

MODELAGEM MATEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA HIDRATAÇÃO DO ARROZ

KARINA R. HONORATO¹
LEOMARA F. RIBEIRO²
THAISA C. V. BALBINOTI⁴
LUIZ M. M. JORGE^{1,3}
REGINA M. M. JORGE^{1*}

O arroz é a base da alimentação da sociedade brasileira e em grande parte da população mundial. É importante compreender as etapas do seu beneficiamento, proporcionando um processamento seguro e otimizado. A etapa de hidratação é fundamental para produção do arroz parboilizado e integral germinado. Por isso, o objetivo deste trabalho foi estudar a hidratação de grãos de arroz em casca, da variedade SCS122. O ensaio ocorreu em banho termostático, em 5 temperaturas (25, 35, 45, 55 e 65 °C) e durante 16 horas, sendo analisadas amostras a cada 15 minutos de hidratação até 3 horas, e após, a cada 1 hora até 16 horas. Para o estudo cinético foram utilizados 4 modelos matemáticos, sendo 1 fenomenológico: Modelo da Difusão baseado na segunda Lei de Fick e 3 empíricos: Peleg, Page e 1ª Ordem, a fim de avaliar os parâmetros do Processo de hidratação de arroz. Os parâmetros dos diferentes modelos ajustados (de Peleg, Page, Primeira Ordem e Difusão): k_1 , k_p , k e D_{ef} , respectivamente, apresentaram dependência linear com o aumento da temperatura, o que resultou em aumento da taxa de absorção de água em temperaturas superiores. Os modelos de Peleg e Page descreveram bem a cinética de hidratação, com um R^2 de 0,99, respectivamente, já os modelos de Difusão e Primeira Ordem descreveram com proximidade os dados experimentais, R^2 de 0,91 e 0,98, respectivamente. Todos os modelos representaram as principais tendências do processo, sendo que o modelo de Peleg foi o que melhor representou a hidratação do arroz.

PALAVRAS-CHAVE: PARBOILIZAÇÃO; CEREAL; CINÉTICA DE
HIDRATAÇÃO.

¹ Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - PPGEAL, Universidade Federal do Paraná.

² Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, *campus* avançado Jandaia do Sul.

³ Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá.

⁴ Departamento de Engenharia de Alimentos, Ciências Farmacêuticas, Alimentação e Nutrição, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

*E-mail para correspondência: rjorge@ufpr.br

1. INTRODUÇÃO

A sociedade demanda cada vez mais por pesquisas que levem a uma produção de alimentos de forma mais eficiente, com menor perda, maior produtividade, isto é, particularmente nesse caso, maior quantidade de arroz processado por área plantada. Com isso tem-se maior disponibilidade do grão, uma vez que há a necessidade de produzir mais alimentos sem avançar muito sobre áreas preservadas (SOARES et al., 2017). O estudo do processo de hidratação desse cereal, é uma etapa importante para mitigar essas perdas no processamento (BOTELHO et al., 2010).

O arroz é considerado um dos alimentos mais importantes para nutrição humana, devido ao seu alto valor nutritivo e presença de compostos bioativos (ITO; LACERDA, 2019). A etapa de hidratação é importante para o beneficiamento do arroz, tanto para parboilização quanto para germinação. Ao parboilizar o arroz ocorre aumento de qualidade do grão, implicando na redução de ocorrência de fissuras o que reduz a quebra e, portanto, a perda no processamento, uma textura mais firme, retenção de compostos nutricionais e aumento da vida de prateleira (HU et al., 2017). No arroz germinado, considerado alimento rico em bioativos, o processo de germinação confere ao grão maior qualidade nutricional e biodisponibilidade de nutrientes, onde também há ativação do composto GABA (ácido gama-aminobutírico) (TOYOIZUMI et al., 2021, MONGKONTANAWAT; UEDA; YASUDA, 2021). E segundo OKADA et al (2000) este composto age no combate à depressão, insônia, distúrbios neurológicos e ansiedade.

A modelagem matemática, em processos de hidratação em diferentes temperaturas, permite estimar o coeficiente de difusão de água num grão, com isso determinar a energia de ativação do processo e calcular as propriedades termodinâmicas. O coeficiente de difusão é a grandeza matemática, que representa a quantidade de água que se difundiu por área no grão. A sensibilidade do modelo obtido, através do melhor ajuste dos dados cinéticos, é que vai nortear a escolha do modelo a ser utilizado. E com isso predizer o comportamento da água dentro dos grãos em estudo, descrevendo a cinética da hidratação, a partir de curvas de umidade em função do tempo, permitindo a compreensão do fenômeno físico de transferência de massa (BALBINOTI et al., 2017).

