



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José do Rio Preto

Kamilla Soares Silva

**Efeito Das Variáveis De Processo Na Maceração, Secagem E
Higroscopicidade De Malte De Trigo (*Triticum* spp.)**

São José do Rio Preto
2022

Kamilla Soares Silva

**Efeito Das Variáveis De Processo Na Maceração, Secagem E
Higroscopicidade De Malte De Trigo (*Triticum* spp.)**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” do Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

Coorientador: Dr. Tiago Carregari Polachini

São José do Rio Preto
2022

S586e Silva, Kamilla Soares
Efeito das variáveis de processo na maceração, secagem e higroscopicidade de malte de trigo (*Triticum spp.*) / Kamilla Soares Silva. -- São José do Rio Preto, 2022
127 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto
Orientador: Javier Telis-Romero
Coorientador: Osvaldo Resende

1. Teor de água de Equilíbrio. 2. Maltagem de Cereal. 3. Armazenamento. 4. Secagem. 5. Propriedades Termodinâmicas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Kamilla Soares Silva

**Efeito Das Variáveis De Processo Na Maceração, Secagem E
Higroscopicidade De Malte De Trigo (*Triticum* spp.)**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” do Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Javier Telis Romero

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos / UNESP /
Câmpus de São José do Rio Preto
Orientador

Prof. Dr. JOSÉ DE JESÚS ZAZUETA MORALES

Facultad de Ciencias Químico Biológicas / Universidad Autónoma de
Sinaloa

Prof. Dr. RÓGER DARROS BARBOSA

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos / UNESP /
Câmpus de São José do Rio Preto

Prof. Dr. PAULO JOSÉ DO AMARAL SOBRAL

Departamento de Engenharia de Alimentos / Universidade de São Paulo

Prof. Dr. JOÃO BORGES LAURINDO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Química e de Alimentos / Universidade
Federal de Santa Catarina

São José do Rio Preto
28 de março de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que apesar das dificuldades, sempre me incentivaram a buscar conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que tem me dado força e coragem necessárias para enfrentar cada uma das etapas e obstáculos vividos até aqui.

Aos meus pais, João e Lucivânia, por serem a minha base, e apesar de todas as dificuldades sempre me apoiaram e incentivaram ao longo dessa caminhada acadêmica.

Ao meu irmão, João Paulo, pelo carinho e por ter me recebido em sua casa durante o doutorado.

Ao meu orientador, Javier Telis Romero e meus coorientadores, Osvaldo Resende e Tiago Polachini, por todos os ensinamentos, pela orientação, pela dedicação e paciência durante todos esses anos.

À professora Dra. Priscila Alonso dos Santos por ter cedido seu laboratório para execução de parte da pesquisa deste trabalho e por todos os conselhos e ensinamentos.

À professora Dra. Letícia Fleury Viana pelas alunas de PIBIC para auxiliar na execução da pesquisa.

À todos do laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do IFGoiano, em especial ao Weder, Juliana, Manoel, Kênia, Simone e Adrielly, que me ajudaram para a realização desse trabalho e sem as quais não teria sido fácil consegui-lo.

Aos meus amigos Caroline Melo e André Machado por todos esses anos de amizade, companheirismo e momentos de descontração.

Aos meus amigos de pós-graduação, em especial o Rodrigo Evangelista, pela amizade sincera e por todo suporte durante o doutorado.

Ao Gisandro que sempre se disponibilizou para tirar minhas dúvidas.

À Milene por ter disponibilizado parte da matéria-prima da pesquisa e por ter se tornado uma grande amiga, que me ajudou muito nesse período.

À Malteria Blumenau por ter disponibilizado parte da matéria-prima para que essa pesquisa acontecesse.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro durante o doutorado.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação profissional e pessoal, deixo aqui meu muitíssimo obrigado.

RESUMO

O processo de maltagem baseia-se em inúmeras operações unitárias, tais como maceração, germinação e secagem. Neste processo, grãos ricos em carboidratos (amido) são estimulados a germinar, apresentando modificações relevantes em sua composição e estrutura. Atualmente, o malte de trigo vem sendo cada vez mais utilizado na indústria cervejeira em substituição ou combinação com o malte de cevada. Seu crescente uso em aplicações alimentares impulsionou o presente estudo a avaliar condições adequadas e os mecanismos que ocorrem durante seu processamento (hidratação e secagem) e armazenamento (sorção de vapor de água). As propriedades físicas e composição química dos grãos foram inicialmente determinadas. O processo de maceração dos grãos de trigo foi satisfatoriamente representado pelo modelo de Weibull ($R_{Adj}^2 = 0,9845$; $RQME = 0,0319$ e $P(\%) = 4,23$) na condição de processo a 20°C. A cinética de hidratação dos grãos de trigo se apresentou em duas fases, supostamente conduzidas pelos mecanismos de capilaridade e difusão. O tempo médio para o maior percentual de germinação do grão de trigo foi de aproximadamente 5 dias. Ao analisar as propriedades de sorção do malte verde de trigo nas temperaturas de secagem de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, o teor de água de equilíbrio tendeu a aumentar com o incremento da atividade de água e a diminuição da temperatura. O modelo de GAB resultou melhor ajuste aos dados experimentais para as isotermas de sorção do malte verde de trigo ($R_{Adj}^2 > 0,9977$ e $P\% < 1,9413$), além de proporcionar valores para teor de água da monocamada. As propriedades termodinâmicas de sorção do malte verde de trigo foram influenciadas pelo teor de água dos grãos, ocorrendo aumento da energia necessária para a retirada de água do produto com a redução do teor de água. Os resultados de entalpia e entropia diferencial, em módulo, apresentaram maiores valores para menores teores de água de equilíbrio com relação linear entre eles. A análise da temperatura isocinética ($458,32 \pm 3,23$ K) validou a teoria da compensação entalpia-entropia. Quanto a cinética de secagem, o modelo de Midilli proporcionou alta precisão de ajuste aos dados experimentais ($R_{Adj}^2 \geq 0,9845$; $RQME \leq 0,0106$ e $P(\%) \leq 16,55$) na faixa de temperatura avaliada (40 a 80 °C). O coeficiente de difusão aumentou de $6,110 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $36,164 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ com a elevação da temperatura do ar de secagem de 40 a 80 °C. A

relação entre o coeficiente de difusão e a temperatura pôde ser descrita pela equação de Arrhenius, com energia de ativação estimada em $39,65 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. As isotermas de sorção do malte de trigo acabado foram determinadas em uma ampla faixa de temperaturas ($10\text{--}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidade relativas ($5,80\text{--}98,18\%$) utilizadas durante seu armazenamento. O teor de água de equilíbrio aumentou com o aumento da atividade água e diminuição da temperatura. Dentre os modelos avaliados, os modelos Henderson e GAB apresentaram melhor ajuste para isotermas de malte de trigo. O calor isostérico de sorção aumentou na medida em que o teor de água diminuiu. Valores de entalpia diferencial ($1071,82$ a $36,95 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) e entropia ($2,29$ a $0,12 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) mostraram-se linearmente dependentes, atendendo aos requisitos para confirmar a teoria da compensação. A adsorção de água do malte de trigo foi considerada como um processo regido pela entalpia ($\Delta H < 0$) e espontâneo ($324,13 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} < \Delta G < 0,13 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Os resultados obtidos são úteis para o controle das condições de processamento e armazenamento do malte de trigo, visando o aumento da eficiência do processo e no projeto dos equipamentos envolvidos.

Palavras-chaves: Teor de água de Equilíbrio. Maltagem de Cereal. Armazenamento. Secagem. Propriedades Termodinâmicas.

ABSTRACT

The malting process is based on numerous unit operations, such as maceration, germination and drying. In this process, grains rich in carbohydrates (starch) are stimulated to germinate, presenting relevant changes in their composition and structure. Currently, wheat malt has been increasingly used in the brewing industry to replace or combine with barley malt. Its growing use in food applications led the present study to evaluate adequate conditions and the mechanisms that occur during its processing (hydration and drying) and storage (water sorption). The physical properties and chemical composition of the grains were initially determined. The maceration process of wheat grains was satisfactorily represented by the Weibull model ($R_{Adj}^2 = 0.9845$; $RQME = 0.0319$ and $P(\%) = 4.23$) in the process condition at 20°C. The hydration kinetics of wheat grains was presented in two phases, supposedly driven by capillarity and diffusion mechanisms. The average time for the highest germination percentage of the wheat grain was approximately 5 days. When analyzing the sorption properties of wheat green malt at drying temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80 °C, the equilibrium water content tended to increase with increasing water activity and decreasing temperature. The GAB model resulted in a better fit to the experimental data for the sorption isotherms of wheat green malt ($R_{Adj}^2 > 0.9977$ and $P\% < 1.9413$), in addition to providing values for the water content of the monolayer. The thermodynamic properties of sorption of wheat green malt were influenced by the water content of the grains, with an increase in the energy required to remove water from the product with the reduction of the moisture content. The results of differential enthalpy and entropy in modulus showed higher values for lower equilibrium water contents with a linear relationship between them. The isokinetic temperature analysis (458.32 ± 3.23 K) validated the enthalpy-entropy compensation theory. As for drying kinetics, the Midilli model provided high adjustment accuracy to the experimental data ($R_{Adj}^2 \geq 0.9845$; $RQME \leq 0.0106$ and $P(\%) \leq 16.55$) in the evaluated temperature range (40 to 80 °C). The diffusion coefficient increased from $6.110 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ to $36.164 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ with increasing drying air temperature from 40 to 80 °C. The relationship between the diffusion coefficient and temperature could be described by the Arrhenius equation, with activation energy estimated at 39.65

$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Sorption isotherms of finished wheat malt were determined over a wide range of temperatures ($10\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$) and relative humidity ($5.80\text{--}98.18\%$) used during its storage. The equilibrium water content raised with increasing water activity and decreasing temperature. Among the evaluated models, the Henderson and GAB models showed the best fit for wheat malt isotherms. The isosteric heat of sorption increased as the water content decreased. Differential enthalpy (1071.82 to $36.95\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) and entropy (2.29 to $0.12\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) values were linearly dependent, meeting the requirements to confirm the compensation theory. The adsorption of water from wheat malt was considered as a spontaneous process ($324.13\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} < \Delta G < 0.13\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) and driven by enthalpy ($\Delta H < 0$). The results obtained are useful to control the processing and storage conditions of wheat malt, aiming to increase the efficiency of the process and improving the equipment involved.

Keywords: Equilibrium Water Content. Cereal Malting. Storage. Drying. Thermodynamic Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de um grão de trigo.....	25
Figura 2 – Diagrama do processo de malteação.....	31
Figura 3 – Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.	40
Figura 4 – Isoterma genérica de adsorção/dessorção.....	44
Figura 5 – Cinco tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.....	45
Figura 6 – Cinética de maceração do grão de trigo a 20 ± 2 °C.....	63
Figura 7 – Modelo de Peleg ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.....	66
Figura 8 – Modelo tipo Weibull ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.....	66
Figura 9 – Modelo de Page ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.....	67
Figura 10 – Distribuição residual referente à cinética de hidratação de trigo a 20 ± 2 °C.	67
Figura 11 – Disposição dos grãos de trigo na Gerbox.....	71
Figura 12 – Valores experimentais da umidade de equilíbrio e isotermas dessorção do malte verde de trigo em diferentes temperaturas simulando condições de secagem ajustado ao modelo de GAB.	74
Figura 13 – Calor isostérico líquido de sorção para malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio para faixa de temperatura de 40 a 80 °C.	77
Figura 14 – Mudança na entalpia e na entropia do malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio para a faixa de temperatura de 40 a 80 °C.	79
Figura 15 – Relação entre entalpia versus entropia diferencial para o malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio na faixa de temperatura de 40 a 80 °C.	80
Figura 16 – Curvas de secagem do malte de trigo nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.	82
Figura 17 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem de malte de trigo em diferentes temperaturas.....	86

Figura 18 – Representação de Arrhenius para os coeficientes de difusão médios em função da temperatura do ar de secagem.....	88
Figura 19 – Valores experimentais da umidade de equilíbrio e isotermas de sorção do malte de trigo em diferentes temperaturas ajustado ao modelo de Henderson.....	92
Figura 20 – Curvas de logaritmo neperiano da a_w em função de valores de $1/T$ para malte de trigo nas diferentes temperaturas calculadas pela equação de Henderson.....	96
Figura 21 – Calor isostérico líquido de sorção para malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio para faixa de temperatura de 10 a 40 °C.....	98
Figura 22 – Mudança na entalpia e na entropia do malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio para a faixa de temperatura de 10 a 40 °C.....	99
Figura 23 – Relação entre entalpia diferencial versus entropia diferencial para o malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio na faixa de temperatura de 10 a 40 °C.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atividade de água (a_w) mínima necessária para o crescimento de microrganismos e produção de toxina de importância alimentar.....	40
Tabela 2 – Modelos matemáticos para descrever as isotermas de secagem..	53
Tabela 3 – Modelos utilizados para o ajuste dos dados das isotermas de sorção do malte verde de trigo e do malte de trigo	56
Tabela 4 – Resultados dos ajustes dos modelos aos dados experimentais da cinética de hidratação dos grãos de trigo a 20 ± 2 °C	68
Tabela 5 – Resultados do poder germinativo (%GER) e do Tempo médio de germinação (TMG) do grão de trigo (média $\pm$ desvio padrão).....	71
Tabela 6 – Parâmetros dos modelos ajustados à isoterma de sorção para malte verde de trigo em temperaturas de secagem.....	75
Tabela 7 – Parâmetros do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem do malte verde de trigo nas diferentes temperaturas	84
Tabela 8 – Constantes do modelo de Midilli referente à cinética de secagem de malte de trigo em diferentes temperaturas.....	85
Tabela 9 – Coeficiente de difusão efetivo, durante a secagem de malte verde de trigo nas diferentes temperaturas.....	88
Tabela 10 – Parâmetros dos modelos ajustados à isoterma de sorção para malte de trigo em temperaturas de armazenamento.....	93
Tabela 11 – Critérios de seleção de Akaike (AIC) e Bayesiano de Schwarz (BIC) para os modelos de GAB e Henderson.....	94

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a_w	Atividade de água (adimensional)
a	Parâmetros dos modelos de Henderson-Pabis, Midilli, Logaritmo, Dois Termos, Verma, Aproximação da Difusão e Wang e Sing (adimensionais)
A	Constante dos modelos empíricos de Oswin
AIC	Critério de informação de Akaike
B	Constante dos modelos empíricos de Oswin
b	Parâmetros dos modelos de Midilli, Logaritmo, Dois Termos, Aproximação da Difusão e Wang e Sing (adimensionais)
BIC	Critério de informação Bayesiano
$b.s$	Base seca ($g_{\text{água}} \cdot g_{\text{matéria seca}}^{-1}$)
$b.u$	Base úmida ($g_{\text{água}} \cdot g_{\text{matéria úmida}}^{-1}$)
C	Parâmetro do modelo de GAB (adimensional)
D_{ef}	Coeficiente de difusão efetivo ($m^2 \cdot s^{-1}$)
D_0	Fator pré exponencial ($m^2 \cdot s^{-1}$)
d_1	Constante dos modelos empíricos de Oswin Modificado
d_2	Constante dos modelos empíricos de Oswin Modificado
d_3	Constante dos modelos empíricos de Oswin Modificado
E_a	Energia de ativação ($kJ \cdot mol^{-1}$)
H_1	Constante dos modelos empíricos de Henderson
H_2	Constante dos modelos empíricos de Henderson
h_1	Constante dos modelos empíricos de Henderson modificado
h_2	Constante dos modelos empíricos de Henderson modificado
h_3	Constante dos modelos empíricos de Henderson modificado
i	Número de dados experimentais
k	Constante do modelo de GAB; Constante dos modelos de secagem (h^{-1})
k_0	Constante de secagem (h^{-1})
k_1	Constante do modelo de Peleg ($h \cdot Kg \cdot Kg_{bs}^{-1}$); Constante dos modelos de secagem (h^{-1}) $kg_{\text{água}} \cdot kg_{\text{matéria seca}}^{-1}$
k_2	Constante de capacidade do modelo de Peleg ($Kg \cdot Kg_{bs}$)
$\log like$	Valor do logaritmo da função de verossimilhança
M_{1000}	Massa de mil grãos
m	Número de pares de dados

m_0	Massa da amostra no início da maceração (g)
$m(t)$	Massa da amostra após o tempo t de maceração (g)
n	Número de pontos experimentais de observação; Total de números de temperaturas estudadas; Parâmetros dos modelos de Page e Midilli (adimensionais); número de termos
n_i	Número de sementes germinadas por dia
$P\%$	Erro médio relativo (%)
p	Pressão de vapor de água do alimento (Pa); Número de parâmetros do modelo
p_0	Pressão de vapor da água pura (Pa)
PG	Poder germinativo
Q_{st}	Calor integral de sorção ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
q_{st}	Calor isostérico líquido de sorção da água ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
R	Constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
r_e	Raio de esfera equivalente (m)
R_{Adj}^2	Coefficiente de determinação ajustado
$RQME$	Raiz quadrática do erro médio
T_a	Temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$)
t	Tempo (h)
t_i	tempo decorrido de germinação (dias)
T_B	Temperatura Isocinética (K)
TMG	Tempo médio de germinação
T_{hm}	Temperatura média harmônica (K)
UR	Umidade relativa (%)
URE	Umidade relativa no equilíbrio (%)
V_e	Valores experimentais
V_p	Valores preditos
x	Comprimento (mm)
X_{eq}	Teor de água de equilíbrio ($\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$)
X_m	Teor de água da monocamada ($\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$)
X_0	Teor de água da amostra no início da maceração ($\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$)
$X(t)$	Teor de água da amostra no tempo t ($\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$)
y	Largura (mm)
z	Espessura (mm)

- z_1 Constante dos modelos empíricos de Halsey
- z_2 Constante dos modelos empíricos de Halsey

LETRAS GREGAS

ρ_a	Massa específica aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
λ	Calor latente de vaporização ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
λ_n	Raízes da equação de Bessel de ordem zero
ΔH	Variação da entalpia diferencial ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
ΔS	Variação da entropia diferencial ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ΔG	Energia livre de Gibbs ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS.....	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos.....	23
3 REVISÃO DE LITERATURA	24
3.1 Grão de trigo	24
3.1.1 Estrutura.....	24
3.1.2 Histórico e produção.....	26
3.1.3 Composição química	27
3.2 Processo de malteação.....	30
3.2.1 Maceração.....	31
3.2.2 Germinação	33
3.2.3 Secagem	34
3.3 Atividade enzimática	35
3.4 Atividade de água nos alimentos.....	37
3.5 Isotermas de adsorção-dessorção de água.....	43
4 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1 Caracterização inicial do trigo	47
4.2 Processo de malteação do trigo	48
4.2.1 Maceração.....	48
4.2.2 Germinação	51
4.2.3 Secagem	52
4.3 Análise de sorção de vapor de água	55
4.3.1 Isotermas de sorção	55
4.3.2 Modelagem matemática das isotermas de sorção	56
4.4 Propriedades termodinâmicas	57
4.5 Análise estatística	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 Caracterização inicial do trigo	61
5.2 Processo de malteação do trigo	62
5.2.1 Processo de hidratação.....	63
5.2.2 Modelagem matemática da cinética de hidratação	65

5.2.3 Germinação	71
5.2.3.1 Isoterma de sorção do malte verde de trigo	73
5.2.3.2 Propriedades termodinâmicas do malte verde de trigo	76
5.2.4 Secagem e cinética de secagem.....	81
5.4 Isotermas de Sorção*	90
5.5 Propriedades Termodinâmicas	96
6 CONCLUSÃO	103
7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	105
REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

O trigo tem se destacado pela sua importância para economia global, sendo o segundo cereal mais cultivado além de ser o cereal mais comercializado. É também considerado o principal insumo de vários alimentos destinados ao consumo humano e animal (CAMPONOGARA, 2015). Desta maneira, o trigo cumpre um papel importante para o segmento do agronegócio brasileiro.

O trigo é um cereal amplamente utilizado na indústria de alimentos sendo que sua principal aplicação é para fabricação de pães, bolos, massas e biscoitos. No entanto, o trigo também vem sendo muito utilizado para fabricação de cervejas, para isso o cereal passa por um processo de maltagem no qual apresenta modificações relevantes em sua composição. Tais modificações podem ocasionar variações no teor de amido, açúcar e atividade enzimática, afetando, assim, as propriedades tecnológicas do grão (POSNER, 2000).

A produção de malte brasileiro ainda é limitada em quantidade e qualidade, sendo a cevada majoritariamente empregada para esse uso. Devido aos elevados custos do malte de cevada, os fabricantes geralmente estão optando por substituí-la por cereais mais acessíveis (adjuntos) (LOWE *et al.*, 2004). Dentre muitos adjuntos (trigo, milho, sorgo, arroz e outros), o malte de trigo se torna uma alternativa adequada, uma vez que possui alta disponibilidade frente aos outros cereais e propriedades tecnológicas similares (POREDA *et al.*, 2015).

No entanto, as propriedades tecnológicas do malte estão diretamente ligadas ao conhecimento adequado das condições de processamento e armazenamento. Estas propriedades, por sua vez, ainda se mostram escassas na atual literatura.

O próprio processo de maltagem envolve inúmeras operações unitárias, desde a maceração até a secagem. Após hidratar os grãos até atingir uma umidade de $0,45 \text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria úmida}}^{-1}$ (b.u.), sua dormência é interrompida e inicia-se o estágio de germinação. Enzimas como α - e β -amilase, proteases e lipases são desenvolvidas até a interrupção da germinação pela secagem. As radículas são, então, removidas e o grão maltado com teor de água de $\sim 0,03$ a $0,05$ (b.u.) e baixa atividade de água (a_w) é submetido ao armazenamento (AGUILAR *et al.*,

2019; BARREIRO; FERNÁNDEZ; SANDOVAL, 2003; BOULTON; QUAIN, 2006).

