

# MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO DA SOJA

SAIZAKI, Paula Mayumi<sup>1</sup>

RU 2322844

PIANEZZER, Guilherme Augusto<sup>2</sup>

## RESUMO

A hidratação de grãos consiste em uma importante etapa no processamento de grãos, demandando, assim, estudos para se entender e descrever o fenômeno através de modelos matemáticos. Este artigo objetivou estudar os modelos mais utilizados para descrever a variação da concentração de água no interior do grão em função do tempo através de uma extensa revisão bibliográfica sobre tema e, posteriormente, verificar uma forma de implementação no software Matlab. Os modelos matemáticos empíricos mais notáveis são de Peleg, Pulosof e Singh e Kulshrestha, cujas equações consistem em funções algébricas simples. Já o modelo fenomenológico descreve a hidratação com uma abordagem mais complexa baseada no balanço de massa no grão através de uma Equação Diferencial Ordinária. A segunda etapa do estudo foi implementar esta EDO no Matlab com dados de hidratação dos grãos de soja obtidos na literatura e então foram aplicados concomitantemente com funções específicas de otimização, como *fminsearch*, que encontra o ponto mínimo de uma função objetiva, e a função *ode45*, que resolve a EDO por Runge-Kutta. Concluiu-se que ambas as modelagens podem ser utilizadas para descrever o fenômeno de hidratação de grãos e, utilizando rotinas no Matlab, é possível implementar esta complexa EDO e gerar um gráfico que descreve com fidelidade o fenômeno da hidratação, possibilitando obter-se excelentes resultados com fins de predição, e, portanto, reduzir o tempo e os custos da hidratação na indústria.

**Palavras-chave:** Modelagem. Otimização. Hidratação. Grãos. Matlab.

## 1. INTRODUÇÃO

A hidratação de grãos consiste em uma etapa há tempos estabelecida no processamento de grãos, usualmente aplicada para soja, arroz, sorgo, feijão,

---

<sup>1</sup> Aluna do Centro Universitário Internacional UNINTER. Artigo apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso. 02-2021

<sup>2</sup> Professor Orientador no Centro Universitário Internacional UNINTER.

enlatados (como milho e ervilha) etc., pois estes possuem uma casca rígida com pouca permeabilidade para a água (FRACASSO et al, 2015). A importância desta etapa se deve ao amolecimento causado pelo contato com a água, que facilita a extração de compostos de interesse comercial. O tempo e o meio de hidratação variam muito com a espécie do vegetal. Assim, muitos estudos focam na migração da água tanto para dentro (hidratação) quanto para fora (secagem) em função da importância deste fenômeno. A hidratação depende principalmente de dois fatores: tempo e temperatura, ambos podendo variar de acordo com o cultivar e a safra (COUTINHO, 2005).

A soja é atualmente um dos grãos mais cultivados do mundo, constituindo cerca de 63,9% de toda a produção de oleaginosas, e o Brasil figura o maior produtor em nível mundial, seguido pelos Estados Unidos. Segundo a CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento – as 125 milhões de toneladas produzidas representaram 48,4% de toda a produção de grãos no país na safra de 2019/2020. Dada a importância do consumo de soja como base para vários alimentos, o conhecimento da dinâmica do processo de hidratação para processamento da soja é essencial para o uso em escala industrial, pois o maior entendimento da cinética da concentração de água no interior do grão pode otimizar o tempo e os custos do processo bem como aumentar o seu valor nutricional.

Uma forma de se estudar este fenômeno é através da modelagem matemática, sendo que sua aplicação é potencializada com utilização da computação e softwares, como Scilab e Matlab, que viabilizam o estudo de equações complexas para descrever fenômenos naturais através da modelagem, otimização e simulação (SAIZAKI et al., 2016).

Este artigo tem o objetivo de investigar na literatura os principais modelos utilizados para descrever a hidratação de grãos através de equações empíricas e fenomenológicas que mostram a concentração de água no grão em função do tempo bem como mostrar a implementação da equação diferencial ordinária no software Matlab em dados da hidratação do grão de soja provenientes da literatura.

