminantes: Aspecto nutricional, metodológico e funcional. **Pubvet**, v.10, n.7, p.568-579, jul., 2016

AMATO, G. W.; ELIAS, M. C. **A Parboilização do arroz**. 1. ed. Porto Alegre: Ricardo Lenz Editor, 2005.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicados na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 301-347.

ARAL, S., BEŞE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, v. 210, n.1, 2016, p. 577-584.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Ciência Agronômica**, v.48(3), p. 448-457. 2017.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, London, n. 91, p. 76-87, 2016.

AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O.; ONI, S.A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v.87, p.179– 190, 2004.

BABBITT, J. D. On the diffusion of adsorbed gases through solids. **Canadian Journal of Physics**, Ottawa, v. 29, p. 437-446, 1950.

BARBOSA, K. F.; SALES, J. de F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. de; ZUCHI, J.; SOUSA, K. A. de. Desorption isotherms and isosteric heat of ‘cajuzinho-do-cerrado’

achenes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.20, n.5, p.481-486, 2016

BARROS, S. L.; CÂMARA, G. B.; LEITE, D. D. de F.; SANTOS, N. C.; SANTOS, F. S. dos; SOARES, T. da C.; LIMA, A. R. N.; SOARES, T. da C.; OLIVEIRA, M. N.; VASCONCELOS, U. A. A.; ALBUQUERQUE, A. P.; QUEIROZ, A. J. de M. Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas do kino (*Cucumis metuliferus*). **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, e60911608, 2020

BECKER, H.A.; SALLANS, H.R. A theoretical study of the mechanism of moisture diffusion in wheat, **Cereal Chemistry**, v. 34, p. 395-409, 1957.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. v. 1, 631 p.

BOTELHO, F. M.; BOCHIROLI NETO, N. J.; BOTELHO, S. de C. C.; OLIVEIRA, G. H. H. de; HAUTH, M. R. Sorption isotherms of Brazil nuts. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 23, n. 10, p. 776-781, 2019.

BOTELHO, F.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINS, M.A.; BAPTESTINI, F.M. Análise da hidratação do arroz na parboilização. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, p.713-718, 2010.

BOTELHO, F. M.; GARCIA, T.R.B.; VIANA, J.L.; BOTELHO, S.C.C.; SOUSA, A.M.B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetiva de grãos de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, MG, v.14, n.2, p.260-272, 2015.

BOTELHO, F. M.; HOSCHER, R. H.; HAUTH, M. R.; BOTELHO, S. de C. C. Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. **Engenharia na Agricultura**, v.26, n.1, p. 13-25, 2018

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. 399 p.

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

BUSTOS-VANEGAS, J. D.; CORRÊA, P. C.; ZEYMER, J. S.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C. Moisture sorption isotherms of quinoa seeds: Thermodynamic analysis. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.38, n.6, p.941-950, nov./dec. 2018

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.3, p.206-214, 2015.

CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C.; ZAIDAN, I. R.; ZAIDAN, U. R.; LEITE, R. A. Moisture sorption isotherms of sunflower seeds: Thermodynamic analysis. **Ciência e Agrotecnologia**, 43:e011619, 2019

CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C.; FERNANDES, L. S.; BAPTESTINI, F. M.; COSTA, C. F.; BUSTOS-VANEGAS, J. D. Bean grain hysteresis with induced mechanical

damage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.20, n.10, p.930-935, 2016.

CANO-HIGUITA, D.M.; VILLA-VÉLEZ, H.A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H.A.; TELIS, V.R.N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v.93, p.19- 28. 2015.

CARVALHO, J. M. G.; BUENO, S. G. S.; OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da secagem do grão de girassol. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.11, n.02, p.136-149, mai/ago. 2018

CAVALCANTE, M. D.; PLÁCIDO, G.R.; OLIVEIRA, D. E. C.; FREITAS, B. S. M. de; CAGNIN, C.; OLIVEIRA, D.de S. Isotherms and isostatic heat of foam-mat dried yellow mombin pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.6, p.436-441, 2018.

CHAVES, T. H.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. DE; SMANIOTTO, T. A. DE S.; SOUSA, K. A. Isotermas e calor isostérico das sementes de pinhão-manso. **Engenharia na Agricultura**, v.23, p.9-18, 2015.