Entretanto, a qualidade final do malte produzido também é dependente das condições de temperaturas e de teores de água de equilíbrio durante o armazenamento. Quando as condições de armazenamento não são adequadas, os grãos podem deteriorar-se rapidamente – afetando assim suas propriedades tecnológicas. Além disso, ambientes com alta umidade relativa oferecem condições favoráveis ao crescimento de microrganismos (ARSLAN-TONTUL, 2020).

Embora existam estudos sobre as propriedades de sorção de vapor de água de vários grãos (GICHAU; OKOTH; MAKOKHA, 2020; LI *et al.*, 2011; MOREIRA *et al.*, 2012; ROCA *et al.*, 2006; WAN *et al.*, 2018), não existem informações sobre o comportamento de sorção de vapor de água do malte de trigo.

A maneira pela qual o malte absorve a água define não apenas a estabilidade das enzimas e polifenóis, mas também afeta sua cor, aroma e sabor (BRIGGS *et al.*, 2004). Portanto, as propriedades de sorção de vapor de água do malte de trigo são destacadas como uma das informações importantes para seu adequado armazenamento.

Na literatura, é demonstrada que a melhor maneira de representar as características de sorção é por meio das isotermas de sorção (BETIOL *et al.*, 2020; POLACHINI *et al.*, 2016; SORMOLI; LANGRISH, 2015). Sua modelagem matemática fornece informações importantes sobre a microestrutura do material e as interações entre a matriz sólida e as moléculas de água. Além disso, as isotermas de sorção proporcionam um entendimento chave para o projeto de otimização do processo de secagem, embalagens, previsão de estabilidade de qualidade, prazo de validade e determinar as mudanças que podem ocorrer no teor de água durante o armazenamento (GICHAU; OKOTH; MAKOKHA, 2020).

Parâmetros termodinâmicos de sorção também são comumente usados para descrever qualitativamente e quantitativamente o fenômeno de sorção de vapor de água. As moléculas de água ligadas ao produto têm níveis de energia diferentes quando comparados aos da água livre.

Propriedades termodinâmicas como o calor isostérico de sorção, ausentes na literatura para malte de trigo, contribuem para determinar a energia

necessária para adsorver ou secar um produto (SORMOLI; LANGRISH, 2015). Estes parâmetros são importantes e únicos para cada produto alimentício em um determinado teor de água (JIN; TANG; SABLANI, 2019).

Tendo em vista a importância de relatar dados sobre o processo de sorção de vapor de água no malte de trigo, o objetivo deste estudo foi avaliar o processo de hidratação dos grãos de trigo e os mecanismos da cinética de secagem dos grãos germinados em diferentes temperaturas, assim como determinar algumas propriedades termodinâmicas associadas à secagem. Além disso, buscou-se avaliar a influência da temperatura nas isotermas de sorção de vapor de água do malte de trigo produzido, simulando diferentes condições de armazenamento. Os dados obtidos permitiram determinar os parâmetros termodinâmicos que caracterizam o processo de sorção de vapor de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo com este estudo foi avaliar e modelar os mecanismos envolvidos durante o processo de malteação do grão de trigo (hidratação, dos grãos de trigo, secagem dos grãos germinados – ou malte verde – e armazenamento do malte produzido). Além disso, avaliou-se a influência da temperatura nas isotermas de sorção de vapor de água no malte de trigo, simulando condições de armazenamento e secagem, a fim de determinar os parâmetros termodinâmicos que caracterizam o processo de sorção de vapor de água.

2.2 Objetivos específicos

Como parte dos objetivos específicos, este trabalho visou:

- Caracterizar os grãos de trigo quanto às suas propriedades físico-químicas (teor de água, proteína bruta, cinzas, lipídeos e atividade de água) e físicas (dimensões, massa específica aparente, massa de mil grãos);
- Avaliar a cinética de hidratação por meio de modelos empíricos;
- Avaliar o potencial de germinação dos grãos de trigo por meio do poder germinativo (PG) e tempo médio de germinação (TMG).
- Determinar as curvas de secagem do malte verde de trigo em diferentes temperaturas, por meio de modelos empíricos e semi-empíricos.
- Determinar o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas associadas à secagem do malte de trigo.
- Determinar experimentalmente e modelar matematicamente as isotermas de sorção do malte de trigo em função da temperatura empregada durante o armazenamento e secagem de malte verde de trigo.
- Determinar as propriedades termodinâmicas de sorção do malte de trigo em temperaturas aplicadas durante o armazenamento e secagem de malte verde de trigo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Grão de trigo

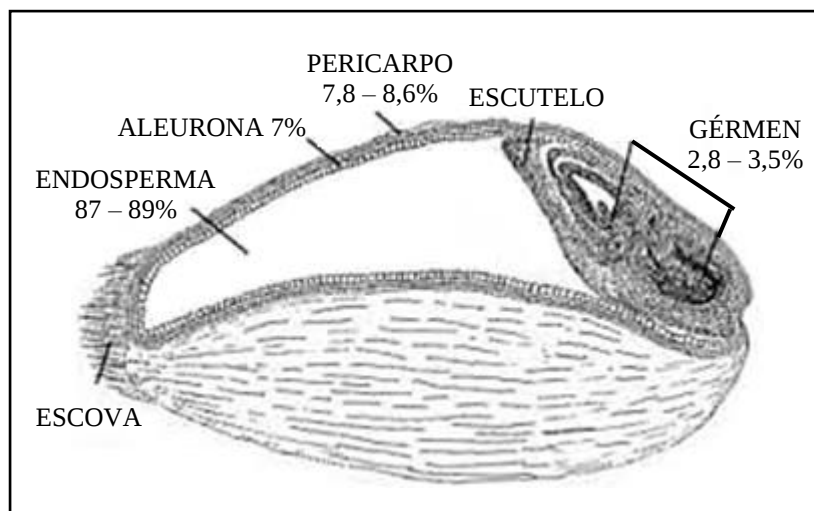
3.1.1 Estrutura

O trigo (*Triticum* spp.) é uma gramínea pertencente à família Poaceae, subfamília Pooideae ao gênero *Triticum*. Ele é classificado em diferentes espécies, conforme o número de cromossomos, podendo apresentar 7, 14 ou 21 cromossomos. Este fato o diferencia quanto à morfologia, resistência à doenças, rendimento, comportamento durante a moagem e qualidade dos produtos derivados (DENDY; DOBRASZCYK, 2001). Dentre as várias espécies de trigo cultivadas no mundo, as principais são *Triticum monococcum*, *Triticum durum* e *Triticum aestivum* (POPPER; SCHÄFER; FREUND, 2006).

Segundo a legislação brasileira, Instrução Normativa nº 7, de 15 de agosto de 2001, entende-se por trigo os grãos provenientes das espécies *Triticum aestivum* L. e *Triticum durum* L. Comercialmente, estes grãos podem ser classificados em classes e tipos. Dentre as classes, o trigo pode ser considerado como trigo brando, trigo pão, trigo melhorador, trigo para outros usos e trigo *durum*, definidos em função das determinações analíticas de Alveografia e Número de Queda (*Falling Number*). Quanto aos tipos os grãos de trigos, podem ser classificados como 1, 2 e 3, sendo estes valores definidos em função do limite mínimo da massa específica (peso hectolitro), dos limites máximos do teor de água e dos percentuais de matérias estranhas e impurezas e grãos avariados (BRASIL, 2001).

O grão de trigo, é de forma ovalada, arredondada nas extremidades, com 6 a 8 milímetros de comprimento e 3 a 4 milímetros de largura. Suas sementes são cariopses onde estão fortemente aderidas e envolvidas pelo pericarpo. A estrutura da semente é constituída por três partes anatômicas principais: gérmen, pericarpo e endosperma (GWIRTZ *et al.*, 2014), conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de um grão de trigo.



Fonte: FRANCESCHINA, 2013.

O gérmen, presente em menor quantidade, corresponde de 2,8 a 3,5%, da massa do grão; o pericarpo representa em torno de 7,8 a 8,6%; o endosperma corresponde a maior proporção no grão, representando de 87 a 89% do grão (DEWETTINCK *et al.*, 2008).

O grão de trigo ainda é composto por uma fina camada de aleurona, rica em vitaminas do complexo B, fibras e minerais, a qual envolve completamente o endosperma e o gérmen e representa aproximadamente 7% da massa seca do grão de trigo (HOSENEY, 1998).

O gérmen, localizado na extremidade do grão, é a parte embrionária da planta. Ele é rico em lipídeos e compostos fundamentais à germinação do grão (ATWELL, 2001). Embora contribua em menor proporção para o peso total do grão, o gérmen desempenha um papel crucial no processo de maltagem, pois é a região na qual se inicia o processo de germinação do grão (MARTINS; RODRIGUEZ, 2015).

O endosperma, presente em maior proporção, consiste em uma matriz proteica, na qual muitos grânulos de amido estão inseridos sob a forma de amilose e amilopectina (HADDAD *et al.*, 2001). Apenas o endosperma é utilizado para a fabricação da farinha de trigo branca (HOSENEY, 1991).

O pericarpo é a camada mais externa e protetora do grão (POPPER; SCHÄFER; FREUND, 2006), é rico em fibras e sais minerais (ATWELL, 2001).

3.1.2 Histórico e produção

Existem relatos que o início do cultivo do trigo seja originário do cruzamento de espécies silvestres de gramíneas nas proximidades dos rios Tigres e Eufrates, na Mesopotâmia, por volta de 15.000 a 10.000 anos a.C., sendo uma das primeiras plantas cultivadas (SILVA *et al.*, 1996). Desde então, o trigo se espalhou pelo mundo devido ao seu valor nutricional, bem como a facilidade em ser cultivado, colhido, armazenado, transportado e processado (POSNER, 2000).

No Brasil, a história do trigo inicia-se no século XVI, no período colonial, com a introdução no país em 1534, por Martin Afonso de Souza. Ele foi cultivado inicialmente na Capitania de São Vicente (São Paulo), em seguida levado para o Nordeste e plantado em Pernambuco, Paraíba, Ceará, Pará e, posteriormente, em Minas Gerais e Goiás. No início, o clima quente dificultou a expansão da cultura. No entanto, só adquiriram importância econômica no Brasil em meados do século XVIII, quando a cultura de trigo começou a se desenvolver no Rio Grande do Sul (ABITRIGO, 2020).

O trigo possui uma contribuição significativa na economia agrícola global, visto que ele é o segundo cereal mais produzido no mundo, superado apenas pelo milho (MAPA, 2015). Além disso, é o grão mais comercializado, respondendo por quase 35% do volume de grãos vendido mundialmente.

O trigo é uma cultura de inverno, semeada no Brasil na entressafra da soja. Seu cultivo em sistema de rotação é importante para promoção da sustentabilidade da agricultura já que contribui efetivamente na manutenção e melhoria da fertilidade química e física do solo, no controle de doenças, pragas, entre outros (EMBRAPA, 2017).

Historicamente, segundo dados divulgados em dezembro de 2019 pelo departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), verificou-se que o volume de produção e o consumo mundial de trigo vêm apresentando crescimento. Analisando a evolução temporal, observa-se que no período de 2015 a 2019 a produção mundial de trigo obteve um aumento, saindo de um volume de produção de, aproximadamente, 738,16 milhões de toneladas em 2015 para 765,55 milhões de toneladas em 2019, o que representa um crescimento de 3,71%. Da mesma forma, observa-se que o consumo mundial de

trigo apresentou um crescimento de 5,46% no mesmo período, saindo de um volume de 716,048 para 755,172 milhões de toneladas (ABITRIGO, 2019).

Em relação aos países produtores de trigo no período de 2018/2019, destacam-se a União Europeia, com aproximadamente 151,3 milhões de toneladas, seguido pela China (132 milhões de toneladas), Índia (101,2 milhões de toneladas) e Rússia (74,2 milhões de toneladas). O Brasil, apesar de ter uma posição mundial de destaque no agronegócio, ainda detém menos de 1% de participação do mercado mundial e figura na 16ª posição, com produção de 5,3 milhões de toneladas (ABITRIGO, 2019).

No Brasil, a produção de trigo concentra-se na Região Centro-Sul, principalmente no Paraná e Rio Grande do Sul. Juntos, estes estados são responsáveis por aproximadamente 84,14% da produção nacional do grão devido às condições climáticas favoráveis à cultura, principalmente no Rio Grande do Sul (CONAB, 2020). As variedades de trigo cultivadas no Brasil pertencem à espécie *Triticum aestivum* L. (IAC, 2000), que é a mais comumente cultivada em todo o mundo.

O consumo nacional de trigo apresenta uma previsão de acréscimo da ordem de 1,31% ao ano, estimada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Apesar da expansão da produção projetada para os próximos anos (ABITRIGO, 2019), o abastecimento interno ainda depende de importações de trigo, principalmente devido à qualidade do produto. Isso se deve ao fato de que trigo produzido em solo brasileiro possui menor concentração de proteínas formadoras do glúten, sendo mais amplamente utilizado pela indústria de panificação (ABITRIGO, 2011).

No que se refere às importações, os principais parceiros comerciais do Brasil são Argentina, que fornece 76,8% do valor do trigo importado pelo país, além dos Estados Unidos (8,6%), Paraguai (8,5%) e o Uruguai (5,8%). Juntos, esses países são responsáveis por 99,7% das importações de trigo realizadas no Brasil (FIEP, 2016).

3.1.3 Composição química

Os cereais são considerados importantes culturas para alimentação humana devido à sua composição, destacando-se o trigo, o arroz, o milho, o

centeio, a cevada, a aveia e o triticale (MANDARINO, 1994). O trigo é um dos mais antigos alimentos consumidos, fazendo parte da dieta da alimentação humana há milhares de anos. São diversos os produtos que podem ser obtidos a partir dele, sendo os mais comuns os pães, massas, bolos e biscoitos. Para cada tipo de produto, há diferentes exigências quanto as características química, físicas e tecnológicas da matéria-prima e suas farinhas (CANZIANI; GUIMARÃES, 2009).

O trigo apresenta em sua composição: carboidratos (amido e fibras) variando de 65 – 75%, água (12 – 14%), proteínas (7 – 12%) e, em menor proporção, lipídeos (2 – 6%), além dos micronutrientes (POMERANZ, 1988). É fonte de minerais (especialmente magnésio), vitaminas do complexo B e E, bem como compostos antioxidantes (ácidos fenólicos e carotenoides) (SLAVIN, 2003). Seu teor proteico é o maior dentre os cereais, entretanto tem a lisina como aminoácido limitante (ORTH; SHELLENBERGER, 1988; PIRES *et al.*, 2006).

Considerando a composição das diferentes frações dos grãos, observa-se que no endosperma predominam-se os carboidratos e proteínas, no pericarpo os carboidratos estruturais e cinzas; e no gérmen alto conteúdo de proteínas e lipídeos. A camada de aleurona é rica em proteínas, cinzas, gordura, fitatos, fósforo e niacina (SHEWRY *et al.*, 2012).

A composição do grão de trigo, afeta suas características funcionais e tecnológicas (MOUSIA *et al.*, 2004). Ela depende de fatores como espécie, variedade, tipo e fatores ligados à sua produção agrícola. O teor de proteína é a fração que apresenta maior variação, estando diretamente relacionado ao teor de amido (LIMA, 2010).

A qualidade do grão de trigo é o resultado da interação das condições de cultivo (interferência do solo, clima, pragas, manejo da cultura e da cultivar), em soma à interferência das operações de colheita, secagem e armazenamento. Estes fatores influenciam diretamente em seu uso industrial final como farinha de trigo (EL-DASH; MIRANDA, 2002; GUTKOSKI; JACOBSEN NETO, 2002).

Dessa forma, o trigo é um importante cereal por ser o principal insumo de alimentos e preparos de consumo humano e animal devido a sua composição química e valor nutritivo. Embora também apresente certo poder diastático, por ser rico em amido (PIRES, 2012), ele representa uma importante matéria-prima para produção de malte.

3.1.4 Malte de trigo

Por definição, malte é o produto resultante da germinação e seguido da secagem do grão de cevada ou de outros cereais. Entretanto, o produto é designado simplesmente "malte" quando obtido da cevada, quando o malte for obtido de outro cereal, será designado pela palavra "malte" seguido do nome do cereal de origem. Assim, tem-se malte de trigo, de milho, centeio, aveia e de outros (BRASIL, 1978).

Segundo a Embrapa Trigo, o consumo anual de malte pela indústria cervejeira, atualmente está estimado em 1,6 milhão de toneladas, sendo, aproximadamente, 85% desta demanda suprida através de importações de grãos e malte da Argentina e do Uruguai, principais fornecedores. Em 2019 foram comercializados no mundo 31 milhões de toneladas de grãos de cevada e em torno de 8 milhões de toneladas de malte. No mesmo ano, o Brasil importou 671 mil toneladas de grãos de cevada, ocupando o 11º lugar entre os maiores importadores de cevada do mundo. Importou também 1,09 milhão de tonelada de malte, ficando em primeiro lugar entre os maiores importadores mundiais de malte.

Do lado da exportação, observa-se uma expansão de exportação de cerveja nos últimos anos, o Brasil ocupa a terceira posição no ranking com uma média de produção de 13 bilhões de litros de cerveja ao ano (DE MORI; MINELLA, 2012)

A cevada é um dos cereais mais amplamente empregados na produção de cerveja, apresentando uma série de características vantajosas em termos de praticidade, como por exemplo a aderência da casca ao grão, permitindo que a cevada forme a camada de filtração durante a lavagem. Seu conteúdo de amido e proteína é elevado, juntamente com a atividade enzimática, resultando em quantidades favoráveis de açúcares fermentescíveis, polipeptídios e aminoácidos durante o esmagamento (RICE *et al.*, 2020). Por outro lado, o grão de trigo é comumente utilizado na produção de cervejas de trigo e/ou como complemento de outros grãos em bebidas fermentadas tradicionais (MARSH *et al.*, 2014; WATERS *et al.*, 2014). Além disso, o teor de proteína é maior que o da cevada, e ainda pode ser considerado uma boa fonte de micronutrientes (RICE *et al.*, 2020). Em comparação com a cevada, cervejas obtidas a partir de trigo

maltado ou não, apresentam diferenças na viscosidade, pH, turbidez e espuma (HOUGH *et al.*, 1982; DEPRAETERE *et al.*, 2004).

Um dos fatores que interferem na qualidade do malte de trigo obtido é a variedade do trigo utilizado. Para indústria cervejeira, o trigo utilizado pode ser oriundo de variedades mole ou duras, com teores de proteína acima de 11% e de cultivares de primavera ou inverno (HOUGH *et al.*, 1982; CANZIANI; GUIMARÃES, 2009). Além disso, outros fatores como teor de amido, relação amilose/amilopectina e conteúdo de proteína do grão também afetam a qualidade do trigo para produção de malte (JIN *et al.*, 2011).

Depraetere *et al.*, (2004) utilizou em sua pesquisa para a fabricação de cerveja uma variedade de trigo macio, de endosperma farináceo, obtendo maiores rendimentos, visto que o grão macio é de fácil moagem. Em contrapartida, é interessante que o grão duro e com alto teor de proteína seja usado como matéria prima, obtendo uma cerveja mais pálida e com boa estabilidade de espuma. Nutrientes que são desenvolvidos por enzimas proteolíticas são muito significativos para determinar o quão bem atenuado o mosto da cerveja será (PAPAZIAN, 2014).

3.2 Processo de malteação

Na literatura, o processo de malteação está amplamente ligado ao processamento da cevada, cereal mais maltado do mundo, sobretudo nas indústrias cervejeiras. Isso se deve à sua facilidade de maltagem, além de possuir alto teor de amido, prover nutrientes suficientes para as leveduras e conferir sabor, aroma e odor característico a cerveja (VENTURINI, 2013).

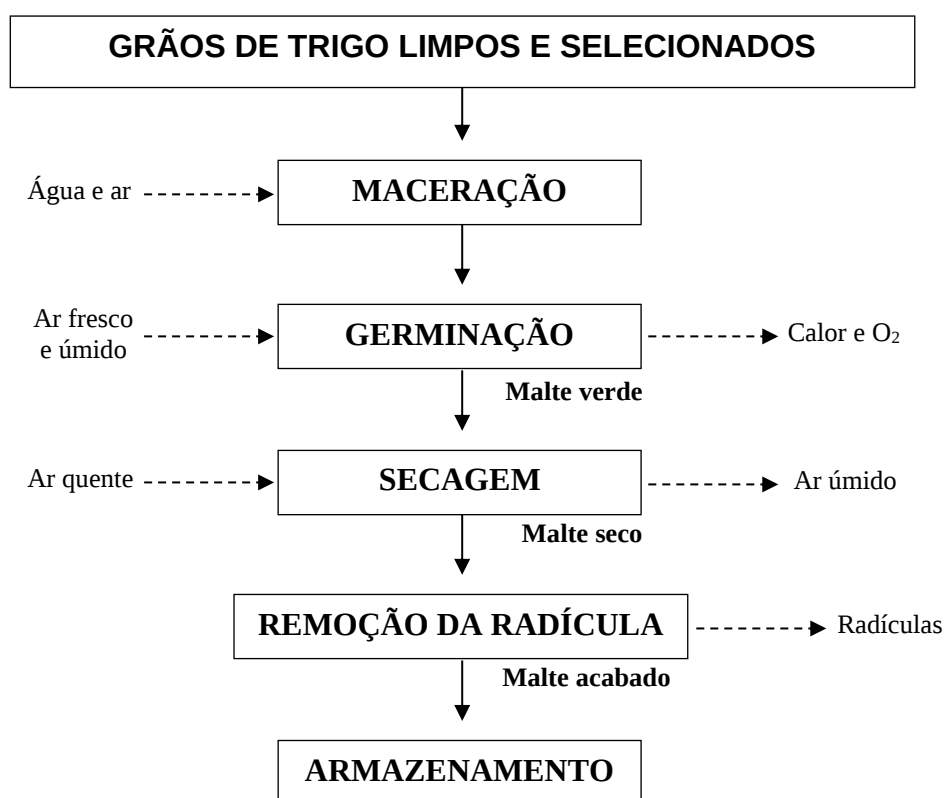
Apesar da literatura limitada, o malte pode ser obtido por outros cereais (BRASIL, 1978) a depender do poder diastático. Este parâmetro, definido por Palmer (2006) como o potencial de conversão de amido do malte, influencia na escolha do cereal juntamente com o seu valor econômico. Dentre os cereais utilizados na alimentação humana, destacam-se por apresentarem maior poder diastático, a cevada, centeio, trigo, aveia, milho e arroz, nessa ordem (SERNA-SALDIVAR, 2010).