## **2. METODOLOGIA**

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre as principais publicações sobre a hidratação de grãos, considerando-se, à princípio, os modelos

que possuem maiores citações, e, conseqüentemente, maior impacto e influência nesta área de pesquisa. O foco, nesta etapa, foi a busca na plataforma *Google Scholar* (Google Acadêmico) pelos artigos científicos de revistas de alto fator de impacto bem como em dissertações de mestrado, teses de doutorado e diversos livros; foram buscados o termo “grãos” juntamente com “hidratação”, “difusão”, “secagem”, “banho hidrotérmico” e “modelagem”, “otimização” e “simulação”. Procurou-se compreender como os pesquisadores abordaram o tema pesquisado e quais informações são relevantes, quais as variáveis que mais influenciam no processo e como elas interagem entre si. Após uma leitura aprofundada nestes materiais, foram determinados os modelos matemáticos empíricos precursores para descrever a hidratação de grãos bem como um modelo fenomenológico.

Na segunda etapa foi estudada a forma de implementação de um modelo fenomenológico em software matemático, mais especificamente no MATLAB (*Matrix Laboratory*), versão 2015a para Windows. Para tanto, foram estudadas diferentes funções focando na resolução de equações diferenciais ordinárias e na otimização de processos através de técnicas de minimização de resíduos.

Para modelar e simular o modelo, foram utilizados os dados da concentração de água no grão de soja em função do tempo de Nicolin et al, 2013, conforme a Tabela 1, e o raio do grão foi considerado 0,35 cm. Neste experimento, os autores adicionaram os grãos de soja secos na água, coletaram amostras em intervalos de tempo pré-determinados e então calcularam a concentração de água no grão ( $\rho$ ), dada em grama de água por volume ( $\text{cm}^3$ ) de soja.

**Tabela 1:** Dados de concentração de água no grão de soja ( $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )) com seus respectivos tempos de amostragem.

$t$ (min)	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
-----------	-----------------------------------

0	0.1031
1	0.8520
5	0.3059
10	0.3805
15	0.3903
20	0.4053
30	0.4462
0	0.4567
50	0.4625
60	0.4818
75	0.4888
90	0,5177
105	0.5469
125	0.5870
150	0.5834
180	0.6010

---

Fonte: Nicolin et al., 2013.

Os dados experimentais foram, então, inseridos no *script* do Matlab a fim de se estimar os parâmetros de transferência de massa envolvidos no modelo matemático da hidratação da soja.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A modelagem matemática estuda a relação entre a umidade, a temperatura e o tempo de hidratação, de modo que seja possível prever as condições do fenômeno com precisão e pode ser representada de duas formas: através de modelos empíricos ou de modelos fenomenológicos. O primeiro é baseado em correlações com dados experimentais, mostrando apenas as tendências do processo, e, por isso, somente pode ser utilizada dentro do intervalo em que foi validado. Outra característica é que os parâmetros encontrados não possuem necessariamente significado físico. Já os modelos fenomenológicos consideram princípios teóricos, como os fundamentos do transporte de massa por difusão e/ou convecção e relações físico-químicas. São

relações mais complexas que àquelas encontradas nos modelos empíricos, porém representam os fenômenos com maior acurácia e podem ser utilizados para fins de previsão de parâmetros fora das condições nas quais foram validados (COUTINHO et al., 2005; JORGE et al., 2017). A hidratação de grãos vem sendo descrita matematicamente por vários autores. Entre eles Martinez-Navarrete e Chiralt (1999) na hidratação de avelã, Engels et al. (1986) na hidratação de arroz branco e Sayar et al. (2001) na hidratação de grãos-de-bico.

### 3.1 Modelos Empíricos

Em geral, os modelos empíricos são mais simples e requerem menos esforços que os modelos fenomenológicos; contudo, possuem capacidade de predição limitada já que não é possível extrapolar para faixas fora daquelas que foram estudadas. As relações mais comuns utilizadas na hidratação de grãos são os modelos de Peleg, de Pilosof, Boquet e Batholomai e Singh e Kulshrestha.

#### 3.1.1 Modelo de Peleg

Um dos modelos empíricos mais amplamente utilizados é o modelo de Peleg (1988), no qual o autor propôs a relação entre a umidade e o tempo de sorção (Equação 1) constituída por dois parâmetros a serem ajustados a partir de dados experimentais:

$$X(t) = X_0 + \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (1)$$

Em que:

$X(t)$  – Umidade em base seca;

$X_0$  – Umidade inicial  $t$ , em  $t = 0$ ;

$t$  – Tempo de hidratação;

$K_1$  e  $K_2$  – Constantes do modelo de Peleg.