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

CHOI, B. M. EMC/ERH of rough rice and brown rice. **J. Biosystems Eng.** 30(2): 95-101. 2005.

CHRIST, D.; CUNHA, R. L.; MENEGALLI, F. C.; TAKEUCHI, K. P. COELHO, S. R. M.; NÓBREGA, L. H. P. Sorption isotherms of albumen dried in a spout fluidised bed. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.10, p.151–155, 2012.

CIENTEC, Fundação de Ciência e Tecnologia. **Aproveitamento energético da casca de arroz**. Porto Alegre: Cientec, 1986.

COELHO, B. E. S.; SÁ, C. H. de; SILVA, L. F. M.; SOUSA, K. dos S. M. de; MACHADO, N. S. Ajuste de modelos matemáticos a curva de secagem da banana cv. Terra com uso de energia solar térmica sob exposição direta. **Revista Craibeiras de Agroecologia**. v. 4, n. 1, p. e7688, 2019

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Conab. v. 6, n. 8. Maio, 2019.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; STRINGHETA, P. C. Estudo do fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, p. 19-25, 2000.

CORRÊA, P. C.; ALMEIDA, F. de A. C. Comparação de modelos matemáticos de equilíbrio higroscópico para semente e fibra de algodão herbáceo, cultivar redenção. **Revista de Oleaginosas e Fibras**, v. 3, p.1–6, 1999.

CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. de C. C.; GONELI, A.L. D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1047–1052, 2014.

CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; CAMPOS, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.

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

CORRÊA, P.C.; MOURE, J. Higroscopicidad y propiedades térmicas de semillas de sorgo. **Alimentacion Equipos y Tecnologia**, v.29, p.149-153, 2000.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. de; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. de; OLIVEIRA, A. P. L. R. de; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Isotermas de dessecamento de sementes de beterraba. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.24, n.1, 2016.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; 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**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, maio/ago. 2007

CORRÊA, P.C., RESENDE, O., GONELI, A.L.D., BOTELHO, F.M., NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, p.117 - 126, 2006.

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

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D. N.; OLIVEIRA, D. E. C. de. Modelagem matemática da secagem de frutos de crame em camada delgada **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 392-403, Mar./Apr. 2015a

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOUSA, K. A. de. Isotermas e calor isotérmico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015b.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford. 2ª Ed. 421 p. 1975.

CUEVAS, M.; MARTÍNEZ-CARTAS, M. L.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; HERNÁNDEZ, L.; GARCÍA-MARTÍN, J. F.; SÁNCHEZ, S. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. **Renewable Energy**, 132(1), 911-920. 2019.

CUNNINGHAM, S.E.; MCMINN, W.A.M.; RICHARDSON, P.S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of Food Engineering**, v.82, p.600–607, 2007.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 778-782. 2001.

DENG, L. Z.; YANG, X. H.; MUJUMDAR, A. S.; ZHAO, J. H.; WANG, D.; ZHANG, Q.; WANG, J.; GAO, Z. J.; XIAO, H. W. Red pepper (*Capsicum annum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. **Drying Technology**, v. 36, n. 8, p. 893-907. 2017.

DIAS, C. A. **Análise da resistência à desidratação dos tecidos do pericarpo e do endosperma do fruto do café arábica**. 2017. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DIÓGENES, A. de M. G.; QUEIROZ, A. A. J. de M.; FIGUEIREDO, R. M. F. de; SANTOS, D. da C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 26, n. 1, p. 71-80, jan.-mar., 2013

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

ELIAS, M. C. Matéria-prima e controle da qualidade na industrialização do arroz. In: I Simpósio sul-Brasileiro de qualidade do arroz, 2003, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Abrapós, p. 331-351. 2003

ELIAS, M. C., Pós colheita e industrialização do arroz. In: GOMES, A.S.G; MAGALHÃES JUNIOR, A.M. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, capítulo 22, p.745-798. 2004

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L.; PARAGINSKI, R. T. e CASARIL, J. Manejo tecnológico na pós-colheita e inovações na conservação de grãos de arroz. In: ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L. **Qualidade de arroz da pós-colheita ao consumo**. Pelotas: Editora Universitária da UFPel, v. 1, p. 21-42. 2012

FERRAN, M. F.; VILAPLANA, F.; AMPARO, R-G.; BORRÁS, B-A.; CONCHA, S-B. Flour rice husk as filler in block copolymer polypropylene: Effect of diferente coupling agentes. **Journal of Applied Polymer Science**, vol 99, p. 1823-183, 2006.