A malteação consiste em aumentar o conteúdo enzimático dos grãos, através de sua germinação após hidratação em ambiente controlado (REBELLO,

2009). Esse processo eleva o seu poder diastático e o desenvolvimento inicial de uma nova planta (VENTURINI, 2013).

O processo de malteação consiste em três operações fundamentais: a maceração, a germinação e a secagem dos grãos (Figura 2). No entanto, antes de seguir para a maceração os grãos devem ser previamente limpos e submetidos ao processo de seleção para que tenham tamanhos uniformes (OWENS, 2001). Estas etapas serão descritas mais detalhadamente nas próximas seções.

Figura 2 – Diagrama do processo de malteação.



Fonte: EBC, 2000 (adaptado).

3.2.1 Maceração

A primeira fase da malteação é a maceração (ou hidratação). Esta etapa tem como finalidade aumentar o teor de água do grão que está em torno de 10-13% para 42-46% (b.u.) (SILVA *et al.*, 2008). Essa elevação do teor de água é

necessária para quebrar a dormência dos grãos, permitindo que eles atinjam condições adequadas para germinar (ZSCHOERPER, 2009). O processo de maceração permite ao grão a síntese enzimática necessária para converter as reservas nutritivas do endosperma em energia por meio do processo de germinação (KUNZE, 2006).

A maceração consiste na imersão dos grãos em água potável a baixa temperatura com agitação e temperatura controlada. Esta operação, que pode durar até dois dias (HENRY, KETTLEWELL, 1996; GIBSON, 2001), ativa o processo de desenvolvimento fisiológico da planta (fase biológica). Além disso, ele promover a limpeza da superfície do grão, com remoção parcial de substâncias indesejáveis da casca (TSCHOPE; NOHEL, 1999).

O papel da maceração é fornecer umidade e oxigênio adequados ao grão para iniciar a germinação (ESKIN, 1990). A absorção da água, ocorre através da zona do embrião (SILVA *et al.*, 2008), e pode ser influenciada por vários fatores como a constituição do grão, estrutura do grão, temperatura da água de maceração, tempo e método de maceração. Nessa etapa também ocorre a degradação da β -glucana presente no grão (MONTANUCI, 2014).

A temperatura da água é um parâmetro físico que contribui na velocidade da hidratação. Temperaturas elevadas podem acelerar o processo, diminuindo a resistência à incorporação de água no alimento e promovendo uma maior taxa de absorção (GEANKOPÓLIS, 1983; KHAZAE; MOHAMMADI, 2009; MONTANUCI; JORGE; JORGE, 2013; FRACASSO *et al.* 2014). Em contrapartida, temperaturas elevadas podem causar o rompimento da casca e a, degradação dos compostos químicos, alterando, dessa forma, os aspectos físicos e químicos do grão (KHAZAE; MOHAMMADI, 2009).

Os constituintes químicos do grão que mais favorecem o processo de hidratação são as proteínas. Por outro lado, os que mais dificultam a hidratação são a celulose e as substâncias pécticas, sendo que o amido apresenta interferência reduzida (BECKERT; MIGUEL; MARCOS FILHO, 2000; OMOTO, 2006).

Sabe-se que a hidratação inadequada dos grãos tem efeitos prejudiciais sobre a qualidade geral do malte e é responsável pela degradação incompleta da parede celular durante a malteação (PALMER, 2006) Esse fenômeno cria uma barreira eficaz ao movimento das enzimas hidrolíticas no endosperma do

grão durante a maltagem, resultando em baixos rendimentos do extrato hidrolisado (BAMFORTH, 1982; BROWN; MORRIS, 1890).

3.2.2 Germinação

Quando o grão atinge o teor de água requerido durante a etapa de maceração, este é destinado às câmaras de germinação sob condições de temperatura e umidade controladas por 3 a 5 dias. Esse processo ocorre em uma faixa de temperatura que varia entre 12 e 19°C, a qual deve ser controlada para evitar o superaquecimento do grão com a uma umidade relativa do ar entre 85 a 90% (GIBSON, 2001). Durante essa etapa ocorre o aumento do conteúdo enzimático através da síntese e ativação das enzimas amilases, glucanases e as proteases (BANDINELLI, 2015).

O processo de germinação é um processo biológico que envolve a liberação de ácido giberélico pelo escutelo e sua distribuição em toda a camada de aleurona que, por sua vez, induzem a produção de enzimas hidrolíticas nas primeiras 48 horas de germinação. A enzima mais expressiva neste período é a β -glucanase, a qual degrada os glucanos, constituinte das paredes dos grânulos de amido. Após a atividade dessa enzima, o amido fica mais acessível ao ataque enzimático (KUNZE, 1994; BRIGGS, 2002).

As enzimas α -amilase e as proteases têm um aumento de atividade por volta de 48 a 96 horas de germinação. Devido esse aumento de acessibilidade do amido, as enzimas β -amilases hidrolisam as reservas para gerar energia para o desenvolvimento do embrião, sofrendo um decréscimo de sua atividade nos primeiros dias de germinação. Após 72 horas de germinação, sua concentração volta a aumentar com o intuito de fornecer carboidratos de baixo peso molecular para o vegetal se desenvolver (LOTTERMAN, 2012).

Na germinação dos grãos, observa-se o crescimento de radículas provenientes do núcleo até a superfície do grão, denominado acrospira. Quando a acrospira possuir aproximadamente $\frac{3}{4}$ do tamanho do grão e a radícula atingir até duas vezes o comprimento do grão, o malte está totalmente modificado e a germinação pode ser encerrada (EBC, 2000). O produto obtido após esta etapa denomina-se malte verde e caracteriza-se por seu alto poder diastático (capacidade para hidrolisar o amido) e pelo alto conteúdo de açúcares,

aminoácidos e peptídeos (GEORG-KRAEMER; MUNDSTOCK; CAVALI-MOLINA, 2001). O potencial do processo de germinação é um dos índices mais importantes para a qualidade do processo de malteação (BRYCE *et al.*, 2010).

3.2.3 Secagem

Quando a produção de enzimas e as modificações no endosperma atingem o nível ótimo desejado, a atividade biológica deve ser interrompida pela etapa de secagem através da redução do teor de água do grão. A maior dificuldade do processo de secagem é reduzir a água do malte até um teor seguro sem danificar a atividade enzimática (HOSENEY, 1986).

Além da remoção da água, a secagem tem ativas reações de escurecimento no grão, como a reação de Maillard, agregando ao malte características sensoriais agradáveis como cor e o aroma (KANNENBERG; FULAYTER, 1997; SANDRIN, 2013).

A secagem é conduzida entre temperaturas que variam de 20 a 100 °C, de acordo com o malte desejado (claro ou escuro) (KUNZE, 2006). Temperaturas de secagem mais baixas refletem em tempo de processo de secagem mais longo, produzindo um malte mais claro e atividade enzimática praticamente intacta. Por outro lado, um processo mais rápido necessita de temperaturas elevadas, o que acaba resultando em um malte mais escuro com atividade enzimática reduzida devido à sensibilidade das enzimas à temperatura (VENTURI, 2013).

De forma geral, a secagem do malte verde pode ser conduzida por um período inicial à baixas temperaturas (50 a 60°C) até atingir teor de água próximo de $\sim 0,11 \text{ g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$ com o objetivo de proteger as enzimas sensíveis ao calor. Após uma redução adequada do teor de água, aumenta-se a temperatura do ar de secagem. Os ciclos de secagem intermitente determinam, também, o tipo de malte produzido (BARREIRO; FERNÁNDEZ; SANDOVAL, 2003; BRIGGS, 2002).

Ao término do processo de secagem, o malte é denominado de malte acabado (EBC, 2000). Ele é resfriado dentro da própria estufa, para evitar perdas enzimáticas, alteração de cor e do paladar da cerveja (ZSCHOERPER, 2009). As radículas, brotos que se formaram durante o processo de germinação, são,

então, removidas (ZSCHOERPER, 2009). Devido a sua alta higroscopicidade, ela favorece a absorção de água e, pode provocar um aumento da umidade do malte durante o armazenamento (TSCHOPE; NOHEL, 1999). Além disso, as radículas apresentam elevado teor de compostos nitrogenados e fenólicos que promovem sabor amargo e adstringente à cerveja, por exemplo (MALTEUROP, 2018). Quando se encontram com baixa umidade, as radículas podem ser removidas facilmente, fazendo o uso de peneiras vibratórias ou de roscas de germinadores (KUNZE, 2004).

Segundo Li *et al.* (2008), outros fatores além da atividade enzimática determinam a qualidade do malte acabado. Dentre eles, encontram-se a composição química (proteínas e amido), estrutura morfológica (dois ou seis ramos), espessura da casca, tamanho do grão e os polissacarídeos presentes na parede das células.

3.3 Atividade enzimática

Apesar do grão de trigo apresentar em sua estrutura algumas enzimas, no entanto o grão não pode ser utilizado diretamente na produção de cerveja, pois seu sistema enzimático não está capacitado para transformar o amido que está presente nas células do endosperma, em açúcares fermentescíveis, os quais são necessários para a produção de cerveja. Para isso se faz necessário realizar a malteação do grão processo que ocorre em três etapas: maceração, germinação e secagem. Durante este processo ocorre as transformações bioquímicas necessárias para a modificação do grão e haverá a ativação e a formação de várias enzimas como, por exemplo, β -glucanases, α -amilases e proteases (SCHMITT; MARINAC, 2007; KUNTZ & BAMFORTH, 2007).

Existem diferentes tipos de enzimas que são responsáveis pela conversão do amido do grão em açúcar e dextrinas não-fermentescíveis. No entanto, durante o processo de germinação, o amido presente no endosperma é principalmente convertido em glicose solúvel e maltose por meio da hidrólise das enzimas α - e β -amilases (OWENS, 2001; MÓDENES; SILVA; TRIGUEROS, 2009).

As α -amilases são endoenzimas que podem atacar as cadeias de amilose e amilopectina em qualquer ponto no interior da cadeia linear. Elas são

responsáveis, em especial, por reduzir rapidamente a massa molecular média dos polímeros de amido ao hidrolisar aleatoriamente suas ligações $\alpha(1-4)$. Os produtos finais típicos são α -dextrinas e malto-oligossacarídeos de 2 a 12 unidades de glicose, que podem ser maltose ou dextrinas (XIAO *et al.*, 2006; GEORG-KRAEMER; MUNDSTOCK; CAVALI-MOLINA, 2001, DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). As dextrinas são indispensáveis para o gosto adocicado e sensação de corpo das cervejas (AGUILAR *et al.*, 2000; REGULY, 1996). A maltose, por outro lado, são açúcares simples fundamental para processo de fermentação, sendo o carboidrato mais predominante no mosto e, por conseguinte, o mosto irá se tornar mais fermentável (PARKES, 2001).

Enquanto a α -amilase é ativada principalmente durante a germinação, a β -amilase já está presente em quantidades maiores no grão. As β -amilases são exoenzimas que hidrolisam exclusivamente ligações glicosídicas $\alpha(1-4)$ da extremidade não redutora do amido, liberando maltose (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). Essa enzima é fundamental, pois sem açúcares fermentescíveis não há formação de álcool (AGUILAR *et al.*, 2000; REGULY, 1996). Ainda, ela se apresenta como uma importante aliada na melhora de textura e do envelhecimento de pães e bolos (ALTAMIRANO-FORTOUL; ROSELL, 2011).

Segundo Aboumradi (2015), a atividade de cada enzima é favorecida por diferentes temperaturas e condições de pH. A temperatura e o pH ótimo da α -amilase são de 70-75 °C e de 5,0-7,0, respectivamente. Enquanto, a β -amilase possui temperatura e o pH ótimo de 60-65 °C e de 4,5-5,0, respectivamente (AGUILAR *et al.*, 2000; REGULY, 1996).

Durante a secagem, enzimas termo sensíveis tendem a perder eficiência como a própria β -amilase, que diminui até 40% de sua atividade durante essa etapa. Em contrapartida, enzimas como a α -amilase aumentam sua atividade em até 15% durante a secagem (KUNZE, 1994).

Por formarem o grupo das enzimas diastáticas que hidrolisam o amido em açúcares fermentescíveis, a atividade enzimática da α -amilase e β -amilase é considerada um importante parâmetro de qualidade para o malte (QI; ZHANG; ZHOU, 2006). Um malte com maior poder diastático tem maior capacidade de hidrolisar seus açúcares complexos e outros que possam ser adicionados ao cozimento até transformarem-se em açúcares simples (GIBSON *et al.*, 1995).

Além das amilases, existem outras enzimas, como as proteases, que também atuam ao nível dos componentes do endosperma, neste caso sobre a matriz proteica. As proteases desempenham um papel importante durante a etapa de germinação, verificando-se um forte aumento na atividade proteolítica a partir do 3º dia de germinação (BHATYY, 1969; WROBEL & JONES, 1992). A ação desta enzima durante a maltagem também pode influenciar algumas características da cerveja, melhorando-se a limpidez da cerveja e havendo a diminuição da turbidez e instabilidade. Outra enzima também utilizada na produção de cerveja é a fitase, uma enzima que quebra a molécula fitina e libera ácido fítico, o que reduz o pH do mosto (GREEN, 2008).

A ação das enzimas já referidas não seria possível sem as β -glucanases, que desempenham um papel fundamental durante o processo de maltagem, e em particular durante a etapa de germinação. Estas enzimas são as responsáveis pela degradação das β -glucanas presentes nas paredes das células do endosperma (gomos), usualmente encontradas em centeio trigo, aveia e maltes submodificados (GREEN, 2008).

A sua ação vai permitir o acesso das restantes enzimas, tais como amilases e proteases, aos componentes que se encontram no interior das células do endosperma. Para além disso, a presença de componentes não degradados das paredes celulares, como as β -glucanas, pode conduzir a problemas de viscosidade e turbidez, que poderão implicar perdas de tempo e maiores custos de produção (IZYDORCZYK E MACGREGOR, 2000; JIN *et al.*, 2004).

O malte de trigo, em particular, possui altos níveis de goma e, por esta razão, uma permanência em baixa temperatura durante a mistura é praticamente indispensável quando há a utilização de trigo em uma receita (BUSCH, 2015). Em geral, um malte mais modificado possuirá níveis mais baixos de β -glucanas.

A atividade dessas enzimas é dependente de vários fatores, tais como: variedade do grão, das condições de processo, mas também das condições de estocagem, como temperatura e atividade de água (SAIKA *et al.*, 2005).

3.4 Atividade de água nos alimentos

A água é o principal constituinte da maioria dos alimentos, além disso, desempenha um papel fundamental nos processos químicos e físicos dos

alimentos durante o processamento e estocagem (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

A água presente nos alimentos pode ser classificada como água livre e água ligada, de acordo com a sua interação com a matriz alimentícia (MAKAWY; EL-SAYD, 2010). A água livre se encontra nos espaços intergranulares e no interior dos poros do alimento. Ela é mantida por forças capilares com pouca intensidade. Este tipo de água apresenta grande mobilidade e pode ser facilmente retirada durante um processo de secagem. Suas moléculas não estão ligadas a nenhum componente do alimento, podendo atuar como solvente para sais e açúcares e na promoção de reações químicas e crescimento microbiano. Por estar cercada somente por outras moléculas de água, a água livre apresenta propriedades físico-químicas muito semelhantes às da água pura como o ponto de ebulição, ponto de fusão e densidade. Quando um produto é congelado, somente a água se congela, ficando indisponível para reações (ATHIÉ *et al.*, 1998; MAKAWY; EL-SAYD, 2010).

A água ligada, é aquela que está fortemente ligada às moléculas da matriz (proteínas, carboidratos e minerais). Essas ligações são muito mais fortes do que ocorre entre moléculas de água pura, fazendo com que elas fiquem mais próximas umas às outras e sua estrutura fique mais densa. O aumento da densidade da água ocasiona a alteração em suas propriedades físico-químicas, como, por exemplo, aumento do ponto de ebulição e diminuição do ponto de fusão. Assim, essas moléculas de água só podem ser removidas se o produto for exposto a altas temperaturas. Esta água não pode ser congelada e assim não altera a estrutura do produto (ATHIÉ *et al.*, 1998; MAKAWY; EL-SAYD, 2010).

Apesar da relação comum entre a quantidade de água presente nos alimentos e a velocidade de reações, o teor de água por si só não é um indicador adequado para prever a sua estabilidade. Mesmo com teor de água parecidos, o alimento pode apresentar diferenças na estabilidade. Este fato está associado, em partes, às diferentes atividades de água - ou intensidade com a qual a água está associada aos constituintes não aquosos (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Por essa razão, a medida mais comumente empregada para expressar estabilidade de um produto é a atividade de água (a_w).

Fisicamente, a a_w pode ser calculada pela razão da pressão de vapor de água do alimento (p) e a pressão de vapor de água pura (p_0), para baixas pressões e temperaturas, conforme indicado na Equação (1).

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

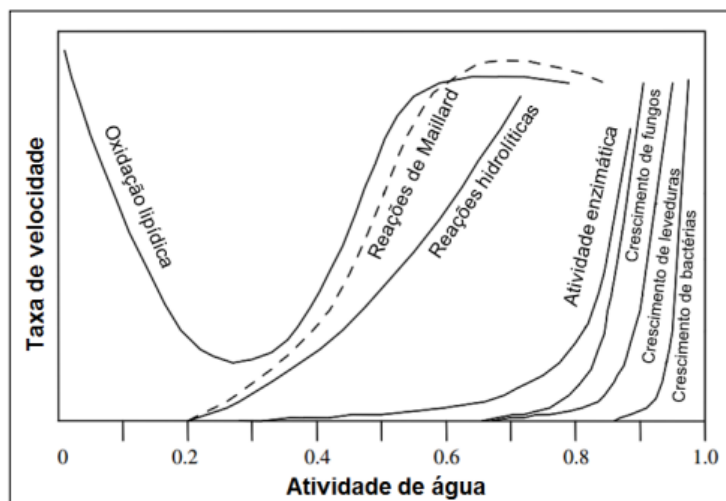
No equilíbrio, existe uma relação de igualdade entre a a_w de um alimento e a umidade relativa no equilíbrio (URE) do ar exercida em ambiente isolado. Quando expressa como porcentagem, a URE é, portanto, 100 vezes maior que o valor de a_w (COULTATE, 1996):

$$a_w = \frac{URE(\%)}{100} \quad (2)$$

A relação entre a_w e URE permite prever o quanto os alimentos poderão ganhar ou perder água quando forem expostos a um ar de determinada umidade relativa e temperatura (ROCKLAND; BEUCHAT, 1987). Dessa forma, a atividade de água tem sido o principal indicador para garantir a estabilidade dos alimentos e controlar o crescimento de microrganismos e reações químicas.

Na Figura 3, podem ser previstas reações de oxidação lipídica, escurecimento não enzimático (reação de Maillard), reações hidrolíticas, atividade enzimática e desenvolvimento de microrganismos – influenciando assim a estabilidade nutricional, a coloração, o odor, o sabor e a textura dos alimentos (HARDMAN, 1987; BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2007).

Figura 3 – Mapa de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água.



Fonte: TSOTSAS; MUJUMDAR, 2011 (adaptado).

O crescimento microbiano é limitado pela a_w , e cada microrganismo precisa de uma a_w mínima para impedir o seu crescimento (Tabela 1), mas geralmente a maioria das bactérias e dos microrganismos patógenos não se desenvolvem em a_w menor que 0,86, mesmo que os outros parâmetros como pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes sejam ideais (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2003; KAREL; LUND, 2003).

Tabela 1 – Atividade de água (a_w) mínima necessária para o crescimento de microrganismos e produção de toxina de importância alimentar.

a_w mínima		Microrganismos
Crescimento	Produção de toxina	
0,99		<i>Campylobacter jejuni</i>
0,96		<i>Shigela</i> spp.
0,95-0,97	0,97	<i>Clostridium botulinum</i>
0,93-0,95	0,94 - 0,95	<i>Clostridium botulinum</i>
0,93-0,95		<i>Clostridium perfringens</i>
0,92-0,95		<i>Salmonella</i> spp.
0,86	0,87 - 0,90	<i>Staphylococcus aureus</i>
0,83	0,83 - 0,86	<i>Penicillium viridicatum</i>
0,82	0,87	<i>Aspergillus parasiticus</i>
0,81-0,85	0,87-0,90	<i>Penicillium cyclopium</i>
0,78-0,80	0,83-0,87	<i>Aspergillus flavus</i>
0,77-0,83	0,83-0,87	<i>Aspergillus ochraceus</i>
0,75		Bactérias halofílicas
0,65		Bolores xerofílicos
0,60		Fungos osmofílicos

Fonte: BEUCHAT, 1981 (adaptado).