O coeficiente  $K_1$  é inversamente relacionado à taxa inicial de absorção de água enquanto  $K_2$  é inversamente relacionado à umidade de equilíbrio (GOWEN et al., 2007). A interpretação desta equação é facilmente observada graficamente, pois quando o tempo é suficientemente grande ( $t \rightarrow \infty$ ), a umidade tende assintoticamente a um platô, dado pela umidade de equilíbrio ( $X(t) \rightarrow X_{eq}$ ). Assim, tal equação pode ser usada tanto para a secagem como para a hidratação, bastando mudar o sinal. A soma da água à  $X_0$  indica a absorção de fluido enquanto a subtração representa a perda de fluido (CHECMAREV et al., 2013).

### 3.1.2 Modelo de Pilosof, Boquet e Batholomai

Pilosof et al. (1985) propuseram em seu estudo um novo modelo matemático sobre a cinética de absorção de água em alimentos em pó. Assim como Peleg, consiste em um modelo não exponencial baseado na umidade de equilíbrio, conforme a Equação 2, e segue as mesmas condições iniciais ( $X(t = 0) = X_0$ ) e finais ( $X(t) \rightarrow X_{eq}$  quando  $t \rightarrow \infty$ ).

$$X(t) = X_0 + \frac{K_3 t}{K_4 + t} \quad (2)$$

Em que:

$X(t)$  – Umidade em base seca;

$X_0$  – Umidade inicial t, em t=0;

$t$  – Tempo de hidratação;

$K_3$  e  $K_4$  – Constantes do modelo de Pilosof, Boquet e Batholomai.

O coeficiente  $K_3$  diz respeito à capacidade máxima de água absorvida pelo sistema, ou seja, à umidade de equilíbrio. Por outro lado,  $K_4$  é definido como o tempo necessário para que seja atingida metade da umidade de equilíbrio.

### 3.1.3 Modelo de Singh e Kulshrestha

A terceira forma empírica descrita é o modelo de Singh e Kulshrestha (1987), cuja proposta foi desenvolver uma forma simples de se analisar a cinética da sorção de água em soja e feijão guandu, desconsiderando o fenômeno de difusão. Tal modelo possui apenas um parâmetro  $K_5$  que representa a constante da taxa de sorção durante o processo, de acordo com a Equação 3.

$$\frac{X(t)-X_0}{X_{eq}-X_0} = \frac{K_5 t}{K_5 + 1} \quad (3)$$

Sendo:

$X(t)$  – Umidade em base seca;

$X_0$  – Umidade inicial t, em t=0;

$X_{eq}$  – Umidade de equilíbrio;

$t$  – Tempo de hidratação;

$K_5$  – Constante do modelo de Singh e Kulshresta.

### 3.2 Modelagem Fenomenológica

A principal característica da modelagem fenomenológica é o embasamento em conhecimentos teóricos que regem o fenômeno de transporte presente na hidratação. Portanto, diferentemente dos modelos empíricos, todos os parâmetros possuem significado físico. Assim, a primeira etapa é a realização do balanço de massa no sistema, que neste caso é o grão estudado, conforme observado na Equação 4 (NICOLIN et al., 2013; JORGE et al., 2017).

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{entrada de} \\ \text{água no grão} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{saída de} \\ \text{água no grão} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Taxa de geração} \\ \text{ou consumo} \\ \text{de água} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de água} \end{array} \right] \quad (4)$$

Como na hidratação não há consumo nem geração de água e taxa de saída de água é considerada nula, o balanço de massa pode ser reescrito da seguinte forma (Equação 5).

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{entrada de} \\ \text{água no grão} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de água} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A Equação 6 demonstra o balanço de massa em termos matemáticos:

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = N_{H_2O}A \quad (6)$$

Em que:

$m_{H_2O}$  – Massa da água que entra no grão;

$t$  – Tempo de hidratação;

$N_{H_2O}$  – Fluxo de água causado pelo ambiente ao redor do grão;

$A$  é a área externa do grão.