Encontra-se na literatura dois principais tipos de modelos matemáticos, os empíricos e os fenomenológicos. Os modelos empíricos correlacionam dados experimentais, e as constantes encontradas não tem significado físico, já os modelos fenomenológicos baseiam-se em princípios físicos, cujas constantes relacionam-se a grandezas físicas, após proposto o modelo fenomenológico valida-se com dados experimentais (NASCIMENTO et al., 2014).

Com isso, o objetivo principal desta pesquisa é investigar a modelagem matemática, a partir de dados experimentais obtidos nos ensaios de hidratação do arroz. Para que possa explicar matematicamente o fenômeno de transferência de massa e assim predizer a cinética de hidratação desse cultivar de arroz. Informação importante principalmente para otimização do processo industrial, com menor gasto energético e maior produtividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O arroz utilizado foi o SCS122, Safra 2022/23, cultivar de arroz irrigado, classificado como tipo longo-fino. Os grãos foram doados pela Epagri, empresa de pesquisa agropecuária e extensão rural de Santa Catarina, estação experimental de Itajaí, localizada em Itajaí-SC.

2.2 Hidratação

Nos ensaios de hidratação o arroz foi imerso em água destilada, na proporção 1:4, isto é, 200 g de arroz para 800 mL de água. Foi utilizado o equipamento banho maria (Solab, SL-150), cujas condições de ensaio foram a pressão atmosférica, banho sem agitação e seis temperaturas pré-determinadas, 25, 35, 45, 55 e 65 °C, por 16 horas.

Durante a hidratação foram coletadas amostras, em triplicata, inicialmente em intervalos de 30 min, até 3 horas, posteriormente em intervalos de 1 hora, até completar as 16 horas de ensaio. Essas amostras foram analisadas quanto ao ganho de umidade ao longo do tempo do ensaio de hidratação.

A umidade de cada amostra foi determinada, retirando o excesso de água com auxílio de papel filtro. Posteriormente foram pesadas em balança analítica (Eletronic Balance, FA2104N), secas em estufa (Lucadema, 82/480) a 105 °C, por 24 horas, após o tempo de secagem, as amostras foram novamente pesadas, conforme metodologia adaptada da AOAC (2000).

2.2 Modelagem matemática da cinética de hidratação do arroz

TABELA 1 – PARÂMETROS DOS MODELOS CINÉTICOS AJUSTADOS PARA HIDRATAÇÃO DO CULTIVAR DE ARROZ SCS122.

		Modelos	Parâmetros	
Fenomenológico	Difusão	$U_t = U_e + [(U_0 - U_e) \cdot \frac{4}{\lambda^2} \cdot e^{\left(\frac{-D_{ef}\lambda^2 t}{r^2}\right)}]$	U_t (%) U_e (%) D_{ef} (m ² /s)	Umidade no tempo t Umidade no equilíbrio Constante difusão
		(CRANK, 1975)	λ r (m) t (h)	Constante Raio do grão Tempo
Empírico	Peleg	$U_t = U_e + \frac{t}{(k_1 + k_2 \cdot t)}$	U_t (%) U_e (%) k_1 (min.% ⁻¹)	Umidade no tempo t Umidade no equilíbrio Constante difusão
		(PELEG, 1988)	k_2 (% ⁻¹) t (h)	Constante Tempo
	1ª Ordem	$U_t = U_e + (U_0 - U_e) \cdot e^{(-k \cdot t)}$	U_t (%) U_e (%) U_0 (%)	Umidade no tempo t Umidade no equilíbrio Umidade inicial
		(GOWEN et al., 2007; KROKIDA; MARINOS-KOURIS, 2003)	k (h ⁻¹) t (h)	Constante de hidratação Tempo
Page	$U_t = U_e + (U_0 - U_e) \cdot e^{(-k_p \cdot t^n)}$	U_t (%) U_e (%) U_0 (%)	Umidade no tempo t Umidade no equilíbrio Umidade inicial	
	(PAGE, 1949)	k_p (h ⁻¹) n	Constante difusão Constante	