O intervalo da atividade de água no qual são observados o crescimento microbiano, varia de 0,60 a 0,99 (Tabela 1). Em geral, o valor ótimo para o crescimento dos microrganismos situa-se entre 0,90 e 0,99, abaixo disso, o crescimento é moderado, retardado ou inibido (ARAUJO *et al.*, 2005).

Os fungos filamentosos são os microrganismos mais resistentes à diminuição da atividade de água, conhecidos por desenvolverem em ambientes com baixa disponibilidade de água, sendo os principais responsáveis pela deterioração de alimentos na faixa de a_w de 0,61 – 0,70 (BEUCHAT, 1983). Isto se deve ao fato de que nessa faixa não há competição de bactérias.

O valor mínimo de a_w necessário para o crescimento microbiano pode ser alterado para mais ou para menos por fatores como mudança de pH, adição de sal, adição de agentes antimicrobianos, tratamento térmico, condições e tempo de estocagem (RAHMAN, 2007).

Conhecendo os valores de atividade de água em que os microrganismos se desenvolvem, através da análise de a_w é possível definir por quais processos um alimento deve passar para estender sua conservação (SANDULACHI, 2012).

Ao contrário do crescimento microbiano, as reações químicas e enzimáticas podem ocorrer em a_w muito baixas. As reações de escurecimento não enzimático são desfavorecidas aproximadamente com a atividade de água menor que 0,20 e maior que 0,80 (Figura 3). As velocidades das reações químicas e enzimáticas são favorecidas com aumento da a_w (Figura 3). Um produto com a_w em torno de 0,30 é bastante estável as reações de oxidação lipídica, reações de Maillard, reações hidrolíticas, atividade enzimática e crescimento de microrganismos.

A a_w influencia também a estabilidade das vitaminas nos alimentos. A degradação das vitaminas não deteriora o alimento, mas reduz seu valor nutricional. Algumas das vitaminas que sofrem influência do valor de a_w do alimento são: ácido ascórbico (vitamina C), tiamina (vitamina B1) e riboflavina (vitamina B2). Cada vitamina apresenta uma faixa de valores de a_w em que é mais estável e uma faixa de valores em que sofre maior degradação. Esses valores não são facilmente determinados porque sofrem muita influência de fatores como a composição da matriz alimentar em que está presente, temperatura e pH (HARDMAN, 1987; BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2007).

Em geral, todas as reações mostradas na Figura 3 têm sua velocidade relativa reduzida significativamente com a diminuição da a_w , até a a_w abaixo de 0,2 com exceção da oxidação de lipídios. A oxidação lipídica, por sua vez, é a única reação que ocorre em a_w abaixo de 0,20, e tem um aumento exponencial entre a faixa de 0,25 e 0,80. A oxidação de lipídios passa por um mínimo ao longo de 0,3, depois sofre uma rápida elevação (VAN DER BERG, 1986).

A a_w é um parâmetro muito utilizado pela indústria de alimentos para conservação dos alimentos. À medida que a atividade de água diminui aumenta a estabilidade e segurança dos alimentos. Vários métodos de conservação são baseados na diminuição de a_w , tais como: secagem, adição de solutos como sal e açúcar, liofilização, dentre outros.

Conhecer a natureza e a concentração de diferentes componentes e as suas interações com a água é importante para entender por que alguns alimentos são estáveis e outros não com a mesma umidade. No entanto, é importante ressaltar que a Figura 3 é apenas uma previsão do comportamento das reações em um determinado alimento. Para se conhecer o comportamento real dessas reações num dado alimento, é necessário a coleta de dados experimentais para o levantamento das curvas.

As aplicações da atividade de água para indústria de alimentos são muitas e podem sempre ser usadas para melhorar a qualidade de um produto alimentício, facilitando e uniformizando sua fabricação, como na escolha do processo na qual o alimento será submetido, na seleção de ingredientes usados no desenvolvimento de um produto e seleção da melhor embalagem para o produto (RAHMAN, 2007).

Na pós-colheita e armazenamento de grãos e sementes, a medida da a_w durante o armazenamento também é muito importante, já que o teor de água não deve ser muito baixo para que não percam a viabilidade e não deve ser muito alto para evitar a deterioração. Os valores ideais de a_w para a estocagem variam de acordo com o tipo de semente, já que cada material tem uma composição química diferente (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 2007).

3.5 Isotermas de adsorção-dessorção de água

O estudo das mudanças na atividade de água em diferentes condições de processamento ou armazenamento pode ser feito por meio das isotermas de sorção. Uma isoterma de sorção é uma curva que descreve a relação de equilíbrio entre o teor total de água de um determinado produto e a pressão de vapor ou umidade relativa à uma dada temperatura constante.

A composição química do produto influencia diretamente o processo de sorção de vapor de água. Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), grãos com elevado teor de óleo adsorvem menor quantidade de água do ambiente do que os grãos com alto teor de amido. Além disso, a variedade, grau de maturidade e as condições físicas e sanitárias, bem como a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (adsorção ou dessorção), também é determinante para estabelecimento do teor de água de equilíbrio de produtos higroscópicos (CHEN, 2000; FAN; SIEBENMORGEN; MARKS, 2000).

Portanto, como cada alimento apresenta características distintas de sorção de vapor de água, faz-se necessária a determinação experimental das curvas de sorção para cada tipo de produto (BRUNAUER; EMMET; TELLER, 1938).

Isotermas de sorção, ou curvas de equilíbrio higroscópico, são importantes na análise e controle de vários processos na indústria de alimentos. Dentre elas, encontram-se a otimização de processos de secagem, seleção de material de embalagem, previsão de estabilidade do alimento, prazo de validade e determinação das eventuais mudanças de umidade que podem ocorrer durante o armazenamento (GICHAU; OKOTH; MAKOKHA, 2020).

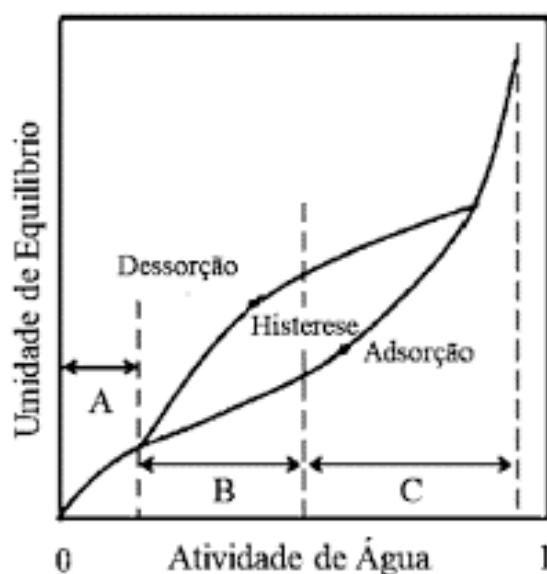
A isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: adsorção e dessorção. A primeira é obtida quando um material mais seco é colocado em um ambiente com umidade relativa mais altas. O ganho de massa, devido ao ganho de água, é medido após atingir o equilíbrio. A segunda é obtida colocando-se um material inicialmente úmido sob umidades relativas decrescentes, e, nesse caso, medindo-se a perda de massa após o equilíbrio (LABUZA, 1968).

A isoterma de dessorção possui valores de teor de água de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção a uma dada atividade de água. A defasagem entre estas duas curvas pode ser vista na Figura 4, e é denominada

de histerese. Ela pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase (RAHMAN, 1995).

A Figura 4 apresenta uma isoterma de adsorção/dessorção genérica, na qual podem ser observadas três regiões bem diferenciadas: região A, que corresponde à adsorção da camada monomolecular (ou monocamada) de água; região B, onde tem-se a adsorção em múltiplas camadas, e a região C que corresponde à condensação da água nos poros do alimento seguida pela dissolução do material solúvel presente.

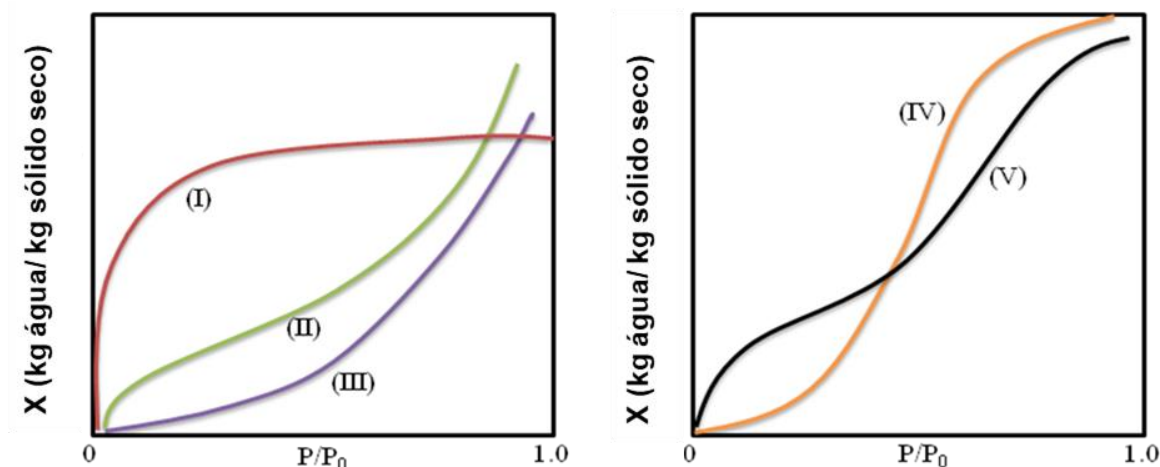
Figura 4 – Isotherma genérica de adsorção/dessorção.



Fonte: LABUZA, 1970.

As isotermas de sorção apresentam cinco diferentes formas (Figura 5). Brunauer *et al.* (1940) classificaram as isotermas de sorção nos alimentos pela capacidade que os poros têm de adsorver gases por meio de forças como a de Van Der Waals.

Figura 5 – Cinco tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals.



Fonte: BRUNAUER *et al.*, 1940.

As isotermas de sorção do tipo I e do tipo II são chamadas isotermas de Langmuir e sigmoidal ou de estrutura em S, respectivamente. Em geral as isotermas de sorção de alimentos não apresentam relação linear entre a umidade de equilíbrio e a atividade de água, ou seja, são curvas não lineares com formato geralmente sigmoidal (tipo II) (RAHMAN, 1995). As isotermas do tipo II são isotermas de adsorção de multicamadas, causada pelos efeitos combinados de capilares coligativos e interações superfície-água. Contudo as isotermas de sorção do tipo III são características de alimentos que apresentam componentes cristalinos, como açúcar e sal, em sua composição. O tipo IV representa isotermas de adsorção de um sólido hidrofílico dilatável para obter a máxima hidratação. Por fim, o tipo V representa isoterma de adsorção de vapor de água no carvão vegetal, e está relacionada aos tipos II e III (ERBAS *et al.*, 2016). Nenhum nome específico foi dado para os demais tipos de isotermas de sorção. Os tipos II e III têm uma estreita relação com os tipos IV e V, com a exceção que a máxima adsorção ocorre em pressões abaixo da pressão de vapor de água do meio

As isotermas de sorção podem ser obtidas experimentalmente por meio dos métodos gravimétrico ou higrométrico. O método higrométrico consiste em manter o teor de água do alimento constante até que o ar circulante atinja o valor de equilíbrio constante, sendo a aferição da atividade de água realizada por higrômetro. Por outro lado, no método gravimétrico, a temperatura do ar e a

umidade relativa são mantidos constantes até que o teor de água do alimento atinja valor constante, ou seja, o equilíbrio. Nesse momento, o ar pode estar circulando (método dinâmico) ou estagnado (estático), sendo o método dinâmico o de maior rapidez para atingir o equilíbrio (COSTA; RESENDE; OLIVEIRA, 2015; SOUSA; RESENDE; COSTA, 2013).

Existem vários modelos na literatura capazes de prever o comportamento de sorção de diversos produtos. As equações de Halsey e Oswin são utilizadas para analisar isotermas de sorção de vários alimentos, sendo que o modelo de Halsey mostra um bom ajuste para produtos ricos em amido, tais como milho, batata e trigo na faixa de atividade de água de 0,10 a 0,80 (OKOS; NARSIMHAN; SINGH, 1992).

O modelo de Henderson é um dos mais empregados e descreve bem o comportamento de alimentos com uma ampla faixa de atividade de água (0,10 a 0,75) como grãos, cereais e frutas. A equação de Brunauer-Emmett-Teller (BET) é amplamente usada para fornecer uma estimativa do teor de água na monocamada adsorvida na superfície do alimento. Entretanto, essa equação apresenta um ajuste satisfatório para atividade de água entre 0,05 e 0,45 (CHHINNAN; BEUCHAT, 1985).

Já o modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até atividade de água de 0,9 (VAN DER BERG, 1984). Como vantagens sobre os demais modelos, o modelo de GAB fornece informações sobre as interações entre as moléculas de água e a matriz dos alimentos, bem como o teor de água da monocamada (AYKIN-DINÇER; ERBAS, 2018).

Esses modelos matemáticos têm sido propostos para contribuir na predição do teor de água de equilíbrio de um material a uma dada atividade de água, ou vice-versa, em uma temperatura fixada. Deste modo, eles proporcionam melhores condições para avaliações sobre armazenamento dos produtos, *shelf life* e otimização de processos de secagem. Além disso, os modelos matemáticos atuam como ferramentas para determinação de parâmetros termodinâmicos, os quais contribuem para o melhor entendimento das alterações físico-químicas que ocorrem em produtos desidratados (ERBAS *et al.*, 2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

As etapas de caracterização inicial do trigo, processo de malteação do trigo, cinética de secagem e isotermas de sorção foram realizadas no Laboratório de Medidas Físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA), no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (Ibilce), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) e no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde – Goiás.

4.1 Caracterização inicial do trigo

Inicialmente, o trigo foi submetido a avaliação da composição físico-química e propriedades físicas para caracterização de sua condição inicial. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

A composição físico-química do grão de trigo, inicial e nas etapas posteriores do experimento, foram determinadas conforme a *Association Of Official Analytical Chemists* (AOAC, 2016). Foram determinados os teores de cinzas, umidade, proteína bruta e lipídios. A atividade de água foi determinada diretamente em medidor eletrônico da marca Decagon, modelo Aqualab, à temperatura constante ($25,0 \pm 0,50$ °C).

A medida da massa específica aparente (ρ_a , kg.m⁻³) foi determinada utilizando um recipiente cilíndrico de inox de 1 litro e uma balança semi-analítica. Para garantir que os grãos se acomodassem naturalmente no cilindro e que ocorresse homogeneidade entre as repetições, utilizou-se um funil, cuja descarga foi posicionada no centro do recipiente. Após iniciar o processo de enchimento do funil, os grãos preenchem o cilindro até transbordar, sendo o excedente retirado, nivelando-se o produto com a borda com uma régua. A massa de grãos contida no recipiente foi pesada em balança semi-analítica com resolução de 0,001 g (BOTELHO *et al.*, 2018).

As medidas do comprimento (x), largura (y) e espessura (z) dos grãos foram realizadas com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,05 mm. A massa de 1000 grãos (M_{1000}) foi determinada selecionando aleatoriamente 100

grãos da amostra, pesando em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g e multiplicando por 10 para obter o peso de 1000 grãos.

4.2 Processo de malteação do trigo

O processo de malteação consiste em três etapas principais: maceração, germinação e secagem.

4.2.1 Maceração

Na etapa de maceração (ou hidratação), amostras de 150 g de trigo foram colocadas em cestas de peneiras granulométricas de inox (16 mesh). As cestas foram imersas em água destilada a 20 ± 2 °C, contida em um banho ultratermostatizado com capacidade de 20L.

As amostras de grão de trigo foram retiradas em tempos de imersão (horas) pré-determinados: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 24 e 25. O excesso de água foi removido com papel toalha para determinação da umidade. O procedimento foi realizado até o grão de trigo alcançar valores de umidade entre 0,72 a 0,82 g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹. O processo de maceração foi realizado em quintuplicada. A umidade para cada tempo de hidratação ($X(t)$) foi calculada por um balanço de massa (Equação (6)).

$$X(t) = \frac{(m(t) - m_0)(X_0 + 1)}{m_0} + X_0 \quad (3)$$

em que m_0 é a massa da amostra no início da maceração, em g, $m(t)$ é a massa da amostra após o tempo t de maceração, em g, X_0 é o teor de água da amostra no início da maceração, em g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹ e $X(t)$ é o teor de água da amostra após o tempo t de maceração, em g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹.

A modelagem matemática do processo de maceração foi realizada através do ajuste de modelos empíricos amplamente empregados na literatura aos dados médio experimentais. Para isso, regressões não lineares foram

conduzidas por meio do software OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

Dentre os modelos utilizados para estimar o comportamento cinético do processo de hidratação, encontra-se o modelo empírico proposto por Peleg (1988) (Equação (7)):

$$X(t) = X_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (4)$$

onde $X(t)$ é o teor de água no instante t , em $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$; X_0 é o teor de água inicial (b.s.); t é o tempo de hidratação, em horas; k_1 é a taxa constante do modelo de Peleg em $\text{h} \cdot \text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{bs}}^{-1}$ e k_2 é a constante de capacidade do modelo de Peleg em $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$.

Na Equação (4), o sinal “ $\pm$ ” é substituído por “+” quando o processo analisado é de hidratação, como por exemplo o processo de maceração o qual ocorre a hidratação do grão de trigo. Por outro lado, o sinal “-” é empregado para processos de desidratação. O modelo de Peleg permite determinar a taxa inicial de ganho de umidade, ou seja, $R_0 (t = 0)$, que dado por:

$$\left. \frac{dX(t)}{dt} \right|_{t=0} = R_0 = \frac{1}{k_1} \quad (5)$$

A umidade de equilíbrio, por sua vez, pode ser estimada empregando uma das constantes empíricas do modelo de Peleg, quando aplicado longos tempos de processo ($t \rightarrow \infty$), resultando na Equação 6:

$$X_{eq} = X_0 + \frac{1}{k_2} \quad (6)$$

onde X_{eq} é o teor de água de equilíbrio, dado em $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$.

O modelo exponencial do tipo Weibull foi também empregado para avaliar o processo de cinética de hidratação dos grãos de trigo. Este modelo é constituído de dois parâmetros como descrito na Equação (7):

$$\frac{X(t) - X_0}{X_{eq} - X_0} = \theta(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (7)$$

onde $\theta(t)$ é o adimensional de umidade; α é o parâmetro de forma (adimensional); β é o parâmetro de escala (horas).

O parâmetro de forma, também denominado como índice de comportamento (α), indica a velocidade com que a umidade se aproxima da umidade de equilíbrio. Quanto menor os valores deste parâmetro, maior será a taxa inicial de hidratação (CUNHA *et al.*, 2001; SCHMIDT; CARCIOFI; LAURINDO, 2009).

A literatura relata também o modelo de Page como sendo outro modelo empírico empregado para descrever processos de hidratação de grãos (Equação (8)) (KASHANINEJAD *et al.*, 2007; SILVA; JORGE; JORGE, 2019). Kashaninejad, Dehgha e Kashiri (2009) utilizaram o modelo de Page para descrever a hidratação de grãos de trigo nas temperaturas de 25, 35, 45, 55 e 65 °C. Silva, Jorge e Jorge (2019) utilizaram o modelo de Page para descrever o processo de hidratação de grãos de sorgo em diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 60 °C) e obtiveram ajustes satisfatórios.

$$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \theta(t) = \exp \left[-k_p t^N \right] \quad (8)$$

onde k_p é a constante de hidratação (h^{-1}); t tempo (h); N é o parâmetro de hidratação (adimensional).

4.2.2 Germinação

A germinação foi realizada em câmaras de germinação tipo B.O.D. com temperatura controlada de aproximadamente $16 \pm 1^\circ\text{C}$. Para isso, os grãos foram distribuídos em rolos de papel toalha, embebidos com volume de água equivalente a 2,5 vezes o peso da massa do substrato. Os grãos permaneceram por 5 dias na câmara de germinação para, posteriormente, seguir para a etapa de secagem. Após a germinação dos grãos foi obtido o malte verde de trigo. A umidade do produto foi controlada por pesagens periódicas em balança eletrônica, mantendo-se valores de umidade entre 0,72 e 0,82 $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$, com a reposição de água a cada 24 h.

Durante a germinação foi realizada a análise de poder germinativo (*PG*), por meio do percentual de germinação (*%GER*) e tempo médio de germinação (*TMG*) seguindo as descrições das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Na determinação do poder germinativo, 25 grãos de trigos foram acondicionados em um recipiente de acrílico, denominados *Gerbox*. A metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009) informa que um total 400 grãos devem ser analisados, portanto foram utilizados 16 *Gerbox* contendo 25 grãos de trigo cada. O processo foi conduzido em quintuplicada. A análise do percentual de germinação *%GER* (Equação (9)) foi realizada no quarto e oitavo dia após a semeadura, de acordo com metodologia descrita acima, considerando as radículas com desenvolvimento normal.

$$\%GER = \frac{n}{N} \times 100 \quad (9)$$

em que *n* é o número de sementes germinadas e *N* é o número de sementes utilizadas no teste.

Para calcular o tempo médio de germinação (*TMG*), as amostras foram contadas todos os dias durante 8 dias. Assim, o *TMG* foi dado por:

$$TMG = \frac{\sum n_i t_i}{\sum n_i} \quad (10)$$

onde n_i é o número de sementes germinadas por dia e t_i é o tempo decorrido; $i = 1$ a 8 dias (CARVALHO; CARVALHO, 2009; GUIMARÃES *et al.*, 2020).