Fazendo as considerações dadas pelas Equações 7 e 8:

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O}V \quad (7)$$

$$N_{H_2O} = Ks(\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \quad (8)$$

Reescrevendo a equação do balanço, tem-se:

$$\frac{d(\rho_{H_2O}V)}{dt} = A Ks(\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \quad (9)$$

Sendo que

$Ks$  – Coeficiente da transferência de massa;

$V$  – Volume do grão;

$\rho_{eq} - \rho_{H_2O}$  é a diferença entre a concentração de água no grão no equilíbrio e a concentração de água no grão.

Considerando o volume constante ao longo do tempo a fim de simplificar fenômeno, este parâmetro foi retirado do operador diferencial. Outra importante consideração foi que o grão de soja possui formato esférico. Substituindo a área e volume de uma esfera (para fins de simplificação, como, por exemplo um grão de soja ou de ervilha), obteve-se a Equação 10, que representa a equação diferencial ordinária da absorção de água em uma esfera em função do tempo.

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{H_2O}}{dt} &= Ks(\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \left( \frac{A}{V} \right) \\ &= Ks(\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \left( \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} \right) \end{aligned}$$



$$= K_S(\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \left(\frac{3}{R}\right) \quad (10)$$

Como uma EDO com variação temporal necessita da análise em  $t = 0$ , determinou-se a condição inicial como a concentração inicial de água no grão, isto é, antes do início da hidratação (Equação 11).

$$\rho_{H_2O}(t = 0) = \rho_0 \quad (11)$$

A determinação do coeficiente de transferência de massa deve ser realizada de forma experimental e pode variar com o cultivar e a safra do grão. Para determinar o valor do parâmetro  $K_S$  considerou-se uma dependência exponencial da concentração de água no grão (Equação 12).

$$K_S = B_1 e^{B_2 \rho_{H_2O}} \quad (12)$$

Em que:

$B_1$  e  $B_2$  – Coeficientes da relação exponencial para a determinação de  $K_S$ ;

Assim, a Equação 13 demonstra a equação diferencial ordinária que representa a variação da concentração de água no grão em função do tempo.

$$\frac{d\rho_{H_2O}}{dt} = B_1 e^{B_2 \rho_{H_2O}} (\rho_{eq} - \rho_{H_2O}) \left(\frac{3}{R}\right) \quad (13)$$

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE MATEMÁTICO MATLAB

O Matlab consiste em uma poderosa ferramenta amplamente utilizada por Engenheiros e Pesquisadores com o objetivo de facilitar cálculos numéricos e a manipulação de gráficos, de maneira interativa e contendo uma interface amigável, de forma que se torne mais acessível do que linguagens de programação tradicionais, como, por exemplo, C ou Fortran. Por outro lado, dependendo da rotina executada, este software possui maior demanda computacional e de tempo, podendo comprometer o seu desempenho.

O programa também possui uma grande quantidade de bibliotecas auxiliares: as “*toolboxes*”, as quais já possuem funções prontas para fins específicos, o que poupa o usuário de desenvolvê-las e facilita compartilhamento de arquivos para Matlab: os arquivos m-files.

A interface do Matlab varia de acordo com a versão. Para a elaboração deste trabalho foi utilizada a 2015a, cuja tela principal está dividida em quatro telas: A janela mostrando pasta sendo acessada no momento contendo os arquivos .m, a janela de comando, o Workplace – contendo as variáveis armazenadas na memória – e o histórico de comandos.

Para a implementação, foi necessária a obtenção de dados experimentais de concentração de água no grão em função do tempo (Tabela 1). Assim, a EDO mostrada na Equação 13 foi resolvida através de métodos numéricos no software. Foi utilizada a função “*ode45*” que resolve EDOs pelo método de Runge-kutta, que por sua vez utiliza o cálculo de quatro valores intermediários antes que possa estimar o valor posterior da solução. Para que ele possa ser aplicado, Jorge et al (2017) sugerem utilizá-lo concomitantemente com técnicas de otimização, como a função *fminsearch* – *find minimum of unconstrained multivariable function using derivative-free*. Esta função é baseada no método simplex Nelder-Mead (LAGARIAS et al., 1999), e visa minimizar a função objetivo, responsável por calcular os resíduos dados pelo quadrado da diferença entre o valor ajustado e o valor experimental, como àquela descrita na Equação 14. Esta é uma importante técnica de otimização, a qual busca encontrar os pontos de mínimo ou máximo de uma função.

$$FO = \sum_{i=1}^n (X_{calc}^i - X_{exp}^i)^2 \quad (14)$$

Sendo:

$FO$  – Função objetivo;

$X_{calc}^i$  – Valor calculado pelo modelo;

$X_{exp}^i$  – Valor do dado experimental.