FERREIRA, V. F. et al.; Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares. **Química Nova**. São Paulo. vol. 32 n.3. 2009.

FONSECA, J. R.; BRONDANI, C.; BRONDANI, R. P. V.; RANGEL, P. H. N. Recursos genéticos. In.: SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. **A Cultura do Arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2ª Ed., p 257-288. 2006.

FOROUGH-DAHR, M.; GOLMOHAMMADI, M; POURJAMSHIDIYAN, R.; RAJABI-HAMENEH, M.; HASHEMI, S. J. On the characteristics of thin layer drying

models for intermitente drying of rough rice. **Journal Chemical Engineering Communications**. vol 202, p. 1024-1035, 2015

FRANCISCO JÚNIOR, W. E.; Carboidratos: estrutura, propriedades e funções. **Química Nova**. n. 29. 6 p. 2008.

FURTADO, T. D. R.; MUNIZ, J. A.; SILVA, E. M.; FERNANDES, J. G. Drying kinetics of jaboticaba pulp by regression models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, 2019.

GARCÍA-PÉREZ, J. V.; CÁRCEL, J. A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **Food Science and Technology**. v. 41, n. 1, p.18-25, 2008

GEANKOPLIS, C. **Transport and Unit Operations**. 2 Ed. New Jersey: Prentice-Hall International Inc., 921p. 1983.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. - Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum**, vol. 33, n.1, p. 1-8, 2011.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, M. A. Moisture sorption hysteresis of rough rice. **ASABE**. St. Joseph, No. 076194. 2007.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. DE; RESENDE, O.; MAUAD, M. Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, p.751-756, 2016.

GONELI, A.L.D.; CÔRREA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v.27, n.1, p.135-140, 2007.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P.; OLIVEIRA, G. H. H. de; BOTELHO, F. M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.53, p.191-197, 2010.

GRANELLA, S. J; BECHIN, T. R.; CHRIST, D.; WERNICHE, I. Isotermas e calor isostérico de dessorção da água em sementes de trigo. **Revista Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v.27, n.4, p.304-312, 2019.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of National Bureau of Standards A**. Physics and Chemistry, New York, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, n. 4, p. 268-275, 2008.

HASSINI, L.; BETTAIEB, E.; DESMORIEUX, H.; TORRES, S. S.; TOUIL, A. Isotermas de dessorção e propriedades termodinâmicas das sementes de pêra espinhosa. **Cultivos e Produtos Industriais**, v.67, p.457-465, 2015.

HEINEMANN, R.; FAGUNDES, P.; PINTO, E.; PENTEADO, M.; LANFER-MARQUEZ, U. Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, n. 4, p. 287-296, 2005.

HENAO, J. D.; QUEIROZ, M. R. DE; HAJ-ISA, N. M. A. Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseadas em métodos estático e dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.470-476, 2009

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, p. 169-174, 1961.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, p. 1167-1168, 1974.

HUBINGER, M. D.; VIVANCOPEZANTES, D.; KUROZAWA, L. E.; SOBRAL, P. J. A. Isotermas de dessorção de filé de bonito (*Sarda sarda*) desidratado osmoticamente e defumado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.305-311, 2009.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo, 4. ed, 1020 p. 2005.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 92, p. 182-188, 2009.

KARATHANOS, V. T.; BELESSIOTIS, V. G. Application of thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. **Journal Agriculture Engineering Research**, v.74, p.355-361, 1999.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.

KATSURAYAMA, A. M.; TANIWAKI, M. H. Fungos e aflatoxinas no arroz: ocorrência e significado na saúde do consumidor. **Brazilian Journal Food Technology**, Campinas, v. 20, 2017

LAZZARI, F. A. **Umidade, fungos e micotoxinas na qualidade de sementes, grãos e rações**. Curitiba: Ed. Do Autor, 1993.