4.2.3 Secagem

Após obtido o malte verde, seguiu-se para a etapa de secagem. A secagem foi realizada em estufa com circulação de ar, em torno das temperaturas normalmente utilizadas para secar malte (BIAZUS *et al.*, 2006; CARVALHO, 2015; MONTANUCI, 2014). Dessa forma, foram empregadas as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Durante cada secagem, foram realizadas pesagens periódicas das amostras até que estas atingissem um teor de água de aproximadamente 0,06–0,08 g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹.

Após a secagem, todas as amostras foram mantidas na estufa à temperatura ambiente para alcançarem o equilíbrio térmico.

A partir dos dados obtidos do teor de água ao longo da operação de secagem, foram construídas as curvas de razão de teor de água (RX) (Equação (11)) em função do tempo de secagem.

$$RX = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (11)$$

em que $X(t)$ é teor de água no tempo t (b.s.); X_0 é teor de água inicial (b.s.); X_{eq} é teor de água de equilíbrio (b.s.).

Para o ajuste das curvas de cinética de secagem de malte, foram ajustados modelos matemáticos que são frequentemente utilizados na literatura para descrever a secagem de diferentes produtos agrícolas, apresentados na Tabela 2 (ANDRADE *et al.*, 2006; MARTINAZZO *et al.*, 2007; GONELI *et al.*, 2009; RESENDE *et al.*, 2009; CORRÊA *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2011).

Tabela 2 – Modelos matemáticos para descrever as isotermas de secagem

MODELO	EQUAÇÃO	
HENDERSON-PABIS (HENDERSON E PABIS, 1961)	$RX = a \exp(-kt)$	(12)
PAGE (PAGE, 1949)	$RX = \exp(-kt^n)$	(13)
LEWIS (LEWIS, 1921)	$RX = \exp(-kt)$	(14)
LOGARÍTMICO (YAGCIOGLU <i>et al.</i> , 1999)	$RX = -a \exp(-kt) + b$	(15)
MIDILLI (MIDILLI, 2002)	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	(16)
DOIS TERMOS (HENDERSON, 1974)	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(17)
VERMA (VERMA <i>et al.</i> , 1985)	$RX = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	(18)
APROXIMAÇÃO DA DIFUSÃO (MENGES E ERTEKIN, 2006)	$RX = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(19)
WANG E SING (WANG E SING, 1978)	$RX = 1 + at + bt^2$	(20)

em que: h , k , k_0 , k_1 = constante de secagem, (h^{-1}); a , b , n = parâmetros dos modelos (adimensionais); t = tempo, em (h).

As Equações de (12) a (20) foram ajustadas aos resultados experimentais por meio de uma regressão não linear usando o software OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

A eficiência de ajuste foi avaliada com base no coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2), erro médio relativo ($P\%$) (Equação (21)) (LOMAURO *et al.*, 1985) e raiz quadrática do médio do erro ($RQME$) (Equação (22)) (SORMOLI; LANGRISH, 2015).

$$P\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_e - V_p|}{V_e} \quad (21)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_e - V_p)^2} \quad (22)$$

onde, N é número de dados observados; V_e são os valores experimentais; V_p são os valores preditos pelo modelo e e_i é o número e dados experimentais.

O coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) foi calculado ajustando-se o modelo matemático baseado na teoria da difusão líquida aos dados experimentais observados da secagem do malte de trigo. Essa equação é a solução analítica da segunda lei de Fick (Equação 23), considerando-se a forma geométrica do produto esférica com aproximação de dez termos ($n=10$) e desconsiderando a contração volumétrica dos grãos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

$$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2 D_{ef} t}{r_e^2} \right] \quad (23)$$

em que, D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo ($m^2 \cdot s^{-1}$); λ_n são as raízes da equação de Bessel de ordem zero; n é o número de termos; t é o tempo de secagem (s); e r_e é o raio de esfera equivalente (m).

O raio equivalente é definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao do grão. O volume (V_g) de cada grão foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em 20 grãos, antes da secagem, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (24)$$

em que, V_g : volume do grão (m^3); a : maior eixo do grão (m); b : eixo médio do grão (m) e c : menor eixo do grão (m).

Conhecendo as dimensões características dos grãos de trigo, o raio de esfera equivalente foi calculado pela seguinte expressão:

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{abc}{8}} \quad (25)$$

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma (Equação 26):

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (26)$$

em que, D_0 : fator pré exponencial ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_a : energia de ativação ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); R : constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_a : temperatura absoluta (K).

4.3 Análise de sorção de vapor de água

4.3.1 Isotermas de sorção

Foram determinadas as isotermas de sorção para o malte verde de trigo simulando condições de secagem (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e para o malte de trigo acabado simulando condições de armazenamento (10, 20, 30 e 40 °C).

As isotermas de sorção foram determinadas pelo método estático gravimétrico (JOWITT *et al.*, 1983), em triplicata. Soluções saturadas de sais de LiBr, LiCl, LiI, MgCl_2 , NaI, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaBr, KI, NaNO_3 , NaCl, KBr, Kr, KCl, KNO_3 , e K_2SO_4 foram usadas para atingir uma faixa de umidade relativa entre 0,058 e 0,982 (LABUZA, 1963). Aproximadamente 3 g de malte foram acondicionados em recipientes com cada solução salina saturada e, então, mantidos em uma câmara tipo BOD (MA415, Marconi, Piracicaba, Brasil) nas temperaturas simulando condições de secagem (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e nas temperaturas usuais de armazenamento estudadas (10, 20, 30 e 40 °C). As amostras foram pesadas semanalmente até massa constante (variação <5%), a qual ocorreu entre 3-4 semanas. Nesse momento, foi determinado o teor de água de equilíbrio (base seca).

4.3.2 Modelagem matemática das isotermas de sorção

Dados do teor de água de equilíbrio (X_{eq} , $g_{\text{água}} \cdot g_{\text{matéria seca}}^{-1}$) foram plotados em relação à atividade da água ($a_w = \text{umidade relativa}/100$) e os modelos matemáticos de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), Oswin, Oswin modificado, Henderson, Henderson modificado e Halsey foram ajustados aos dados experimentais. A Tabela 3 apresenta as Equações correspondentes (27) a (32) que foram usadas para ajustar os resultados experimentais.

Tabela 3 – Modelos utilizados para o ajuste dos dados das isotermas de sorção do malte verde de trigo e do malte de trigo

Modelo	Equação
GAB (CHIRIFE; IGLESIAS, 1978)	$X_{eq} = \frac{CkX_m a_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (27)$
Oswin (OSWIN, 1946)	$X_{eq} = A \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B \quad (28)$
Oswin Modificado (CHEN; MOREY, 1989)	$X_{eq} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1 + d_2 T}{a_w} \right)^{d_3}} \quad (29)$
Henderson (BOQUET; CHIRIFE; IGLESIAS, 1978)	$X_{eq} = \left(-\frac{1}{H_1} \ln(1 - a_w) \right)^{\frac{1}{H_2}} \quad (30)$
Henderson Modificado (THOMPSON, 1972)	$X_{eq} = 1 - \exp(-h_1(T + h_2)a_w^{h_3}) \quad (31)$
Halsey (HALSEY, 1948)	$X_{eq} = \left(-z_1 \ln(a_w) \right)^{\frac{1}{z_2}} \quad (32)$

$A, B, C, H_1, H_2, k, d_1, d_2, d_3, h_1, z_1, z_2, h_2$ e h_3 são constantes dos modelos (adimensional), a_w é a atividade de água (umidade relativa de soluções salinas, decimal), X_{eq} é o teor de água de equilíbrio (base seca) e X_m é o teor de água da monocamada (base seca).

As Equações de (27) a (32) foram ajustadas aos resultados experimentais por meio de uma regressão não linear usando o software OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

Os parâmetros estatísticos utilizados como critério de seleção do melhor modelo foram: coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2), erro médio relativo ($P\%$) (Equação (21)) (LOMAURO *et al.*, 1985) e raiz quadrática do médio do erro ($RQME$) (Equação (22)) (SORMOLI; LANGRISH, 2015).

Além disso, para selecionar um modelo único para descrever o processo adsorção do malte de trigo sob cada condição, os modelos que obtiveram os melhores ajustes e erro médio relativo ($P\%$) $< 10\%$ foram submetidos ao critério de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1974) e o critério de informação bayesiano de Schwarz (BIC) (SCHWARZ, 1978), dados respectivamente, pelas Equações (33) e (34). Esta análise foi realizada usando o software de domínio público R v. 3.6.0. Valores mais baixos de AIC e BIC indicam melhor ajuste do modelo, e o BIC é o critério mais rigoroso (WOLFINGER, 1993).

$$AIC = -2 \log like + 2p \quad (33)$$

$$BIC = -2 \log like + p \ln(n) \quad (34)$$

onde, $\log like$ é o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando os parâmetros dos modelos estimados, p é o número de parâmetros do modelo e n é o número de pontos experimentais de observação.

O melhor modelo resultante foi escolhido para calcular as propriedades termodinâmicas.

4.4 Propriedades termodinâmicas

O calor isostérico líquido de sorção ou entalpia de sorção (q_{st}) representa a energia necessária para adsorver moléculas de água no local ativo da matriz alimentar. Pode ser determinado a partir da inclinação da equação de Clausius-Clapeyron (Equação (35)).

$$\left. \frac{d(\ln a_w)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \right|_{X_{eq}} = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (35)$$

em que, Q_{st} é o calor integral de sorção ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), λ é o calor latente de vaporização ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) e R é a constante universal de gás ($8,314 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Para este cálculo assume-se que o calor isostérico líquido de sorção seja invariante com a temperatura. Obtém-se o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) por meio do coeficiente angular da reta $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura ($1/T$) em um teor de água de equilíbrio constante (Equação (35)).

Parâmetros termodinâmicos como entalpia e entropia de sorção são necessários para medir o trabalho útil e para uma melhor compreensão das interações água-alimento (VIGANÓ; GABAS; TELIS-ROMERO, 2014). Valores da entalpia (ΔH , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) e entropia (ΔS , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) podem ser determinados a partir da Equação (36):

$$\ln(a_w) = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (36)$$

Desta forma, a entalpia de sorção e entropia foram obtidas a partir da Equação (36) pelo mesmo procedimento adotado para o cálculo do calor isostérico de sorção, em que a inclinação corresponderá a ($\Delta H/R$) e o coeficiente linear ($-\Delta S/R$).

A energia livre de Gibbs (ΔG , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) foi calculada pela Equação (37) (RIZVI, 2005):

$$\Delta G = RT \ln(a_w) \quad (37)$$

Ao correlacionar as Equação (36) e (37), espera-se confirmar a teoria da compensação através de uma tendência linear entre a entalpia e entropia, conforme a Equação (38) (VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ *et al.*, 2015):

$$\Delta H = T_B (\Delta S) + \Delta G_B \quad (38)$$

em que T_B é a temperatura isocinética (K), representa a temperatura em que todas as reações da série procedem a uma mesma taxa.

Um intervalo de confiança $(1-\alpha) \times 100\%$, com $\alpha = 5\%$, para a temperatura isocinética foi calculado pela Equação (39) para avaliar a diferença significativa da temperatura média harmônica:

$$T_B = T_B \pm t_{m-2, \alpha/2} \sqrt{\text{Var}(T_B)} \quad (39)$$

No qual,

$$T_B = \frac{\sum (\Delta H - \overline{\Delta H})(\Delta S - \overline{\Delta S})}{\sum (\Delta S - \overline{\Delta S})^2} \quad (40)$$

$$\text{Var}(T_B) = \frac{\sum (\Delta H - \overline{\Delta G}_B - T_B \Delta S)^2}{(m-2) \sum (\Delta S - \overline{\Delta S})^2} \quad (41)$$

em que, m é o número de pares de dados $(\Delta H, \Delta S)$, $\overline{\Delta H}$ é a entalpia média ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\overline{\Delta S}$ é a entropia média ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e $\overline{\Delta G}$ é a energia livre de Gibbs obtida pela Equação (37).

Para validar a teoria da compensação, a temperatura média harmônica (T_{hm}), obtida pela Equação (42), deve ser significativamente diferente da T_B (POLACHINI *et al.*, 2016):

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_a} \right)} \quad (42)$$

onde n é o total de números de temperaturas estudadas e T_a é a temperatura absoluta (K).

4.5 Análise estatística

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. A elaboração dos gráficos foi realizada por meio do software OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) ao nível de confiança de 95%, utilizando o software Minitab 17.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização inicial do trigo

Na caracterização da composição química do trigo, foram encontrados $62,65 \pm 0,55\%$ de carboidratos; $12,66 \pm 0,22\%$ de umidade (b.u.); $12,56 \pm 0,04\%$ de proteínas; $10,31 \pm 0,43\%$ de lipídios e $1,82 \pm 0,07\%$ de cinzas. Outros estudos na literatura também reportaram composições químicas similares do trigo quando comparados ao presente estudo (STARZYŃSKA-JANISZEWSKA *et al.*, 2019; CORRÊA *et al.*, 2006; BONAFACCIA *et al.*, 2000).

A massa específica aparente, ou peso hectolitro, é uma propriedade física que apresenta relevante importância comercial, ela está relacionada com os preços praticados durante o comércio do produto, uma vez que está ligada com questões de qualidade e rendimento do produto (CORRÊA *et al.*, 2006).

A massa específica aparente é a principal medida que influencia no preço, pois todas as análises, como umidade, uniformidade, forma, tamanho dos grãos, densidade, matérias estranhas e impurezas e grãos avariados, são levadas em consideração nesta avaliação (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Essa medida serve como indicativo da sanidade do grão e por isso é um atributo indireto da qualidade dos grãos de trigo e está relacionada à moagem do cereal. O ataque de pragas e doenças, especialmente na parte aérea e após a formação dos grãos de trigo, diminui a massa específica aparente, pois afeta diretamente os grãos, o que reduz seu peso.

A massa específica aparente (ρ_a , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) de grãos de trigo no teor de água de 12,66% (b.u) foi determinada, obtendo o valor de $763,98 \pm 1,67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Guimarães (2019), em seu estudo, determinou a densidade aparente dos grãos de trigo em função do teor de água, cujos resultados variaram de $815,13 \pm 7,80$ até $678,13 \pm 5,93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ na faixa de umidade de 14,40 a 90,90%. Em seu estudo, Corrêa *et al.* (2006), verificaram que a densidade aparente dos grãos de trigo empregando diferentes técnicas de determinação estiveram na faixa de 700 a $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nas umidades entre 0,10 e 0,35 (b.s.).

Outros grãos como café (COUTO *et al.*, 1999) e feijão (RESENDE *et al.*, 2005) também apresentaram valores próximos de densidade aparente aos obtidos para os grãos de trigo no presente estudo. No Brasil, tem-se como

referência o valor de 780 kg.m^{-3} para a massa específica aparente do grão de trigo no teor de água de 13% (b.u.) (CORREIA *et al.*, 2006). Nestas condições, os resultados obtidos para massa específica aparente no presente estudo estão em concordância para um produto com boa qualidade.

As medidas dos grãos de trigo do presente estudo foram realizadas, obtendo os seguintes resultados $5,70 \pm 0,14 \text{ mm}$ para o comprimento, $3,30 \pm 0,11 \text{ mm}$ para a largura e $2,67 \pm 0,06 \text{ mm}$ para a espessura. Ficco *et al.* (2020), ao estudarem os efeitos da desbranagem de grãos em compostos bioativos, capacidade antioxidante e oligoelementos essenciais e tóxicos em trigos *durum* roxo, obtiveram resultados semelhantes para quatro diferentes espécies de trigos (sendo três trigos roxos e um amarelo) quanto suas medidas.

Em seu estudo, Guimarães (2019) determinou as variações nas medidas do grão de trigo em função da umidade apresentando como resultado para o comprimento de $6,46 \pm 0,04$ a $6,55 \pm 0,05 \text{ mm}$, para largura de $3,29 \pm 0,04$ a $3,50 \pm 0,02 \text{ mm}$ e para espessura $2,62 \pm 0,02$ a $2,73 \pm 0,07 \text{ mm}$ na faixa de umidade de 14,4 a 90,90%, estando em concordância com os obtidos.

A massa de mil grãos (M_{1000}) foi determinada para caracterização do trigo, tendo como resultado $36,56 \pm 0,84 \text{ g}$. Os resultados obtidos estão em concordância com os valores relatados por Ficco *et al.* (2020) para duas espécies de trigo e com os reportados por Guimarães (2019).

Tais determinações são de grande importância para as etapas que constituem o processo de malteação. Cada produto agrícola apresenta comportamento diferente durante o processo de hidratação e secagem devido a particularidades apresentadas na composição química e geométrica do produto. Com isso, informações teóricas a respeito desta singularidade são relevantes para auxiliar no desenvolvimento de equipamentos e adaptações daqueles já existentes, visando obter maior rendimento.

5.2 Processo de malteação do trigo

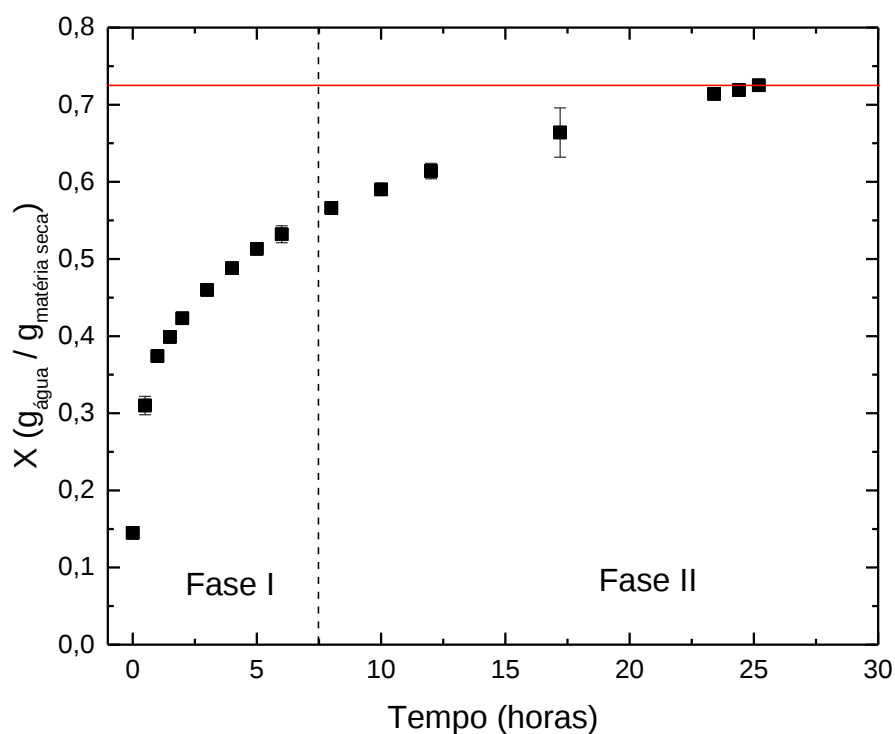
Para melhor entendimento das operações unitárias decorrentes em todas as etapas do processamento do trigo em malte de trigo, foram estudados os parâmetros que compreende a cinética de hidratação, germinação (percentual

germinativo (%GER) e tempo médio de germinação (TMG)) e cinética de secagem.

5.2.1 Processo de hidratação

O processo de maceração do trigo, também conhecido como processo de hidratação, foi conduzido na temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ em um período de 25 horas de processo. A Figura 6 representa o ganho de água dos grãos ao longo tempo no processo de maceração.

Figura 6 – Cinética de maceração do grão de trigo a $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Fonte: AUTORA, 2021.

De acordo com os dados apresentados, foi possível verificar que o processo de hidratação dos grãos apresentou uma alta taxa de absorção inicial, seguido por um percentual mais pausado até estabilização. Outros trabalhos avaliaram o processo de hidratação de diferentes tipos de grãos (feijão, sorgo, aveia, trigo, milho, arroz) em diferentes condições de processos (diferentes

temperaturas, aplicação de ultrassom, alcalinização do meio, operação periódica) os quais reportaram similar comportamento nas curvas de hidratação (RESENDE; CORRÊA, 2007; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; KASHIRI; GARMAKHANY; DEHGHANI, 2012; PINEDA-GÓMEZ; ROSALES-RIVEIRA; RODRÍGUEZ-GARCÍA, 2014; ANTHERO, 2017; CARVALHO, 2018; GUIMARÃES, 2019; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019; SILVA; JORGE; JORGE, 2019; LI *et al.*, 2020).

O comportamento cinético de hidratação dos grãos pode ser dividido em duas fases: Fase I e Fase II, em virtude da característica da curva, conforme indicado com a linha tracejada na Figura 6 (ANTHERO, 2017).

A primeira fase, considerada a fase rápida de ganho de água pode ser caracterizada pelas forças capilares, que segundo Becker (1960) esse fenômeno pode ocorrer em processos de alimentos porosos, como o trigo, arroz, aveia, cevada.

Na Fase I (entre 0 e 7,5 horas) verificou-se que os grãos de trigo absorveram água mais rapidamente, ou seja, ganharam mais água em menos tempo comparativamente com a Fase II. Foi possível observar (Figura 6) que os grãos tiveram um aumento de mais de 10% da umidade inicial, após meia hora de processo.

O processo do ganho de água pelos grãos pode ser explicado por diferentes mecanismos de transferência de massa (MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019; SILVA; JORGE; JORGE, 2019), tais como capilaridade, difusão de líquido e difusão de vapor. Contudo, estudos tem relatado que o fenômeno de difusão de água possui principal contribuição no processo de maceração de grãos (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; OLI; WARD; ADHIKARI; TORLEY, 2014; SILVA; JORGE; JORGE, 2019).