O trabalho de Saizaki et al (2016) estudou esta implementação da modelagem da hidratação do trigo no software Matlab e encontrou ótimos resultados, mostrando como os modelos matemáticos podem descrever a hidratação de grãos com bastante acurácia e proximidade da realidade do processo. A Figura 1 demonstra o print da tela com os três scripts utilizados na implementação em Matlab. Foram necessários três arquivos distintos para concretizar a modelagem. O primeiro arquivo foi o executável com a função de otimização *fminsearch*; o segundo arquivo é uma função que contém os dados experimentais, a função objetivo, a função *ode45* para resolver a EDO e o

comando *plot* para gerar o gráfico; o terceiro arquivo contém apenas a EDO da Equação 13.

```

1 %Comando de minimização da FO para ajuste dos parametros
2 %chute inicial
3 B0=[1 1]
4 %Comando de minimização da Função Objetivo
5 [B,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT]=fminsearch('somaexp',B0)

```

```

1 function [ FO ] = somaexp( B )
2 %Função Objetivo a ser minimizada
3
4 rho0=0.1031; % concentração inicial de agua
5 %Valores de tempo experimentais (h)
6 t=(1/60)*[0;1;5;10;15;20;30;40;50;60;75;90;105;125;150;180];
7 %Valores de umidade experimentais (g/cm³)
8 rhoexp=[0.1031;0.1852;0.3059;0.3805;0.3903;0.4053;0.4462;0.4567;...
9         0.4625;0.4818;0.4888;0.5177;0.5469;0.5487;0.5834;0.6010];
10 %Solução numerica da EDO do modelo
11 [t,rhocalc]=ode45('modeloexp',t,rho0,[],B);
12 %Construção do gráfico de concentração de água em função do tempo
13 plot(t,rhocalc,t,rhoexp,'*')
14 xlabel('t (h)')
15 ylabel('pH2O(g/cm³)')
16
17 %Definição da Função Objetivo
18 FO = sum((rhocalc - rhoexp).^2);
19 end

```

```

1 function [ dirhodt ] = modeloexp(t,rho,flag,B)
2 %Ks EXPONENCIAL em relação a concentraçao de agua no grao
3 % dados obtidos a 30oC
4 R=0.35; rhoeq= 0.6010; %raio e conc equilibruil
5 dirhodt= ((3*B(1)*exp(B(2)*rho))/R) .* (rhoeq-rho);
6 end
7
8