LEHN, D. N.; PINTO, L. A. de A. Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.12, n.3, 177-191, Jul./Set., 2004

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LIMA, E. E.; SILVA, A.S.; FIGUEIREDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, p.163-170, 2008.

LIMA, R. F.; FAORO, V.; WINIK, S. V.; KHATCHATOURIAN, O. Armazenamento e secagem de grãos de soja. In: JORNADA DA PESQUISA, 18, 2013, Ijuí. **Anais... Ijuí: UNIJUÍ**, 2013.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MAIA, R. B.; SANTOS, S. G. E. dos; QUEIROZ, J. S.; RODOVALHO, R. S.; SILVA, D. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of pigeon pea beans. **Científica**, Jaboticabal, v.47, n.2, p.164-174, 2019

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 238-244. 2015.

MARTINS, J.J.A.; MARQUES, J.I.; SANTOS, D.C. Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, n.6, p.1652-1660, 2014.

MASCON, E. S.; MARTIN, S.; SPEHAR, C. R.; DEVILLA, I. A.; RODOLFO JÚNIOR, R. Cinética de secagem de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* W.). **Revista Engenharia na Agricultura**. Viçosa, V.25, n.04, p.318-328, 2017

MAYTA, S.M.A.; MASSARANI, G.; PINTO, J.C. Modeling of grain drying in continuous cross-flow sliding bed dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Toronto, v.74, 1996.

MCLEAN, J.; DAWE, D.; HARDY, B.; HETTEL, G. **Rice almanac**: source book for the most important economic activity on earth. Los Baños: IRRI, p. 298. 2002

MEDEIROS, A. C. de S. Preparo e uso de soluções salinas saturadas para a caracterização fisiológica de sementes florestais. **Embrapa Florestas**. v. 125, 6p. 2006.

MENEGHETTI V. L.; AOSANI E.; ROCHA J. C.; OLIVEIRA M.; ELIAS M. C.; POHNDORF R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MESQUITA, J. B.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C. Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaiba. **Cerne**, Lavras, v. 7, p. 12-21, 2001.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Editora Universitária – UFPEL. 2002. p. 19 25.

MOHANTY, S. Trends in global rice consumption. **Rice Today**, Filipinas, v. 12, p. 44–45, abril/junho 2013.

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. **Physical properties of plant and animal materials**. 2. ed. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v.88, n.4, p.514 – 521. 2008

MULTON, J-L.; BIZOT, H.; SAVET, B.; Water adsorption in cereal foods and water activity measurement. In: INGLETT, G.E.; MUNCK, L.; **Cereals for food and beverages: recent progress in cereal chemistry**. New York: Academic Press, INC. 1980. p. 97-120.

NIAMNUY, C.; NACHAISIN, M.; LAOHAVANICH, J.; DEVAHASTIN, S. Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions. **Food Chemistry**, v. 129, n. 03, p. 899-906. 2011.

NOBRE, R. de S.; MARTINS, G. M. V.; ALBUQUERQUE, T. da N.; VIEIRA, F. J. A.; ANDRADE, M. J. C. de. Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica* L.) em camada de espuma. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**. Pombal, v. 13, n.1, p. 11-19, 2019

OLANIPEKUN, B. F.; TUNDE-AKINTUNDE, T. Y.; OYELADE, O. J.; ADEBISI, M. G.; ADENAYA, T. A. Mathematical modeling of thin-layer pineapple drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 1431-1441. 2015.

OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; FERREIRA JÚNIOR, W. N.; SILVA, I. O. F. Hygroscopicity of baru (*Dipteryx alata* Vogel) fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.279-284, 2017a.

OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; SILVA, G. P.; SALES, J. de F. Hygroscopicity of ‘sucupira-branca’ (*Pterodon emarginatus* Vogel) fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.4, p. 285-289. 2017b

OLIVEIRA, D. E. C. DE; RESENDE, O.; CAMPOS, R. C.; DONADON, J. R. Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico para sementes de arroz em casca. **Científica**, v.42, p.203-210, 2014.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.

OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. S. de S.; CAMPOS, R. C.; CHAVES, T. H. Cinética de secagem de grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.11, n.2, p. 190-201, 2012

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 100, n. 3, p. 545-550, Oct. 2010.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 303 p., 1998

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers**. 1949. 44 f. Thesis (Ph.D. in Mechanical Engineering)-Purdue University, Lafayette, 1949.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2007. 121 p.

PARK, K. J.; BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T. Secagem de produtos agrícolas. In: SEMANA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DA UNICAMP, 6, 1999. Campinas. **Anais...** Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Engenharia Agrícola, 1999. p. 41-55.

PINHEIRO, G. K. I; OLIVEIRA, D. E. C. de; FERREIRA JÚNIOR, W. N.; RESENDE, O. Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) epicarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.24, n.2, p.121-127, 2020

QUEQUETO, W. D.; SIQUEIRA, V. C.; FERRANTI, L. F.; SCHOENINGER, V.; LEITE, R. A. Cinética de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará. **Energia na Agricultura**, Botucatu, vol. 32, n.4, p.408-415, outubro-dezembro, 2017.

REDDY, B. S.; CHAKRAVERTY, A. Equilibrium moisture characteristics of raw and parboiled paddy, brown rice, and bran. **Drying Tech.** 22(4): 837-851. 2004.

RESENDE, K. K. O; SILVA, S. S. e; GUEDES, S. F.; LOSS, R. A.; Cinética de secagem e avaliação físico-química de fruta-pão (*Artocarpus altilis*) variedade seminífera. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 6, n. 1, p. 74-81, jan./mar. 2019.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v.26, p.626-631, 2006.

RESIO, A. C.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. The drying of amaranth grain: mathematical modeling and simulation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. V., 22, n. 2, p. 303-309, 2005.

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

RIGUIETO, C. V. T.; NAZARI, M. T.; EVARISTO, L. M.; ROSSETO, M.; DETTMER, A.; GERALDI, C. A. Q.; PICCINI, J. S. Influência da temperatura de secagem de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, e40932382, 2020.

ROCHA, D. C.; SANTOS, B. M.; SCHEID, C. M.; CALÇADA, L. A. Determinação dos coeficientes de difusão e convectivo na Secagem de sementes de nasturtium officinale (agrião). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 6, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: 2005.

ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Moisture sorption properties of chitosan. **Food Science and Technology**, v.43, p.415-420, 2010

SALIBA, E. de O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L. de; PILÓ-VELOSO, D. Liguininas – Métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, vol.31 n.5 Santa Maria Sept./Oct. 2001

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n. 1, p. 75-82. 2014.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Mathematical modeling for the annatto (*Bixa orellana* L.) seed drying process. **Chilean Journal of Agricultural Research**, 73(3), 320-326.2013.

SANTOS, A. E.; MARTINS, G. M. V.; CANUTO, M. F. C. S.; SEGUNDO, J. E. D. V.; ALMEIDA, R. D. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 1-6. 2016.

SANTOS, D. da C.; COSTA, T. N. da; FRANCO, F. B.; CASTRO, R. da C.; FERREIRA, J. P. de L.; SOUZA, M. A. da S.; SANTOS, J. C. P. Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas da polpa de patauá (*Oenocarpus batoua* Mart.). **Brazilian Journal Food Technology**, Campinas, v. 22, e2018305, 2019a

SANTOS, D. da C.; LEITE, D. D. de F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. de L.; SANTOS, F. S. dos; LIMA, T. L. B. de; FIGUEIREDO, R. M. F. de; COSTA, T. N. da. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Brazilian Journal Food Technology**, Campinas, v. 22, 2019b.

SANTOS, N. C.; LEITE, D. D. de F.; CÂMARA, G. B.; BARROS, S. L.; SANTOS, F. S. dos; SOARES, T. da C.; LIMA, A. R. N.; SOARES, T. da C.; ALBUQUERQUE, A. P.; OLIVEIRA, M. N.; VASCONCELOS, U. A. A.; QUEIROZ, A. J. de M. Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas de toranja (*Citrus paradisi* Macf.). **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, e61911609, 2020a.