Apesar do mecanismo de difusão de líquido comandar o processo de transferência de massa na hidratação de grãos, a alta absorção de água que ocorre no início do processo também se deve ao efeito de capilaridade. Ela contribui para acelerar a penetração da água e, conseqüente, o ganho de massa (RESENDE; CORRÊA, 2007; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; KASHIRI; GARMAKHANY; DEHGHANI, 2012; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019; SILVA; JORGE; JORGE, 2019).

Na primeira fase, os micros canais dentro do grão permitem uma rápida absorção de água até que atinja a completa saturação da estrutura dos poros (KASHANINEJAD; DEHGHANI, KASHIRI, 2009; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019). A segunda fase, por sua vez, é mais fortemente conduzida pelo processo de difusão. Nesta etapa, as interações que ocorrem são entre a água com o conteúdo amiláceo presente no endosperma do grão (PINEDA-GÓMEZ; ROSALES-RIVERA; RODRÍGUEZ-GARCÍA, 2012). A Fase II é caracterizada pela lenta absorção de água, já que o grão se aproxima do ponto de saturação onde ele atinge o teor de água de equilíbrio (representada esquematicamente pela linha vermelha na Figura 6).

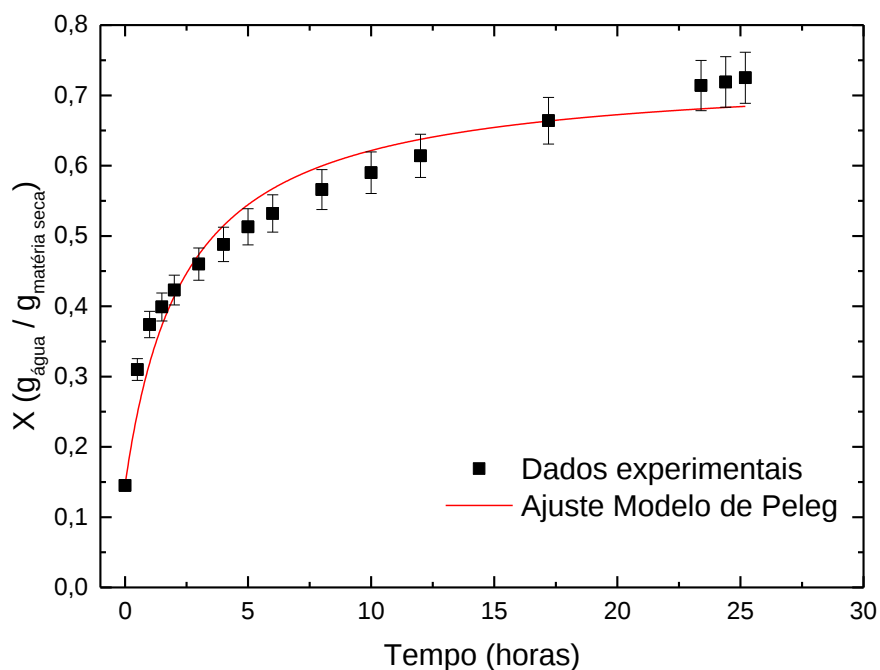
Visto que a estrutura do endosperma é compacta, o processo de hidratação ocorre durante longo período. As curvas de hidratação apresentam-se com concavidades padrões voltadas para baixo. Este comportamento ocorre devido à redução na taxa de hidratação após atingir um valor máximo, onde o ganho de água é praticamente zero, ou seja, quando o grão atinge a umidade de equilíbrio (MIANO; AUGUSTO, 2018). Em outras palavras, a força motriz da transferência de massa no processo de hidratação de grão é o teor de água de equilíbrio e esta força diminui ao passo que o grão se aproxima da mesma.

Após o período de hidratação de 25 horas, foi possível observar que os grânulos apresentaram inchaço, devido ao ganho de volume de água e os mesmos também já apresentavam início do aparecimento de radícula caracterizando início da germinação.

5.2.2 Modelagem matemática da cinética de hidratação

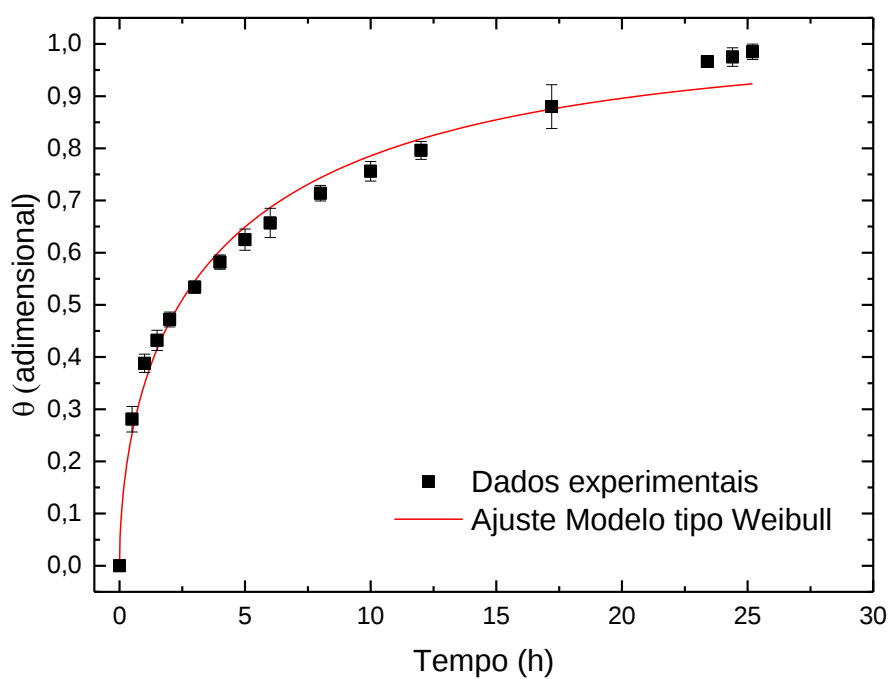
Neste estudo foram escolhidos três modelos empíricos para realizar modelagem matemática dos dados experimentais obtidos no processo de maceração, sendo eles: modelo de Peleg (Equação (4)), modelo tipo Weibull (Equação (7)) e modelo de Page (Equação (8)). As Figuras de 7 a 9 representam os modelos ajustados aos dados experimentais do processo de maceração dos grãos de trigo. A Figura 10 representa a distribuição residual referente ao ajuste dos modelos estudados.

Figura 7 – Modelo de Peleg ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.



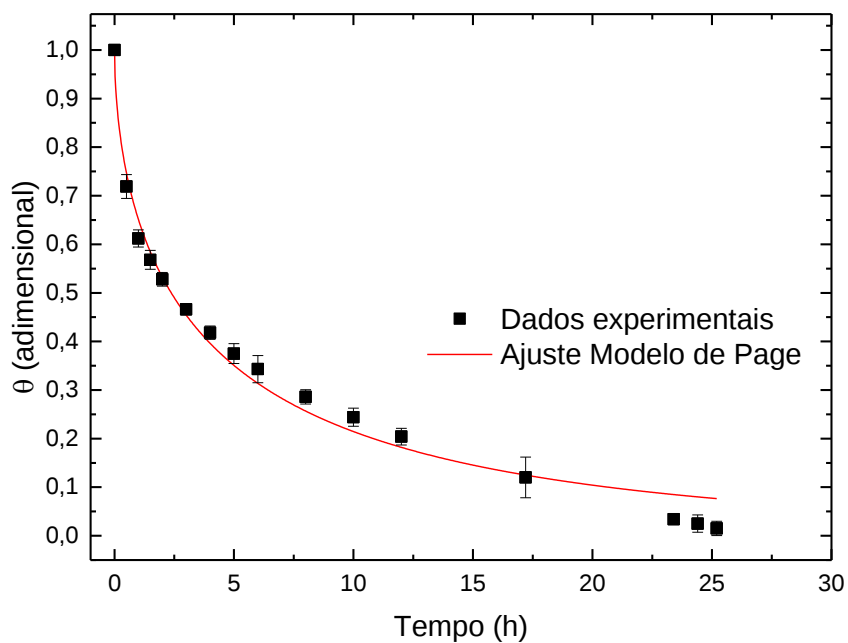
Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 8 – Modelo tipo Weibull ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.



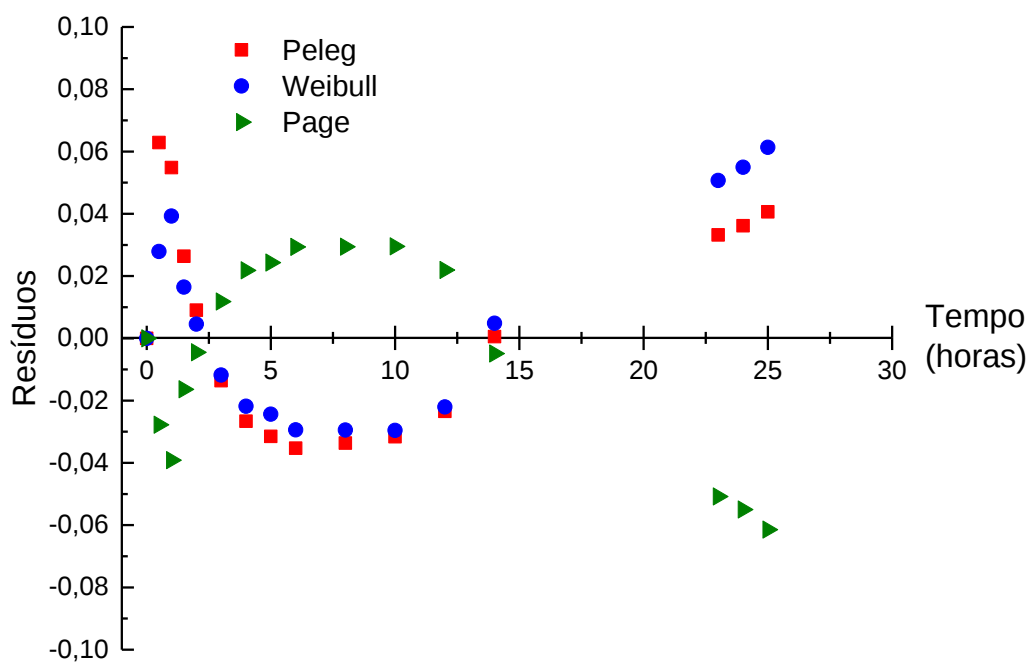
Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 9 – Modelo de Page ajustado aos dados experimentais do processo de maceração do trigo a 20 ± 2 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 10 – Distribuição residual referente à cinética de hidratação de trigo a 20 ± 2 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

Como pode ser visto na Figura 10, a análise gráfica dos resíduos, dá indicação de que os resíduos parecem distribuir-se aleatoriamente em torno de zero. Não se observa nenhum padrão isso indica que a variância constante e relação entre as variáveis é linear, sugerindo boa qualidade de ajuste.

Os resultados decorrentes da modelagem do processo de maceração dos grãos de trigo na temperatura de 20 ± 2 °C estão descritos na Tabela 4. A modelagem matemática é considerada aceitável para descrever o processo quando apresenta valores de P (%) menores que 10% e $RQME$ inferiores a 0,05 (MOHAPATRA; RAO, 2005; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019).

Tabela 4 – Resultados dos ajustes dos modelos aos dados experimentais da cinética de hidratação dos grãos de trigo a 20 ± 2 °C

Constantes	Modelo		
	Peleg	Weibul	Page
k_1	4,049		
k_2	1,693		
α		0,555	
β		4,595	
k_p			0,429
n			0,555
Parâmetros Estatísticos			
R_{Adj^2}	0,9517	0,9845	0,9845
$RQME$	0,0332	0,0319	0,0319
P (%)	5,96	4,23	5,01

Fonte: AUTORA, 2021.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 6 a 8 e na Tabela 4, o modelo de Peleg obteve ligeira menor acuracidade na representação dos dados experimentais frente aos demais modelos estudados. Foram observados os menores parâmetros estatísticos por este modelo ($R_{Adj^2} = 0,9517$; $RQME = 0,0332$ e P (%) = 5,96), corroborando com a distribuição residual descrita na Figura 10.

Apesar de uma ligeira baixa acuracidade do modelo frente aos dados experimentais, o modelo de Peleg permite estimar a taxa inicial de ganho de

água (R_0), calculada a partir da taxa constante (k_1) do modelo de Peleg, conforme apresentada na Equação (4), obtendo o valor de $0,247 \text{ kg}_{\text{matéria seca}} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}_{\text{água}}^{-1}$. Além da taxa inicial de ganho de água, por meio da constante de capacidade (k_2) do modelo de Peleg é possível estimar o teor de água de equilíbrio do grão nas condições em que está sendo submetido.

Neste estudo o teor de água de equilíbrio (X_{eq}) supostamente determinada no final da hidratação foi de $0,7134 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$. Por outro lado, a Equação (6) fornece um valor de X_{eq} de $0,7357 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{matéria seca}}^{-1}$. Ao comparar os resultados do teor de água de equilíbrio, obtidos experimentalmente e predito pelo modelo, constatou uma variação de 3,12% dos dados – indicando baixo erro ao utilizar os dados preditos pelo modelo.

Ao estudar o processo de maceração assistida por ultrassom de grãos de trigo em diferentes temperaturas e potências, Guimarães *et al.* (2020), encontraram valores similares para o modelo de Peleg no processo de hidratação dos grãos na temperatura de 20°C sem aplicação do ultrassom. Pequenas variações são esperadas, uma vez que as constantes do modelo de Peleg podem ser influenciadas pelo tipo de grão e condições de processo (SCHMIDT; CARCIOFI; LAURINDO, 2009; ANTHERO, 2017; CARVALHO *et al.*, 2018; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019; SILVA; JORGE; JORGE, 2019; GUIMARÃES *et al.*, 2020).

Carvalho *et al.* (2018) ao estudar o efeito do ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para produção de malte, encontraram valores de $k_1 = 4,07$, $k_2 = 1,41$, $R_0 = 0,2469$ e $X_{eq} = 0,8098$ na temperatura de 20°C sem aplicação de ultrassom, corroborando com os valores encontrados neste estudo. De acordo com Turhan *et al.* (2002), a constante k_1 do modelo de Peleg está relacionada com a taxa de transferência de massa sendo que, quanto menor os valores de k_1 , maiores serão as taxas iniciais de absorção de água pelo grão.

O modelo tipo Weibull representou satisfatoriamente os dados da cinética de hidratação dos grãos de trigo na temperatura de 20°C , tendo como resultados os parâmetros estatísticos $R_{Adj}^2 = 0,9845$; $RQME = 0,0319$ e $P (\%) = 4,23$ (Tabela 4) e, conseqüente, menores valores residuais (Figura 10).

O parâmetro de forma α (adimensional), é um índice de comportamento associado com taxa inicial de absorção de água (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010), pode ser interpretado também como um índice relacionado com a

transferência de água durante o processo de hidratação e quanto maior o seu valor, mais lento o processo na fase inicial de absorção (CUNHA *et al.*, 1998; MACHADO, OLIVEIRA e CUNHA, 1999). Valores menores que a unidade indicam que o processo é governado pela difusão interna; por outro lado, supõe-se que existe uma combinação da difusão interna e transferência de massa externa que governa o processo quando α assume valores maiores que a unidade (MARABI; SAGUY, 2004; CORZO; BRACHO; ALVAREZ, 2010; GUIMARÃES *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020).

De fato, Patero e Augusto (2015) ressaltam que o processo de hidratação de alimentos é uma reação limitada pela resistência interna à transferência de massa. Visto que as resistências internas não são atribuídas unicamente ao fenômeno de difusão de água, mas também em outros fenômenos como capilaridade, as propriedades físicas do grão também influenciam na sua capacidade de absorção de água.

O parâmetro β , denominado como parâmetro de escala, indica o tempo necessário para que a amostra atinja aproximadamente 63% da sua capacidade máxima de absorção de água (X_{eq}) (CUNNINGHAM *et al.*, 2007). No presente estudo, o valor encontrado de 4,595 horas está de acordo com os valores experimentais. Em geral, os resultados obtidos para os valores de α e β se assemelham aos encontrados na literatura durante a hidratação convencional de grãos de trigo (GUIMARÃES *et al.*, 2020).

O modelo de Page obteve resultados estatísticos similar aos determinados para o modelo tipo Weibull, contudo o mesmo obteve o valor de P (%) maior quando comparado com modelo de Weibull. Neste contexto, supõe-se que o modelo de Weibull descreve melhor o processo de hidratação dos grãos de trigo na temperatura de 20 ± 2 °C.

Outros trabalhos envolvendo diferentes tipos de materiais (trigo, aveia, cevada, peito de frango, fatias de kiwi) também obtiveram satisfatória acuracidade na modelagem dos dados em processos de hidratação o empregar o modelo de Weibull (SCHMIDT; CARCIOFI; LAURINDO, 2009; ANTHERO, 2017; CARVALHO *et al.*, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020).

5.2.3 Germinação

O processo de germinação dos grãos de trigo ocorreu de forma controlada após as amostras atingirem umidade na faixa de 0,72 – 0,82 ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) na etapa de hidratação. O processo de germinação controlada dos grãos de trigo permitirá o desenvolvimento de nutrientes e ingredientes que melhorarão as propriedades funcionais e tecnológicas em produtos alimentícios ou mesmo quando consumidos de forma exclusiva (DING *et al.*, 2018; MARTI *et al.*, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2020).

Os valores determinados de porcentagem de germinação (%GER) e tempo médio de germinação (TMG) estão apresentados na Tabela 5. A Figura 11 mostra a disposição dos grãos de trigo em uma *Gerbox*, utilizada para determinação do poder germinativo.

Figura 11 – Disposição dos grãos de trigo na Gerbox.



Fonte: AUTORA, 2021.

Os resultados para o %GER obtiveram pequenas variações, de $86,25 \pm 7,15\%$ a $91,75 \pm 7,51\%$ para o quarto dia de germinação e $87,75 \pm 6,77\%$ a $92,8 \pm 6,6\%$ no oitavo dia de germinação (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultados do poder germinativo (%GER) e do Tempo médio de germinação (TMG) do grão de trigo (média $\pm$ desvio padrão)

Teste	Poder Germinativo		TMG (dia)
	(%GER) - 4° dia	(%GER) - 8° dia	
1	89,50 $\pm$ 7,57	90,50 $\pm$ 7,29	4,52 $\pm$ 0,036
2	86,25 $\pm$ 7,15	87,75 $\pm$ 6,77	4,53 $\pm$ 0,023
3	90,00 $\pm$ 5,27	90,00 $\pm$ 5,27	4,53 $\pm$ 0,021
4	91,75 $\pm$ 7,51	92,75 $\pm$ 6,57	4,54 $\pm$ 0,032
5	87,25 $\pm$ 8,16	90,75 $\pm$ 7,26	4,63 $\pm$ 0,080

Fonte: AUTORA, 2021.

Carvalho (2018) relatou maior %GER para grãos de cevada quando comparado com o grão de trigo. Anthero (2017), em seu estudo de malte com aveia, relatou %GER maiores que os grãos de trigo para ambas as espécies de aveia estudada. No entanto, Guimarães *et al.* (2020) avaliando o efeito de absorção de água e germinação dos grãos de trigo, obtiveram resultados inferiores aos encontrados neste estudo (valor máximo de %GER ~ 86%), para ambos os tempos de germinação, mesmo com a aplicação de ultrassom de potência em diferentes temperaturas de hidratação.

A Tabela 5, além do %GER também apresentou o tempo médio para a germinação ocorrer (TMG). O tempo médio para a germinação do grão de trigo ocorrer é de aproximadamente cinco dias, sendo este resultado semelhante ao reportado por Guimarães *et al.* (2020) nas diferentes condições de processos. Prolongar a germinação é capaz de produzir malte de boa qualidade como consequência da degradação proteica sobre o crescimento dos grãos (JIN; ZHANG; DU, 2008).

De acordo com a Instrução Normativa N° 36, de 4 de Outubro de 2017 (BRASIL, 2017), dispõe sobre os requisitos para produção de sementes certificadas destinadas à exportação para União Europeia, o poder germinativo mínimo para o grão de trigo é de 85%, sendo assim, os grãos de trigo apresentam poder germinativo condizente ao requerido para o processo de maltagem, atingindo um máximo de 92,75%. Desta forma, todos os grãos que germinaram seguiram para o processo de secagem. Além disso, após a

germinação do grão de trigo, foi estudada as propriedades de sorção e propriedades termodinâmicas do produto obtido (malte verde de trigo).

5.2.3.1 Isoterma de sorção do malte verde de trigo

Os valores obtidos do teor de água de equilíbrio (X_{eq}) e atividade de água (a_w), para temperaturas simulando condições de secagem (40, 50, 60, 70 e 80 °C), variaram de 0,0464 a 0,2047 ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) e 0,052 a 0,823, respectivamente.