			t (h)	Tempo
--	--	--	-------	-------

Foram ajustados quatro modelos matemáticos, apresentados na Tabela 1, sendo três empíricos (Peleg, Page e 1ª Ordem) e um fenomenológico (Difusão). Os parâmetros dos modelos foram obtidos por regressão não linear, utilizando software Origin 9.0, empregando o algoritmo de Levenberg Marquardt. O melhor ajuste das equações foi avaliado segundo o coeficiente de determinação (R^2) e estatística do teste do qui-quadrado de Pearson, o valor-p ou χ^2 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os parâmetros obtidos pelo ajuste dos modelos matemáticos (Tabela 2), pode-se observar o bom ajuste de todos os modelos. Nestes resultados, a estatística do teste do qui-quadrado de Pearson, o valor-p ou χ^2 , apresentaram valores na ordem de 10^{-5} a 10^{-4} . Portanto, com nível de significância de 5% (menor que 0,05). Conclui-se que a associação entre as variáveis é estatisticamente significativa, isto é, esses modelos expressam bem os dados experimentais.

TABELA 2 – PARÂMETROS DOS MODELOS CINÉTICOS AJUSTADOS A HIDRATAÇÃO DO CULTIVAR DE ARROZ SCS122.

Modelos					
Difusão					
Parâmetros	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C
$D_{ef} (m^2 \cdot s^{-1})$	8,223E-9	1,116E-8	1,106E-8	1,288E-8	1,419E-8
R^2	0,85119	0,90929	0,89655	0,91640	0,90689
χ^2	4,689E-4	3,397E-4	5,405E-4	4,276E-4	4,621E-4
Peleg					
Parâmetros	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C
$k_1 (h \cdot \%^{-1})$	26,63127	12,27416	10,92685	9,15477	7,36544
$k_2 (\%^{-1})$	3,84442	3,99927	3,43364	3,4454	3,57065
R^2	0,99077	0,99116	0,99513	0,98877	0,99201
χ^2	3,069E-5	3,495E-5	2,688E-5	6,065E-5	4,184E-5
Page					
Parâmetros	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C
$k_p (h^{-1})$	0,20204	0,36409	0,34270	0,40368	0,45624
n	0,93464	0,75190	0,78348	0,75462	0,72088
R^2	0,98569	0,99302	0,99445	0,99115	0,99249
χ^2	4,759E-5	2,761E-5	3,059E-5	4,778E-5	3,935E-5
Primeira ordem					
Parâmetros	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C
$k (h^{-1})$	0,17940	0,25069	0,24839	0,28825	0,32892
R^2	0,98413	0,96172	0,97219	0,96358	0,95926
χ^2	5,001E-5	1,434E-4	1,453E-4	1,863E-4	2,022E-4

A aplicabilidade dos modelos, também é expressa através de análise gráfica e avaliação do coeficiente de correlação da reta (R^2), que deve ter valor o mais próximo de 1, indicando que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. Observa-se um bom ajuste nos modelos de Peleg e Page, os quais tiveram coeficiente de correlação (R^2)

acima de 0,98. Indicando que estes modelos são adequados para interpretação do mecanismo da hidratação desse cultivar de arroz. Os modelos de difusão e 1ª ordem tiveram valores entre 0,85 e 0,98, o que descreve com proximidade as condições experimentais, mas não com a precisão dos modelos Peleg e Page.

O comportamento do parâmetro D_{ef} do modelo fenomenológico, de difusão baseado segunda Lei de Fick, foi semelhante aos obtidos pelos modelos empíricos. Com o aumento da temperatura, houve um discreto aumento no coeficiente de difusão. A pesquisa em hidratação de arroz, nas temperaturas de 35 a 75 °C de Botelho et al. (2010) também verificou essa tendência, onde o coeficiente de difusão variou de 0,80 a $9,18 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os parâmetros do modelo de Peleg, k_1 ($\text{min.}\%^{-1}$) e k_2 ($\%^{-1}$), estão relacionados à taxa de transferência de massa e à capacidade máxima de absorção de água. Pode-se observar que k_1 e k_2 diminuem com o aumento da temperatura. Quanto menor o valor de k_1 , maior será a taxa inicial de absorção de água (BOTELHO et. al, 2010).

O parâmetro do modelo de Page, k_p (h^{-1}) relaciona-se com a taxa de absorção de água pelo grão, e apresentou comportamento crescente com o aumento da temperatura, de 0,20204 (25 °C) para 0,45624 (65 °C). O parâmetro n , é um índice adimensional do modelo, que dependente do mecanismo do processo, decresceu com a elevação da temperatura, de 0,93464 (25 °C) para 0,72088 (65 °C). Quanto maior n têm-se um processo mais lento na fase inicial da hidratação (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010). Outro estudo de hidratação de arroz obteve um aumento dos valores de k_p e queda para n , temperatura utilizada de 25 a 70 °C (KASHANINEJAD et al., 2007).