SANTOS, S. G. R. dos; SILVA, D. P. da; SARTI, J. K.; ALMEIDA, V. G.; RODOVALHO, R. S. Adsorption isotherms and isosteric heat in *Coffea Arabica* beans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.50, e.58128, 2020b.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

SILVA, H. W. da; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. de; SOARES, R. S.; VALE, L. S. R. Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinese* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.19, n.8, p.780–784, 2015.

SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S. Isotermas de dessecção das sementes de pimenta malagueta. **Global Science and Technology**. Rio Verde, v. 05, n. 01, p.32 – 39, jan/abr. 2012.

SILVA, L. C. de M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. de; FERREIRA JÚNIOR, W. N.; RODRIGUES, G. B. Liquid diffusion during drying of sorghum grains under diferente conditions. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.39, n.6, p.737-743, nov./dec. 2019

SILVA, M. A. da.; SANCHES, C.; AMANTE, E. R. Prevention of hydrolytic rancidity in rice bran. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 4, p. 487-491, 2006.

SIQUEIRA, V. C. SILVA, F. P.; QUEQUETO, W. D.; JORDAN, R. A.; LEITE, R. A.; MABASSO, G. A. Desorption isotherms and isosteric heat of niger grains (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.) **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 12, n. 2, p. 124-133, abril-junho, 2018

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SKAAR, C.; BABIAK, M. A model for bound-water transport in wood. **Wood Science Technology**, v. 16, p. 123-138. 1982.

SMANIOTTO, T. A. de S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. de; SOUSA, K. A. de; CAMPOS, R. C. Isotermas e calor latente de dessecção dos grãos de milho da cultivar AG 7088. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.11, n.3, p. 312-322, 2012

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; COSTA, L. M. Isotermas de dessecção das sementes de nabo forrageiro obtidas pelos métodos dinâmico e estático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 216-222, 2013.

SOUSA, R. V. de; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; ALMEIDA, R. D.; ROSA, M. E. C. Análise da cinética de secagem em camada fina do arroz vermelho em casca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.18, n. Especial, p. 517-529, 2016

SOUZA, J. L. F.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; EGEEA, M. B.; CALIARI, M.; SILVA, M. A. P. da; Thermodynamic and nutritional properties and drying kinetics of pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) mesocarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 9, p. 655-661, 2019

STATSOFT. **Statistica**: data analysis software system. Version 5.0. 1995. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

STORCK, C. R.; SILVA, L. P. da; COMARELLA, C. G.; Influência do processamento na composição nutricional de grãos de arroz. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 16, n. 3, p. 259-264, jul./set. 2005.

THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-589, 1968.

UDOMKUN, P.; ARGYROPOULOS, D.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; JANJAI, S.; MÜLLER, J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. 64, n. 1, 2015, p. 67-73.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, L. M.; CHAVES, T. H. Higroscopicidade das sementes de sorgo-sacarino. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**. Jaboticabal, v.36, n.3, p.515-524, 2016

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. 8 mai. 2019. Disponível em: <<https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde1118.pdf>>. Acesso em: 9 dez. 2019.

VEGA-GÁLVEZ, A.; LÓPEZ, J.; AH-HEN, K.; TORRES, M. J.; LEMUS-MONDACA, R. Thermodynamic properties, sorption isotherms and glass transition temperature of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Food Technology and Biotechnology**, v.52, p.83-92, 2014.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.

VIDAL, V. M.; RESENDE, O.; BESSA, J. F. V.; MORAIS, W. A.; SILVA, L. A.; VIRGOLINO, Z. Z. Adjustment of models and effective diffusivity in the drying of *Azadirachta indica* A. Juss. Leaves. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v. 21, n. 4, p. 1-12. 2016.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1184-1192, 2008.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 11, p. 668-672, 1978.

WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995.

ZEYMER, J. S.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C. Mathematical modeling and hysteresis of sorption isotherms for paddy rice grains. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.39, n.4, p.524-532, jul./aug. 2019

ZIEGLER, V.; FERREIRA, C. D.; HOFFMANN, J. F.; CHAVES, F. C.; VANIER, N. L.; OLIVEIRA, M. de; ELIAS, M. C. Cooking quality properties and free and bound phenolics content of brown, black, and red rice grains stored at different temperatures for six months. **Food Chemistry**, n. 242, p. 427-434, fev, 2018.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.