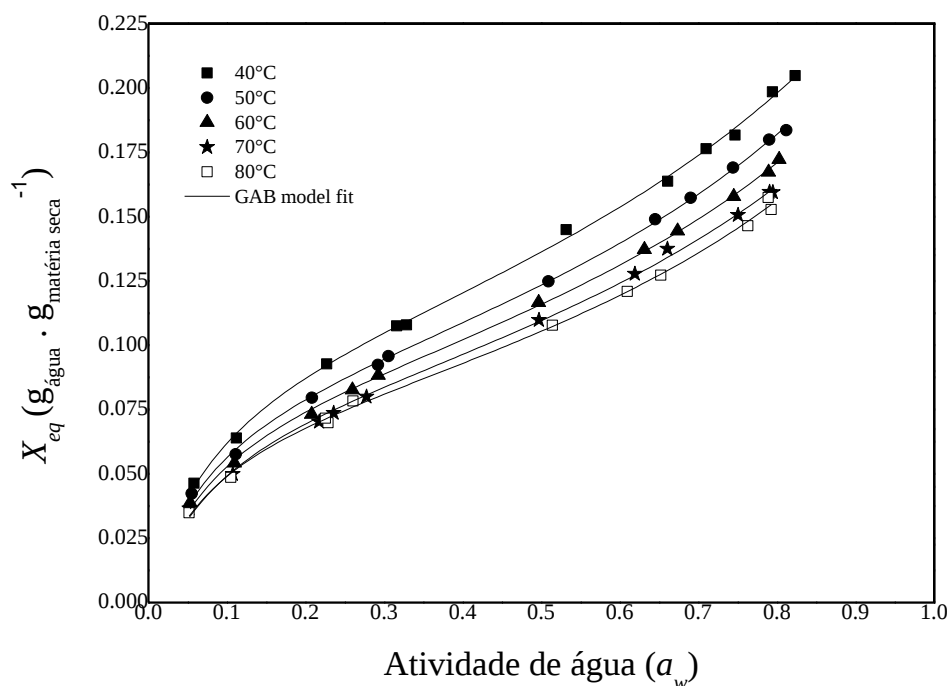
Observa-se que o teor de água de equilíbrio tende a aumentar com o incremento da atividade de água e a diminuição da temperatura. Esse comportamento é similarmente relatado para a maioria dos produtos agrícolas, incluindo trigo (ABEBE; RONDA, 2015; ARSLAN-TONTUL, 2020; AVIARA *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2021).

Palipane e Driscoll (1992) indicaram que o aumento da temperatura acarreta em maiores níveis energéticos das moléculas de água, tornando-as termodinamicamente menos estáveis, facilitando a quebra da ligação entre a água e os locais de sorção, culminando na diminuição do teor de água do produto.

A Figura 12 representa, graficamente, a relação entre a atividade de água e o teor de água de equilíbrio, nas diferentes temperaturas simulando condições de secagem, ajustadas pelo modelo de GAB.

Analisando as isotermas da mesma Figura, pôde-se verificar que todas as isotermas encontradas seguem o comportamento sigmoidal típico de isotermas do tipo II de acordo com a classificação de Brunauer (BRUNAUER *et al.*, 1940). Este tipo de isoterma pode ser classificada em três regiões distintas: a primeira região côncava (a_w entre 0 e 22,68% e X_{eq} de até 9,28 % b.s.) corresponde à umidade da monocamada, fortemente ligada a matriz do produto; a segunda região linearizada (a_w entre 22,68 e 53,17% e X_{eq} entre 9,28 e 14,50%) sugere a presença da água adsorvida e solvente corresponde à água da multicamada; e a terceira região convexa (a_w acima de 60% e X_{eq} acima de 14,3%) representa a água livre disponível para reações químicas (DITCHFIELD, 2000).

Figura 12 – Valores experimentais do teor de água de equilíbrio e isotermas dessorção do malte verde de trigo em diferentes temperaturas simulando condições de secagem ajustado ao modelo de GAB.



Fonte: AUTORA, 2021.

Na Tabela 6, estão apresentados os parâmetros dos modelos ajustados à isoterma de sorção para malte verde de trigo em diferentes temperaturas simulando condições de secagem, assim como, os coeficientes de determinação ajustado (R_{Adj}^2) e desvios médios relativos ($P\%$) e raiz quadrada do erro médio (RQEM).

Segundo Kashaninejad *et al.* (2007) os valores de erro médio relativo ($P\%$) refletem o desvio dos valores observados com relação a curva estimada pelo modelo. Modelos com valores de erro médio relativo acima de 10% não são adequados para a descrição de um determinado fenômeno (MOHAPATRA e RAO, 2005). Verifica-se que, os modelos, em todas as temperaturas, apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10% (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos ajustados à isoterma de sorção para malte verde de trigo em temperaturas de secagem

Modelo	Parâmetros Estimados	Temperatura				
		40 °C	50°C	60°C	70°C	80°C
GAB	X_m	0,1052	0,0933	0,0878	0,0834	0,0785
	C	18,6382	19,0393	18,9354	18,0918	20,1700
	k	0,6203	0,6400	0,6391	0,6391	0,6496
	R_{Adj}^2	0,9985	0,9992	0,9990	0,9980	0,9977
	P (%)	1,3435	1,3239	1,4722	1,9413	1,6795
	$RQEM$	0,00179	0,00125	0,00125	0,00171	0,00174
Oswin	A	0,1029	0,1200	0,1127	0,1063	0,1029
	B	0,3151	0,3135	0,3152	0,3195	0,3151
	R_{Adj}^2	0,99281	0,99261	0,99307	0,99207	0,99281
	P (%)	3,11268	3,92732	3,97105	3,88855	4,16596
	$RQEM$	0,0033	0,0039	0,00354	0,00362	0,0033
Oswin Modificado	d_1	3,3798	2,2874	4,0284	2,5936	4,9667
	d_2	0,0819	0,1135	0,0880	0,1075	0,0851
	d_3	0,6813	0,6767	0,6657	0,6690	0,6486
	R_{Adj}^2	0,9808	0,9812	0,9830	0,9845	0,9781
	P (%)	5,4138	5,6154	5,1374	5,1672	5,2323
	$RQEM$	0,00646	0,00586	0,00523	0,00477	0,00543
Henderson	H_1	70,8406	81,7743	95,1241	102,1249	121,1495
	H_2	2,3335	2,2983	2,3015	2,2736	2,3172
	R_{Adj}^2	0,99852	0,99955	0,99965	0,99954	0,99703
	P (%)	1,47137	0,68354	0,58304	0,62112	1,72463
	$RQEM$	0,00191	0,00096	0,0008	0,00087	0,00212
Halsey	z_1	179,0588	189,1596	204,9210	216,1301	244,0069
	z_2	2,3212	2,2448	2,2163	2,1827	2,2036
	R_{Adj}^2	0,95636	0,96226	0,96317	0,96199	0,96507
	P (%)	9,6802	9,08789	9,11249	8,97523	9,1507
	$RQEM$	0,01033	0,00882	0,00816	0,00792	0,00727

Fonte: AUTORA, 2021.

Observou-se na Tabela 6 que os modelos matemáticos utilizados para descrever a isoterma de sorção para malte verde de trigo apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação ajustado (R_{Adj}^2), superiores a 0,95636, e reduzidos valores dos erros médio relativo ($P\%$) e raiz quadrada do erro médio ($RQEM$) para todas as temperaturas estudadas.

No entanto, utilizando os critérios de seleção já descritos, apesar dos modelos apresentarem bons ajustes, atendendo aos requisitos estatísticos para descrição do fenômeno, os modelos de GAB e o de Henderson se destacam, por apresentarem maiores valores de coeficiente de determinação ajustado ($R_{Adj}^2 > 0,997$) e menores valores de erro médio relativo ($P\% < 1,941$) e raiz quadrada do erro médio ($RQEM < 0,0021$), demonstrando excelente ajuste aos dados experimentais.

Entre os modelos que apresentam melhor ajuste, o modelo de GAB representa adequadamente as isotermas de sorção de diversos produtos amiláceos, como o trigo (TELIS-ROMERO *et al.*, 2007), além de proporcionar parâmetros importantes para entender a forma com a qual a água está ligada no interior do produto, sendo escolhido para representar a isoterma de sorção para malte verde de trigo.

De acordo com Pedro *et al.* (2010) o modelo de GAB apresenta a vantagem de ser um modelo relativamente simples e com parâmetros que têm definição física, além de representar adequadamente os dados experimentais na faixa de atividade de água de maior interesse prático em alimentos (0,10 a 0,90).

Um parâmetro importante descrito no modelo de GAB é o teor de água da monocamada (X_m) que ajuda a definir a estabilidade física e química dos alimentos (SHRESTHA *et al.*, 2006). Observando-se os parâmetros do modelo de GAB (Tabela 5), constatou-se que a umidade na monocamada (X_m) variou em torno de 0,1052 a 0,0785 ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$), indicando que acima desses valores críticos de teor de água, a estabilidade do malte de trigo será menor.

Segundo Blahovec (2004), os parâmetros encontrados, para ambas as condições estudadas, estão de acordo com aqueles estabelecidos para as isotermas do tipo II, as quais devem apresentar valores de k entre 0 e 1 e de C maiores que 2.

5.2.3.2 Propriedades termodinâmicas do malte verde de trigo

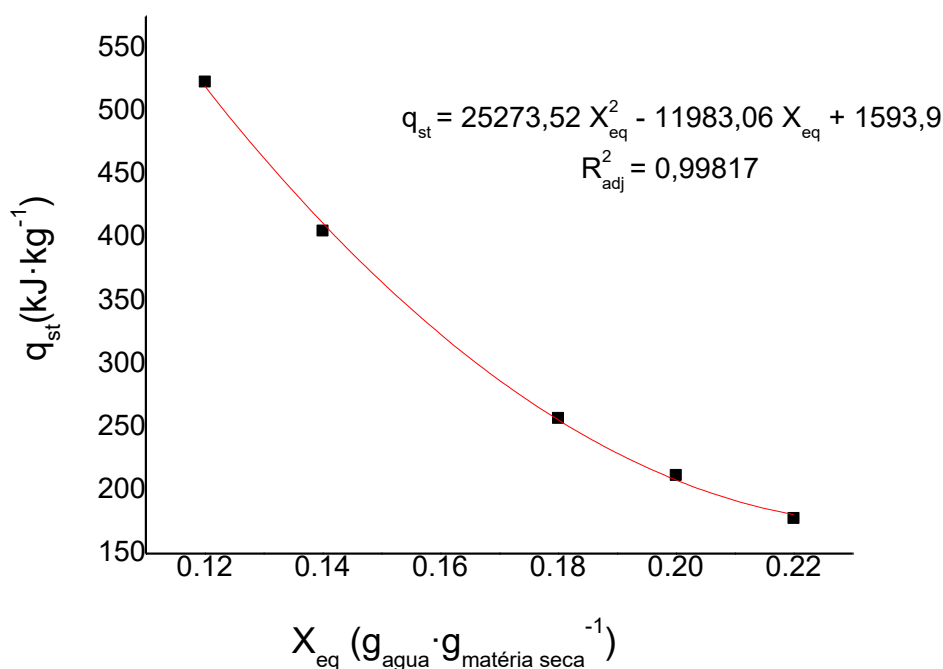
Diante da representação satisfatória das isotermas de sorção do malte verde de trigo, o modelo de GAB foi utilizado para o cálculo dos valores de atividade de água a um teor de água de equilíbrio constante (X_{eq}) variando de 0,12 a 0,22 $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$, necessários para a determinação dos valores do

calor isostérico líquido de sorção, nas diferentes temperaturas simulando condições de secagem.

O calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) foi obtido por meio dos coeficientes angulares de regressões lineares da Equação (35), e expresso em função do teor de água de equilíbrio (Figura 13). A energia necessária para a sorção da água no malte verde de trigo variou de 626,03 a 178,07 kJ·kg⁻¹ no intervalo do teor de água de 0,12 a 0,22 (g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹) e na faixa de temperatura de 40 a 80 °C.

A faixa de variação encontrada neste estudo para o calor líquido de sorção está dentro da obtida por Silva *et al.* (2021) para malte de trigo no intervalo do teor de água de 0,03 a 0,30 (g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹) e na faixa de temperatura de 10 a 40 °C, obteve q_{st} variando de 1071,82 a 36,95 kJ·kg⁻¹. A maior amplitude nos resultados obtidos por Silva *et al.* (2021) pode ser explicada pelo maior intervalo do teor de água e pelas diferentes temperaturas utilizadas.

Figura 13 – Calor isostérico líquido de sorção para malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio para faixa de temperatura de 40 a 80 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

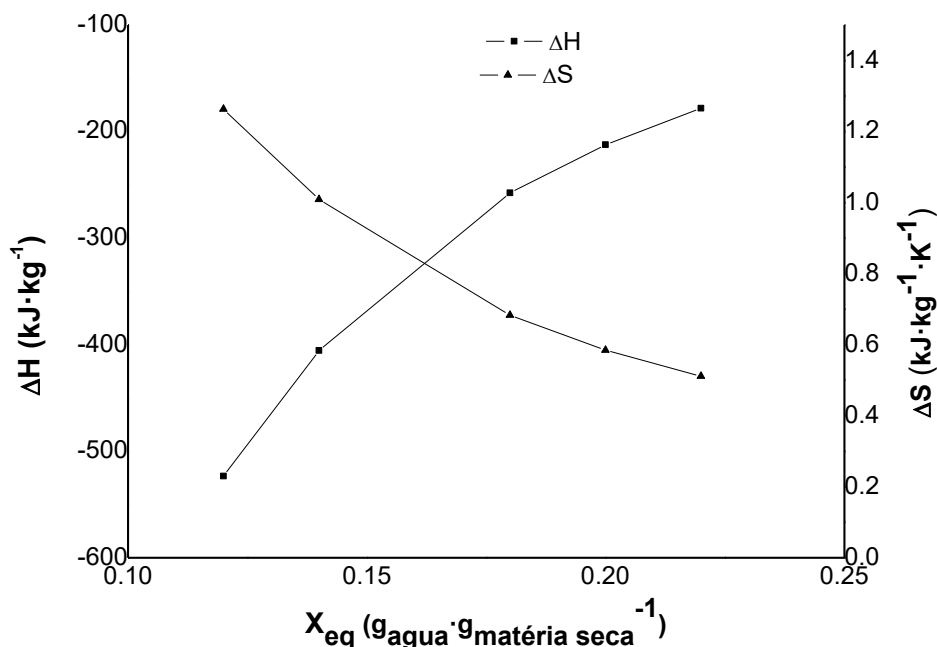
De acordo com a Figura 13, observa-se que, com a redução do teor de água de equilíbrio, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água do malte verde de trigo, representada pelos valores do calor isostérico líquido de sorção, conforme observado para diversos produtos agrícolas como malte de trigo (SILVA *et al.*, 2021), trigo (CORRÊA *et al.*, 2005), arroz em casca (RESENDE *et al.*, 2006b), grão de arroz (TOGRUL; ARSLAN, 2006), cultivares de arroz vermelho (ASCHERI; BASTOS, 2015), feijão (RESENDE *et al.*, 2006a), amido de batata (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2004).

De acordo com Al-Muhtaseb, Mcminn e Magee (2004), o elevado valor do calor isostérico integral de sorção para baixos valores de teor de água de equilíbrio podem ser explicado pelas diferenças nas forças de ligação da água com a superfície adsorvente de um determinado produto. Em estágios iniciais de sorção, existem sítios polares de sorção altamente ativos, de elevada energia de interação, na superfície adsorvente, que são cobertos com moléculas de água, formando uma camada monomolecular.

Corrêa *et al.* (2005) obtiveram os valores de calor isostérico líquido de dessorção para grãos de trigo variando de 1328,4 a 246,4 kJ·kg⁻¹, no intervalo de temperatura de 25-55 °C e umidades de 12 a 19% b.s., valores estes maiores que os encontrados no presente estudo (626,03 a 178,07 kJ·kg⁻¹) indicando que a força de ligação das moléculas de água aos sítios ativos presentes na matéria seca dos grãos de trigo é maior quando comparadas a força da ligação das moléculas de água aos sítios ativos presente no malte verde de trigo. Além disso, tais diferenças também podem estar relacionadas as diferentes condições do processo de temperatura e umidade.

O comportamento de sorção de vapor de água também pode ser avaliado de acordo com a entalpia diferencial (ΔH) e entropia diferencial (ΔS) (Figura 14). A alteração na entalpia foi representada por valores negativos variando de -523,46 a -178,07 kJ·kg⁻¹, por outro lado, a entropia foi representada por valores positivos variando de 1,26 a 0,51 kJ·kg⁻¹·K⁻¹, na faixa de X_{eq} de 0,12 a 0,22 (g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹).

Figura 14 – Mudança na entalpia e na entropia do malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio para a faixa de temperatura de 40 a 80 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

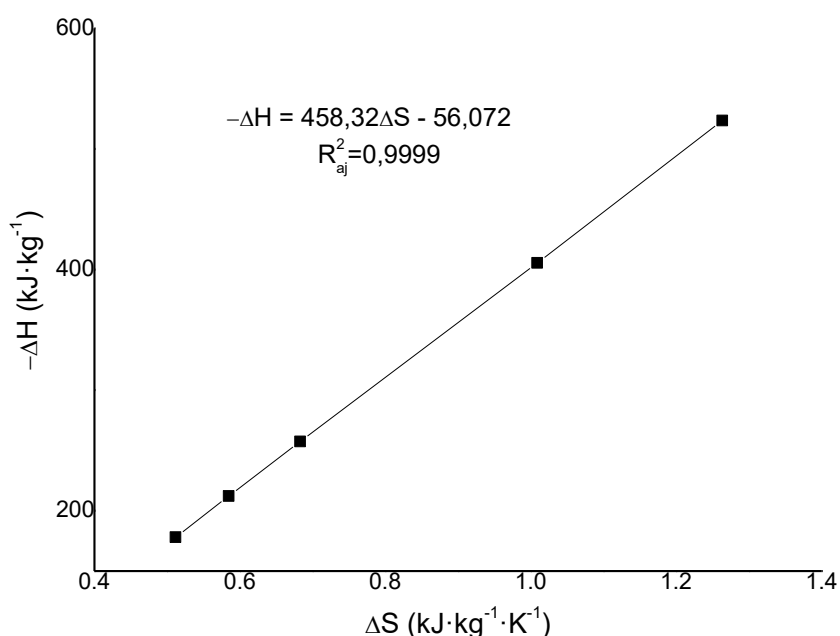
Ambos valores (ΔH e ΔS), em módulo, tendem diminuir à medida que o teor de água de equilíbrio aumenta (Figura 14), associado à perda da mobilidade das moléculas de água durante o processo de sorção de vapor de água do malte verde de trigo, e seguem a mesma tendência que o amido de batata e amidos com elevados teores de amilose e de amilopectina (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2004) amido de rizomas do lírio-do-brejo (ASCHERI *et al.*, 2009), sementes de quiabo (GONELI *et al.*, 2010), grãos de milho da cultivar AG7088 (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

A entalpia, assim como o calor isostérico de sorção, ilustra a energia necessária para fazer um trabalho útil. A um teor de água mais elevado, é necessária menos energia para remover a mesma quantidade de água em amostras mais secas, devido aos poucos locais de ligação disponíveis para promover a sorção. Por outro lado, a entropia representa o grau de desordem de um determinado processo.

Na Figura 14, observa-se que quanto maior é a quantidade de água adsorvida pelo malte verde de trigo, menor é o valor de ΔS e esse valor tende a diminuir quando todos os sítios de adsorção na monocamada e nas camadas sucessivas do malte verde de trigo são preenchidos por moléculas de água (BASTOS, 2009).

Sabe-se que um requisito para confirmar a teoria da compensação entalpia-entropia é a necessidade de correlacionar entalpia e entropia por uma tendência linear. A representação da relação entalpia e entropia, no processo de sorção, para os grãos de malte verde de trigo, foi ajustada segundo uma regressão linear (Figura 15). Com a linearidade observada na Figura 15, apresentando elevado coeficiente de determinação ajustado (com $R_{Adj}^2 > 0,999$), significa que a mudança na entalpia é acompanhada por mudanças tanto na entropia como na energia livre de Gibbs.

Figura 15 – Relação entre entalpia *versus* entropia diferencial para o malte verde de trigo em função do teor de água de equilíbrio na faixa de temperatura de 40 a 80 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

Pela mesma figura, o coeficiente angular da regressão da relação entre entalpia e entropia corresponde a temperatura isocinética (T_B), a temperatura na qual todas as reações ocorrem na mesma taxa (ASCHERI *et al.*, 2009).

Para testar a validade da teoria da compensação entalpia-entropia, utilizada para determinar o processo de sorção no malte verde de trigo na faixa de temperatura estudada, a temperatura isocinética (T_B) foi comparada com a média harmônica (T_{hm}), onde se $T_B \neq T_{hm}$ a teoria é validada.

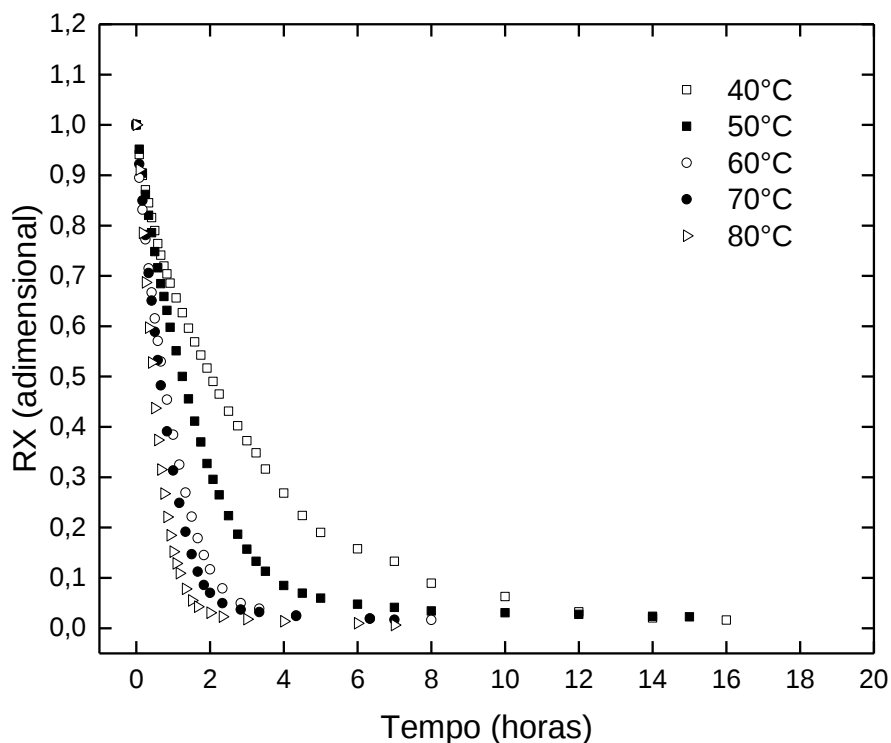
Desta forma, a temperatura isocinética (T_B) foi de $458,32 \pm 3,23$ K, enquanto a temperatura da média harmônica (T_{hm}) calculada foi de 322,55 K, verificou-se que, a média harmônica foi diferente da temperatura isocinética e situou-se fora do intervalo de temperatura isocinética, validando o fenômeno da compensação entalpia-entropia. Além disso, a temperatura isocinética é maior que a temperatura da média harmônica, mostrando que o processo é controlado pela entalpia (GABAS *et al.* 2005).