O parâmetro k do modelo de Primeira Ordem, aumentou de acordo com a elevação da temperatura. O estudo de SIMONI (2017) também apresentou mesmo comportamento.

Para todos os modelos ajustados, os parâmetros k_1 , k_p , k e D_{ef} , de Peleg, Page, Primeira Ordem e Difusão, respectivamente, demonstraram comportamento linear entre as temperaturas de 25 e 65 °C.

Os ajustes dos modelos em relação aos dados experimentais podem ser observados na FIGURA 1. De acordo com os gráficos, as cinéticas de hidratação foram melhor representadas, tanto pelo modelo de Peleg quanto para o de Page. A hidratação em temperaturas mais elevadas, possui um ajuste melhor dos modelos, como também o início da hidratação ocorre de forma mais rápida, o que corrobora com os valores dos parâmetros obtidos.

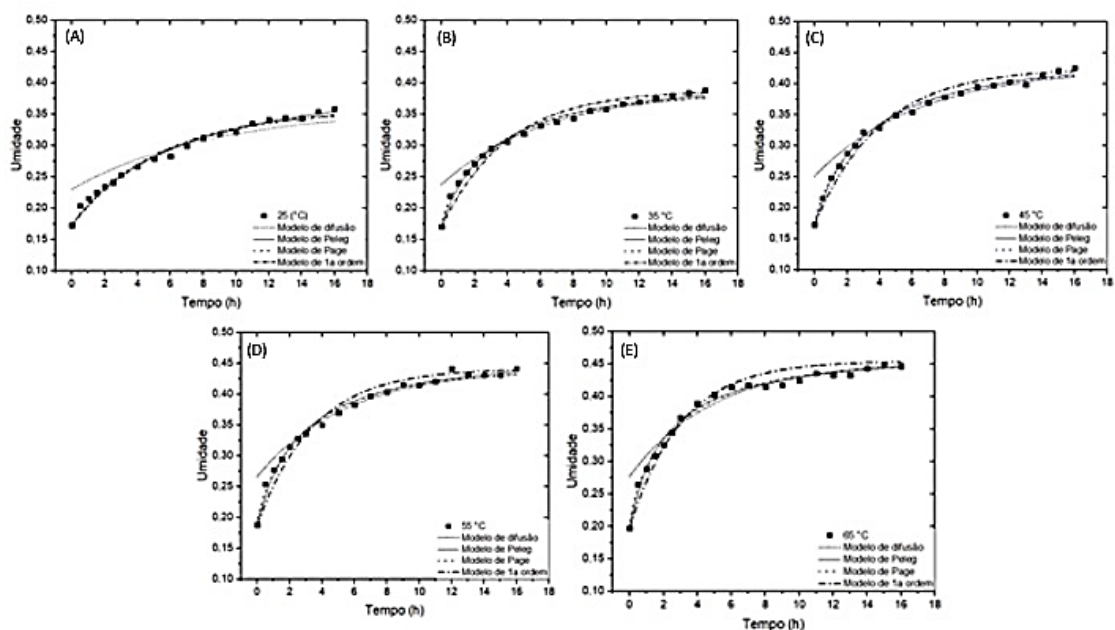


FIGURA 1 – AJUSTE DOS MODELOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS DA HIDRATAÇÃO DE ARROZ, CULTIVAR SCS122, NAS TEMPERATURAS (A) 25 °C, (B) 35 °C, (C) 45 °C E (D) 55 °C E (E) 65 °C.

4. CONCLUSÃO

Dentre os modelos matemáticos utilizados, o modelo de Peleg foi o que melhor representou a cinética de hidratação nas diferentes temperaturas, com um R^2 igual a 0,99. Os modelos de Page e 1ª Ordem também tiveram bom ajuste com R^2 médio igual a 0,99 e 0,97, respectivamente. O modelo de Difusão de Fick não apresentou um bom ajuste aos dados experimentais, quando comparado aos demais modelos.