```

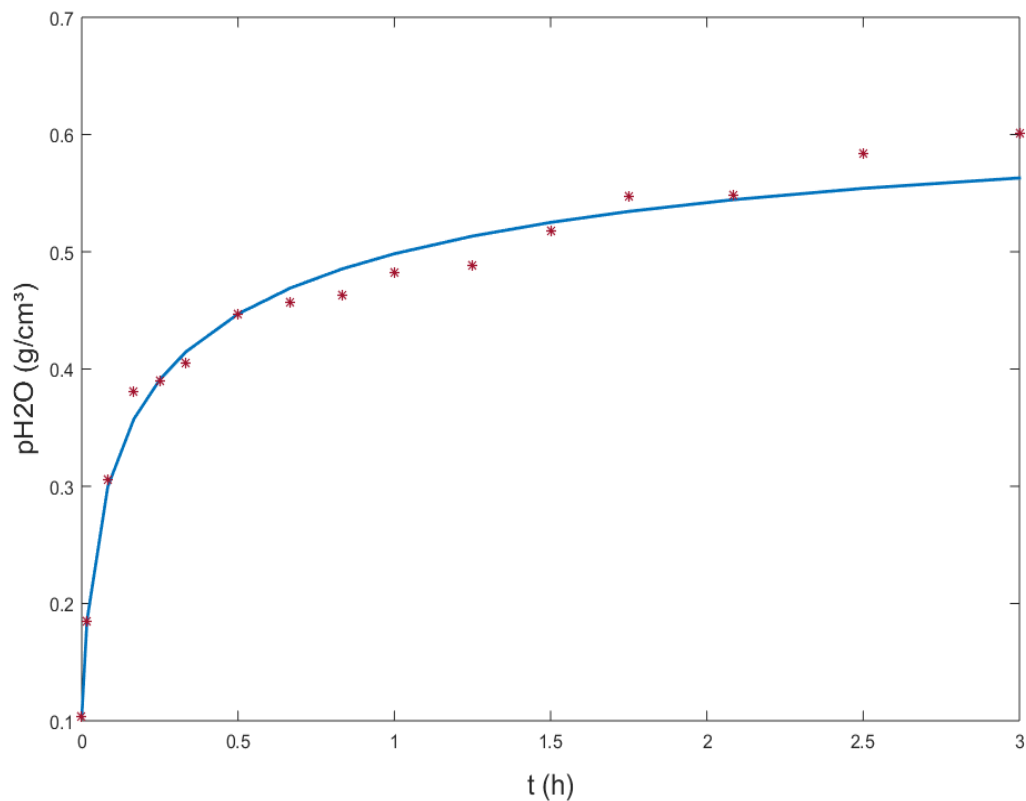
**Figura 1:** Tela com o algoritmo utilizado no Matlab em três arquivos distintos para modelar a hidratação do grão de soja em função do tempo.

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os parâmetros ajustados foram  $B_1$  e  $B_2$  do modelo fenomenológico; ambos são parâmetros do coeficiente de transferência de massa, e desta forma, foi possível

determinar o comportamento do  $K_s$ . Os valores ajustados foram  $B_1 = 4,0759$  e  $B_2 = -7,9186$  no final de 69 iterações realizadas pelo programa. A função objetivo (Equação 14) obteve a soma quadrática de resíduos de 0,0048.

A Figura 2 mostra o gráfico gerado pelo *script* da Figura 1, no qual os pontos em vermelho mostram os dados experimentais da concentração de água no grão de soja em função do tempo (horas) mostrados na Tabela 1 e a linha em azul representa a curva da modelagem neste mesmo período. Observa-se que no início da hidratação a concentração de água é pequena no grão; este ponto foi considerado como condição inicial para a resolução da EDO (em  $t = 0$ ,  $\rho_0 = 0,1031$ ). Com o passar do tempo, o grão absorve as moléculas de água, e, portanto, ocorre o aumento monotonicamente da concentração de água no grão.



**Figura 2:** Gráfico da modelagem da concentração de água no grão de soja em função do tempo frente aos dados experimentais. Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nos primeiros minutos, o grão absorve água mais rapidamente, observou-se que na primeira hora a maior parte do fluido já foi absorvida. Com o passar do tempo, a velocidade do fenômeno de difusão reduz, fazendo com que a concentração tenda assintoticamente a um platô de equilíbrio, pois  $\rho \rightarrow \rho_{eq}$  quando  $t \rightarrow \infty$ . Quando o

equilíbrio é atingido, o grão atinge o ponto de saturação e perde sua capacidade de absorção.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da hidratação de grãos é importante para se otimizar o seu tempo, principalmente nas etapas de processamento industrial. Através da revisão bibliográfica, este estudo mostrou que existem diversas formas de se descrever a concentração de água no grão em função do tempo, podendo ser através de modelos empíricos - como de Peleg, Pilosof-Boquet-Batholomai e Singh e Kulshrestha, que consistem em modelos mais simples pois englobam equações algébricas - ou de modelos fenomenológicos, os quais são baseados nos princípios físicos de transferência de massa no grão. Ambas as formas são válidas para descrever o fenômeno, porém a segunda é mais complexa e possui maior dificuldade de implementação devido à presença da equação diferencial, a qual requer a utilização de diversas ferramentas para a sua resolução. Por outro lado, este modelo possui capacidade de predição e pode ser simulado em condições adversas àquelas testadas experimentalmente, além de representar com grande acurácia o fenômeno.