MATHEMATICAL MODELING OF MASS TRANSFER IN RICE HYDRATION

Rice is the staple diet of Brazilian society and much of the world's population. It is important to understand the stages of its processing, providing safe and optimized processing. The hydration stage is essential for the production of parboiled and sprouted brown rice. The aim of this study was therefore to study the hydration of SCS122 variety paddy rice grains. The test took place in a thermostatic bath, at 5 temperatures (25, 35, 45, 55 and 65 °C) and for 16 hours, with samples being analyzed every 15 minutes of hydration up to 3 hours, and then every 1 hour up to 16 hours. For the kinetic study, four mathematical models were used, one of which was phenomenological: the Diffusion Model based on Fick's second law and three empirical: Peleg, Page and 1st Order, in order to evaluate the parameters of the rice hydration process. The parameters of the different models fitted (Peleg, Page, First Order and Diffusion): k_1 , k_p , k and Def , respectively, showed linear dependence with

increasing temperature, which resulted in an increase in the rate of water absorption at higher temperatures. The Peleg and Page models described the hydration kinetics well, with an R² of 0.99, respectively, while the Diffusion and First Order models closely described the experimental data, with R²s of 0.91 and 0.98, respectively. All the models represented the main trends in the process, with Peleg's model best representing hydration.

REFERÊNCIAS

- AOAC. Official methods of analysis of AOAC international, AOAC International, Maryland, 2000.
- BALBINOTI, T.; JORGE, L.; JORGE, R. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da parboilização do arroz. In XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Maringá, Paraná, 2017.
- BOTELHO, M.; CORRÊA, P.; GONELI, A.; MARTINS, M.; BAPTESTINI, F. Análise da hidratação do arroz na parboilização. **Food Science and Technology**, 30, 713-718, 2010.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion (2th ed.). Oxford: Oxford University Press/Ely House/London Press, 1975.
- GOWEN, A.; GHANNAM, A. N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.) - The effect of blanching pre- treatment on water intake and texture kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 810-819, 2007.
- HU, Z.; TANG, X.; LIU, J.; ZHU, Z.; SHAO, Y. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. **Food Chemistry**, 214, 285-292, 2017.
- ITO, V.; LACERDA, L. Black rice (*Oryza sativa* L.): a review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and application and processing technologies. **Food Chemistry**, 301, 2019.
- KASHANINEJAD, M.; MAGHSOUDLOU, Y.; RAFIEE, S.; KHOMEIRI, M. Study of hydration kinetics and density changes of rice (Tarom Mahali) during hydrothermal processing. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 1383-1390, 2007.
- KROKIDA, M.K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n. 1, p. 1–7, 2003.
- MONGKONTANAWAT, N.; UEDA, Y.; YASUDA, S. Increased total polyphenol content, antioxidant capacity and γ -aminobutyric acid content of roasted germinated native Thai black rice and its microstructure. **Food Science and Technology**, 42, 2021.
- NASCIMENTO, R.; LIMA, A.; VIDAL, C.; MELO, D.; RAULINO, G. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Ed. **UFC**, 258 f., 2014.

- OKADA, T.; SUGISHITA, T.; MURAKAMI, T.; MURAI, H.; SAIKUSA, T.; HORINO, T.; ONODA, A.; KAJIMOTO, O.; TAKAHASHI, R.; TAKAHASHI, T. Effect of the defatted rice germ enrich with GABA for sleepless, depression, autonomic disorder by oral administration. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 47(8), 596-603, 2000.
- PAGE, G.E. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers. Purdue University, 1949.
- PELEG, M. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **J. of Food Sci.**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217 e 1219, 1988.
- PRASAD, K.; VAIRAGAR, P.R.; BERA, M.B. Temperature dependent hydration kinetics of Cicer arietinum splits. **Food Research International**, v. 43, p. 483-488, 2010.
- SIMONI, R.C. Hidratação de grão de bico (cicer arietinum L.): estudo cinético e influência na qualidade tecnológica do grão. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2017.
- SOARES, A.; OLIVEIRA, B.; PINTO, G.; ZANGRANDI, P.; AQUINO, S.; CONCEIÇÃO, T. Treinamento dos colaboradores e gestão à vista para uma beneficiadora de arroz. **South American Development Society Journal**, v. 3, n. 07, p. 17 - 34, abr. 2017.
- TOYOIZUMI, T.; KOSUGI, T.; TOYAMA, Y.; NAKAJIMA, T. Effects of high-temperature cooking on the gamma-aminobutyric acid content and antioxidant capacity of germinated brown rice (*Oryza sativa* L.). **CyTA-Journal of Food**, 19(1), 360-369, 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal do Paraná *campus* Centro Politécnico e Jandaia do Sul pela infraestrutura disponibilizada, à CAPES pela bolsa de doutorado e ao CNPQ (Proc. 312215/20217-7 e 315598/2020-5) pelo apoio financeiro para realização deste projeto e a empresa EPAGRI pela doação do arroz.