A implementação da equação diferencial ordinária proveniente da modelagem fenomenológica no software Matlab se mostrou trabalhosa; no entanto, mostrou excelentes resultados e concluiu-se que este modelo descreve satisfatoriamente o fenômeno, uma vez que o gráfico gerado pelo modelo representa com fidelidade as tendências da absorção de água. As funções *ode45* e *fminsearch*, para resolução de EDOs e para minimizar a função objetivo, respectivamente, foram úteis e ajustaram os parâmetros do coeficiente de transferência de massa com êxito. Assim, a equação proposta pode ser aplicada para fins de predição da concentração de água no grão de soja em função do tempo, mostrando potencial de implementação em processos industriais que requerem hidratação de grãos como etapa de processamento a fim de se obter resultados mais eficientes do ponto de vista econômico.

## REFERÊNCIAS

CHECMAREV, G., CASALES, M.R., YEANNES, M.I. **Analysis o aplicability of Peleg model to the cooking-infusion of mackerel.** Food Science and Technology, v. 33, n. 4, p. 685-689, 2013.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos.** V.7– Safra 2019/2020, N. 12 Décimo segundo levantamento, 2020. Acessado em 20 de fevereiro de 2021.

COUTINHO, M. R. OMOTO, E. S. ANDRADE , C. M. G. JORGE, L. M. M. **Modelagem e Validação da Hidratação de Grãos de Soja.** Ciência Tecnologia de Alimentos. Vol. 25, n. 3, pág. 603 – 610, 2005.

ENGELS, C. HENDRICKX, M. DE SAMBLANX, S. DE GRYZE, I. TOBBACK, P. **Modeling Water Diffusion During Long-grain Rice Soaking.** Journal of food Engineering. Vol. 5, n. 1, pág. 55 – 73, 1986.

FRACASSO, A.F., FRIZON, C.N.T., JORGE, L.M.M., JORGE, R.M.M. **Hydration kinetics of transgenic soybeans.** Acta Scientiarum Technology, v. 37, n. 1, p. 141-147, 2015.

JORGE, L.M.M., NICOLIN, D.J., JORGE, R.M.M. **Simulação de modelos empíricos e teóricos para hidratação de grãos em MATLAB.** Maringá: Ed. da Universidade Estadual de Maringá, 2017.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J. e OLIVEIRA, J. **Influence of preblanching on the water absorption Kinetics of soybeans.** Journal of Food Engineering, v. 78, p. 965–971, 2007.

LAGARIAS, J. C., J. A. REEDS, M. H. WRIGHT, WRIGHT P. E. **Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions.** SIAM Journal of Optimization. Vol. 9, Number 1, p. 112–147, 1998.

MARTINEZ-NAVERRETE, N. CHIRALT, A. **Water Diffusivity and Mechanical Changes During Hazelnut Hydration.** Food Research International. Vol. 32, n. 6, pág. 447 – 452, 1999.

NICOLIN, D.J., COUTINHO, M. R., JORGE, L.M.M. **Simulação de ajuste de modelos matemáticos de hidratação de grãos, segundo a abordagem de parâmetros concentrados.** Fundamentum n. 86, Ed. da Universidade Estadual de Maringá, 2013.

PELEG, M. **An empirical model for the description of moisture sorption curves.** Journal of Food Science, v. 53, n. 4, p. 1216–1217, 1988.

PILOSOF, A. M. R.; BOQUET, R.; BATHOLOMAI, G. B. **Kinetics of water uptake by food powders,** Journal of Food Science, v. 50, p. 278–282, 1985.

SAIZAKI, P. M., JORGE, L.M.M., NICOLIN, D.J., JUSTI, A.L. **Modelagem e simulação da hidratação do trigo.** In III Encontro de Pesquisa da FATEB, Telêmaco Borba, 2016.

SAYAR, S. TURHAN, M. GUNASEKARAN, S. **Analysis of Chickpea Soaking by Simultaneous Water Transfer and Water – Starch Reaction.** Journal of food Engineering. Vol. 50, n. 2, pág. 91 – 98, 2001.

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P. **Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains.** Journal of Food Science, v. 52, n. 6, p. 1538 -1541, 1987.