Valores elevados de temperatura isocinética (acima de 400 K) foram observados em produtos com alto teor de açúcar ou amido, como grãos de milho, malte de trigo, sementes de pinhão-manso e grãos de arroz em casca (OLIVEIRA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2014b; ZEYMER, 2017).

5.2.4 Secagem e cinética de secagem

Na Figura 16, são apresentadas as curvas de secagem para o malte verde de trigo nas diferentes temperaturas de processo. Os tempos de secagem para atingir o teor de água de equilíbrio foram de 16 h, 15 h, 8 h, 7 h e 7 h nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C, respectivamente. Diante dos dados cinéticos de secagem, foi identificado que o aumento da temperatura proporcionou redução nos tempos de secagem em 56,25% entre a menor (40 °C) e maior temperatura (80 °C) de secagem, evidenciando maior velocidade na remoção de água com o aumento da temperatura.

Figura 16 – Curvas de secagem do malte de trigo nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

As curvas de secagem mostraram-se paralelas ao eixo do tempo, em geral, a partir de quatro horas para as maiores temperaturas. Neste momento, o final do processo se aproxima devido à redução da taxa de remoção de água e redução do gradiente responsável pela força motriz no processo de transferência de massa (CURVELO SANTANA *et al.*, 2010).

Markowski *et al.* (2010) afirmaram que há um claro efeito da temperatura sobre a cinética de secagem, onde quanto maior a temperatura menor será o tempo de secagem necessário para atingir a umidade desejada. O efeito da temperatura na cinética de secagem, bem como no comportamento das curvas de secagem, seguiram a mesma tendência para maioria dos produtos agrícolas, como grãos de trigo, cevada, malte de milho, sorgo sacarino, sorgo e malte de cevada (SANTOS; COUTO; ANDRADE, 2001; BIAZUS *et al.*, 2006; GONELLI *et al.*, 2007; CURVELO SANTANA *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2011; BOTELHO *et al.*, 2015; ULLMANN *et al.*, 2015; SOARES; JORGE; MONTANUCI, 2016).

Durante o processo de hidratação dos grãos de trigo, aproximadamente 29,4% de umidade em base úmida foi incorporada aos grãos para posterior etapa

de germinação e elaboração do malte. As curvas de secagem descritas na Figura 16 apresentaram comportamento singular dividido em três etapas: (I) compreendida pela umidade incorporada ao grão durante o processo de hidratação, sendo facilmente retirada durante a operação de secagem devido a água estar facilmente acessível; (II) representa a umidade natural do grão ($12,66 \pm 0,22\%$ de umidade em base úmida) a qual a água apresenta-se ligada às estruturas do grão; (III) é compreendida pela umidade nas camadas mais internas do grão, o qual a água apresenta-se fortemente ligada à matriz do produto, demandando maior energia para sua remoção.

A mudança na velocidade que ocorreu a secagem nas diferentes temperaturas pode ser atribuída a diferentes mecanismos de transferência de massa envolvidos no processo de secagem. No presente estudo, o malte de trigo apresentou curvas de secagem típicas, contendo um período inicial (também denominado como período de indução). Em seguida, elas apresentam um período de taxa constante, no qual permanece enquanto houver água superficial disponível para realizar a remoção até uma umidade crítica no tempo crítico (CALATAYUD *et al.*, 2021). A partir deste momento, inicia-se um período de redução da taxa de transferência de massa, o qual a redução de umidade no produto depende dos diferentes fenômenos de transferência de massa (SINGH; KUMAR, 2012).

Além da análise dos dados experimentais, a modelagem matemática permite uma análise quantitativa da cinética de secagem do malte verde de trigo. Por isso, a Tabela 7 apresenta os parâmetros dos ajustes matemáticos aos dados experimentais obtidos na cinética de secagem sob as diferentes temperaturas.

Tabela 7 – Parâmetros do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem do malte verde de trigo nas diferentes temperaturas

Modelo	Temp (°C)	Parâmetros Estatísticos			Modelo	Parâmetros Estatísticos		
		R_{Adj}^2	RQME	P (%)		R_{Adj}^2	RQME	P (%)
Henderson Pabis	40	0,9968	0,0162	7,51	Dois Termos	0,9994	0,0068	4,93
	50	0,9979	0,0142	18,96		0,9978	0,0142	18,96
	60	0,9982	0,0130	15,20		0,9980	0,0130	15,20
	70	0,9966	0,0185	21,41		0,9962	0,0185	21,41
	80	0,9965	0,0175	23,60		0,9992	0,0078	21,40
Page	40	0,9986	0,0106	4,00	Verma	0,9994	0,0068	4,94
	50	0,9981	0,0137	18,97		0,9981	0,0135	18,99
	60	0,9982	0,0130	15,03		0,9983	0,0124	14,99
	70	0,9989	0,0106	19,83		0,9990	0,0100	19,49
	80	0,9992	0,0081	22,80		0,9940	0,0223	25,40
Lewis Newton	40	0,9886	0,0310	13,24	Aproximação Difusão	0,9994	0,0068	4,94
	50	0,9980	0,0143	18,98		0,9981	0,0135	18,99
	60	0,9982	0,0132	15,13		0,9983	0,0124	16,20
	70	0,9953	0,0221	22,92		0,9990	0,0100	19,49
	80	0,9945	0,0223	25,41		0,9993	0,0078	26,91
Logarítmico	40	0,9974	0,0144	6,75	Wang & Sing	0,8695	0,1035	77,31
	50	0,9984	0,0123	10,33		0,7509	0,1566	177,17
	60	0,9981	0,0130	14,52		0,7974	0,1369	199,68
	70	0,9964	0,0185	22,15		0,8091	0,1381	192,36
	80	0,9963	0,0175	28,37		0,4719	0,2140	585,70
Midilli	40	0,9989	0,0091	3,62				
	50	0,9992	0,0087	7,82				
	60	0,9987	0,0106	6,21				
	70	0,9995	0,0068	8,70				
	80	0,9995	0,0063	16,55				

Fonte: AUTORA, 2021.

No resumo estatístico apresentado na Tabela 7, foi observado que os modelos de Page, Midilli e Aproximação Difusão apresentaram melhores coeficientes de determinação ajustado ($\geq 0,9981$). O coeficiente de determinação ajustado, também conhecido como variação explicada, é um indicador estatístico que leva em consideração o número de parâmetros presente no modelo, sendo este um critério a ser considerado para acuracidade do modelo na representação dos dados experimentais. Portanto, este parâmetro torna-se um bom indicador da qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais quando é realizada a comparação entre modelos com distintos parâmetros (ROSA *et al.*, 2015).

Contudo, o coeficiente de determinação ajustado apenas não é capaz de avaliar a qualidade do ajuste matemático. Portanto, o emprego de outros parâmetros estatísticos faz-se necessário para tal análise. Neste contexto, R_{Adj}^2 próximos a unidade e $RQME$ próximo de zero indicam alta correlação entre os dados preditos pelo modelo com os dados experimentais (BETIOL *et al.*, 2020; EKKA; PALANISAMY, 2020). O erro médio relativo ($P\%$), indica o desvio percentual entre os valores experimentais e os valores preditos pelo modelo. Ajustes que apresentam valores de $P\% \leq 10\%$ são recomendados para escolha do modelo (COSTA *et al.*, 2015).

Diante das considerações estatísticas descritas acima, os modelos de Page, Midilli e Aproximação Difusão descrevem satisfatoriamente os dados experimentais da cinética de secagem do malte de trigo na faixa de temperatura de 40 a 80 °C. Contudo, altos valores de R_{Adj}^2 e valores reduzidos de $RQME$ e $P\%$ entre os dados experimentais e preditos nas diferentes temperaturas foram obtidos para o modelo de Midilli.

Os valores das constantes do modelo de Midilli nas diferentes temperaturas estão descritos na Tabela 8, enquanto na Figura 17 é representado de forma gráfica o ajuste do modelo aos dados experimentais. Outros estudos de secagem de grãos também utilizaram o modelo de Midilli para melhor representar as isotermas de secagem (BOTELHO *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2015; AMER; GOTTSCHALK; HOSSAIN, 2018; EKKA; PALANISAMY, 2020).

Tabela 8 – Constantes do modelo de Midilli referente à cinética de secagem de malte de trigo em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Constantes			
	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>b</i>
40	0,9802	0,3767	0,8680	-0,0003
50	0,9844	0,5543	1,0755	0,0022
60	0,9746	0,9685	1,0701	0,0021
70	0,9895	1,1807	1,1689	0,0034
80	1,0013	1,8608	1,1647	0,0023

Fonte: AUTORA, 2021.

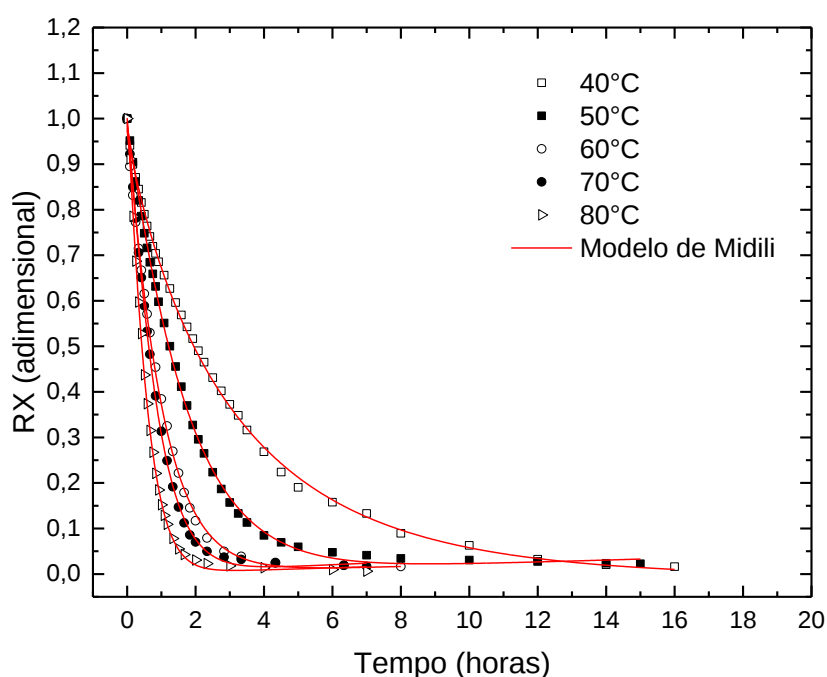
Analisando-se os parâmetros estimados (Tabela 8), observou-se que constante de secagem (*k*) para o modelo de Midilli, que representa o efeito das

condições externas de secagem, aumenta linearmente com a elevação da temperatura de secagem, visto que quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior será a facilidade do grão em perder água livre. O mesmo ocorreu com o parâmetro n . Outros estudos de secagem também encontraram resultados semelhantes para o comportamento dos parâmetros k e n (LEITE *et al.*, 2015; GONELI *et al.*, 2014).

Já os parâmetros “ a ” e “ b ” e não possuem significado físico no processo de secagem, visto que são constantes do modelo. Segundo Midilli *et al.* (2002) as variações dos parâmetros “ a ” e “ b ” se devem mais a ajustes matemáticos do que relacionados propriamente a algum fenômeno de secagem, uma vez que o modelo de Midilli é semiempírico.

Na Figura 17, são apresentadas comparações entre os valores observados e os valores estimados, pelo modelo de Midilli, da razão de umidade do malte de trigo, para as condições de secagem estudadas. Observou-se que, nos estágios iniciais do processo de secagem do malte de trigo para as diferentes temperaturas ocorre uma rápida perda de água o que justifica o bom ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais (GONELI *et al.*, 2014).

Figura 17 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem de malte de trigo em diferentes temperaturas.



Fonte: AUTORA, 2021.

Observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem promove maior taxa de remoção de água no produto, correspondendo em menor tempo de secagem (Figura 17). Menores quantidades de energia e tempo são necessários para remover a água em excesso do produto, à medida que o teor de água decresce a água retida no produto se encontra mais fortemente ligada aos constituintes da matéria seca requerendo uma maior quantidade de energia para promover alterações na difusão da água nos capilares dos grãos de trigo (GONELI *et al.*, 2009).

Na Tabela 9, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem do malte verde de trigo, para diferentes condições de temperatura do ar. Notou-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o incremento da temperatura do ar de secagem.

Sabe-se que quando há aumento na temperatura do ar de secagem, a viscosidade, que representa a resistência do fluído ao escoamento da água, diminui, variações desta propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares do malte de trigo, de modo a favorecer a movimentação deste fluído no produto (GONELI *et al.*, 2007). Desta forma, uma redução no teor de água provoca o decréscimo da resistência do fluído impactando positivamente a secagem.

Outro fator que pode ser acrescentado a esta variação do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que, também, contribui para a velocidade da difusão (GONELI *et al.* 2007). Neste sentido, o teor de água do produto também influi na condição da vibração, pois quanto maior a disponibilidade de água no produto, maior o nível de vibração das moléculas de água, e consequentemente, maior é a taxa de secagem, por decorrência do aumento da difusividade.

De acordo com Rizvi (1995), o coeficiente de difusão efetivo é dependente da temperatura do ar de secagem, além da variedade e composição dos materiais, dentre outros, o que justifica o seu aumento, com incrementos da temperatura do ar de secagem.

Os valores dos coeficientes de difusão obtidos variaram entre $6,110 \times 10^{-15}$ e $36,164 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para o malte de trigo, na faixa de temperatura de 40 a 80 °C (Tabela 9).

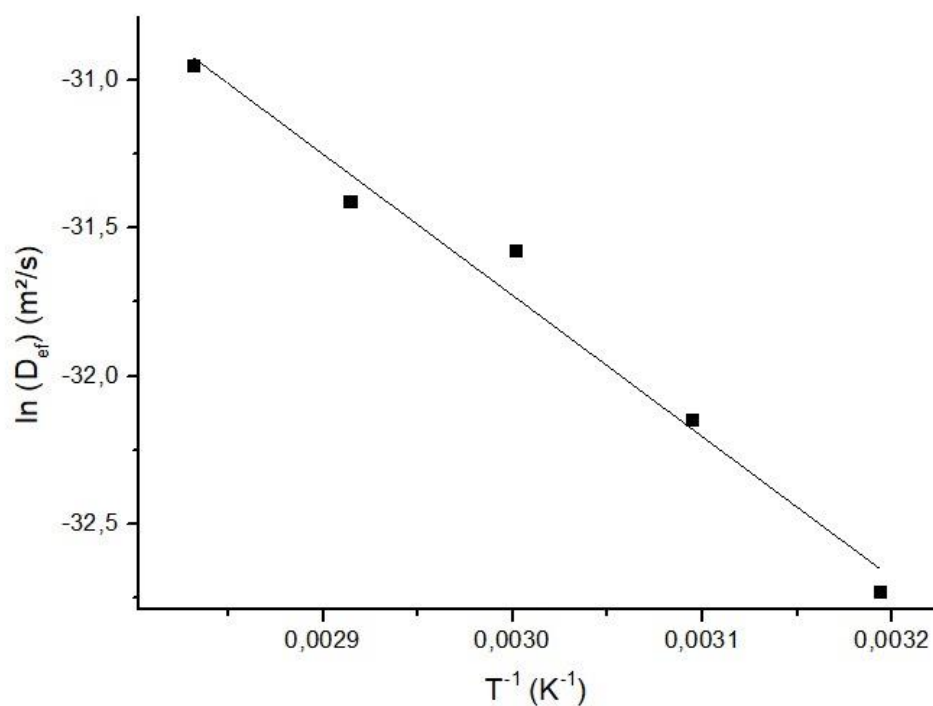
Tabela 9 – Coeficiente de difusão efetivo, durante a secagem de malte verde de trigo nas diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	D_{ef} ($10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	R_{Adj}^2	RQME
40	6,110	0,974	0,048
50	10,935	0,947	0,074
60	19,373	0,951	0,071
70	22,904	0,933	0,086
80	36,164	0,937	0,077

Fonte: AUTORA, 2021.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo, com relação à temperatura do ar de secagem, tem sido, satisfatoriamente, descrita pela equação de Arrhenius, como apresentado na Figura 18 (CORRÊA *et al.* 2007, GONELI *et al.* 2007, MARTINAZZO *et al.* 2007, RESENDE; CORRÊA, 2007).

Figura 18 – Representação de Arrhenius para os coeficientes de difusão médios em função da temperatura do ar de secagem.



Fonte: AUTORA, 2021.

Obtém-se a energia de ativação por meio do coeficiente angular da reta $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura ($1/T$), enquanto a interseção com o eixo das ordenadas fornece o valor de D_0 . O ajuste linear obtido indica que houve uniformidade de variação da difusividade com a temperatura.

A energia de ativação na secagem relaciona-se juntamente com a difusividade na quantidade de energia necessária para que a transformação física ocorra, ou seja, a transformação da água livre em vapor (CORRÊA *et al.*, 2010).

A Equação 43 apresenta os coeficientes da expressão ajustada para o coeficiente de difusão dos grãos de trigo, calculados de acordo com a Equação 26.

$$D_{ef} = 3,68 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{4769,06}{T_a}\right) \quad (43)$$

Como pode ser observado na Equação 43, considerando $R = 8,314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, energia de ativação para a difusão da água, durante a secagem do malte verde, foi de $39,65 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Goneli *et al.* (2007) ao estudar a difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem, encontraram valor da energia de ativação de $42,00 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para o intervalo de temperatura de 25 a 55 °C, valor ligeiramente superior ao encontrado no presente estudo. Isto se deve provavelmente pelo fato de a estrutura do grão de trigo apresentar maior resistência para a água movimentar quando comparado ao malte de trigo, o que pode ser validado por meio dos valores obtidos para o coeficiente de difusão, variam de $8,6775 \times 10^{-11}$ e $42,8743 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, valores estes bem maiores do que os obtidos neste estudo. Outro fator a ser considerado é o intervalo de temperatura utilizado 25 a 55 °C, enquanto que neste estudo foi de 40 a 80 °C.

Os valores de energia de ativação para diferentes produtos agrícolas variaram: trigo parbolizado, $37,01 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ na faixa de temperatura de 40 a 60 °C (MOHAPATRA e RAO, 2005); milho, $19,09 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ a temperaturas de 40 a 100 °C (OLIVEIRA *et al.*, 2012); feijão azuki, $31,16 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ em temperaturas de 30 a 70 °C (ALMEIDA *et al.*, 2009); Sorgo, $33,82$ e $35,71 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, para cultivar BRS 308 E NIDEIRA A 9721, respectivamente, no intervalo de temperatura de

40 a 60°C (BOTELHO *et al.*, 2015). ZOGZAS *et al.* (1996) ressaltam que a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ·mol⁻¹.

5.4 Isotermas de Sorção*

Os valores do teor de água de equilíbrio (X_{eq}) e atividade de água (a_w), para temperaturas de armazenamento variaram de 0,0383 a 0,3137 g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹ e 0,058 a 0,982, respectivamente. Valores semelhantes foram encontrados para diferentes variedades de trigo, bem como para a farinha de trigo (LI *et al.*, 2011; MOHAMAD SAAD *et al.*, 2009).

A umidade de equilíbrio tende a aumentar com o incremento da atividade de água e a diminuição da temperatura. Esse comportamento é similarmente relatado para a maioria dos produtos à base de cereais, incluindo trigo (ABEBE; RONDA, 2015; ARSLAN-TONTUL, 2020; AVIARA *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2012). Segundo Rizvi (2005), isso se deve a uma redução no número de sítios ativos relacionados às alterações químicas e físicas induzidas quando ocorre um aumento da temperatura. Essa redução depende da natureza ou constituição do alimento, fato que destaca a necessidade de um estudo específico para cada produto.

Comparando o comportamento das curvas das diferentes condições de temperaturas estudadas (Figura 19), nota-se que para uma dada umidade de equilíbrio fixa, a a_w aumenta com a elevação da temperatura. Este comportamento foi observado também por Barreiro, Fernández e Sandoval (2003) em estudo de isotermas de sorção para malte de cevada em uma faixa de temperatura de 15 a 35 °C.

A Figura 19 representa, graficamente, a relação entre a atividade de água (a_w) e a umidade de equilíbrio (X_{eq}) pelas isotermas de adsorção do malte de trigo nas diferentes temperaturas estudadas. As isotermas obtidas seguiram um comportamento sigmoidal, típico de isotermas do tipo II de acordo com a classificação de Brunauer (BRUNAUER *et al.*, 1940). Esse tipo de isoterma é geralmente encontrado para grãos como sementes oleaginosas (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002; LAZOUK *et al.*, 2015), grão de milho

*Os resultados apresentados no item 5.4 foram publicados na revista *Journal of Food Process Engineering* (SILVA *et al.*, 2021).

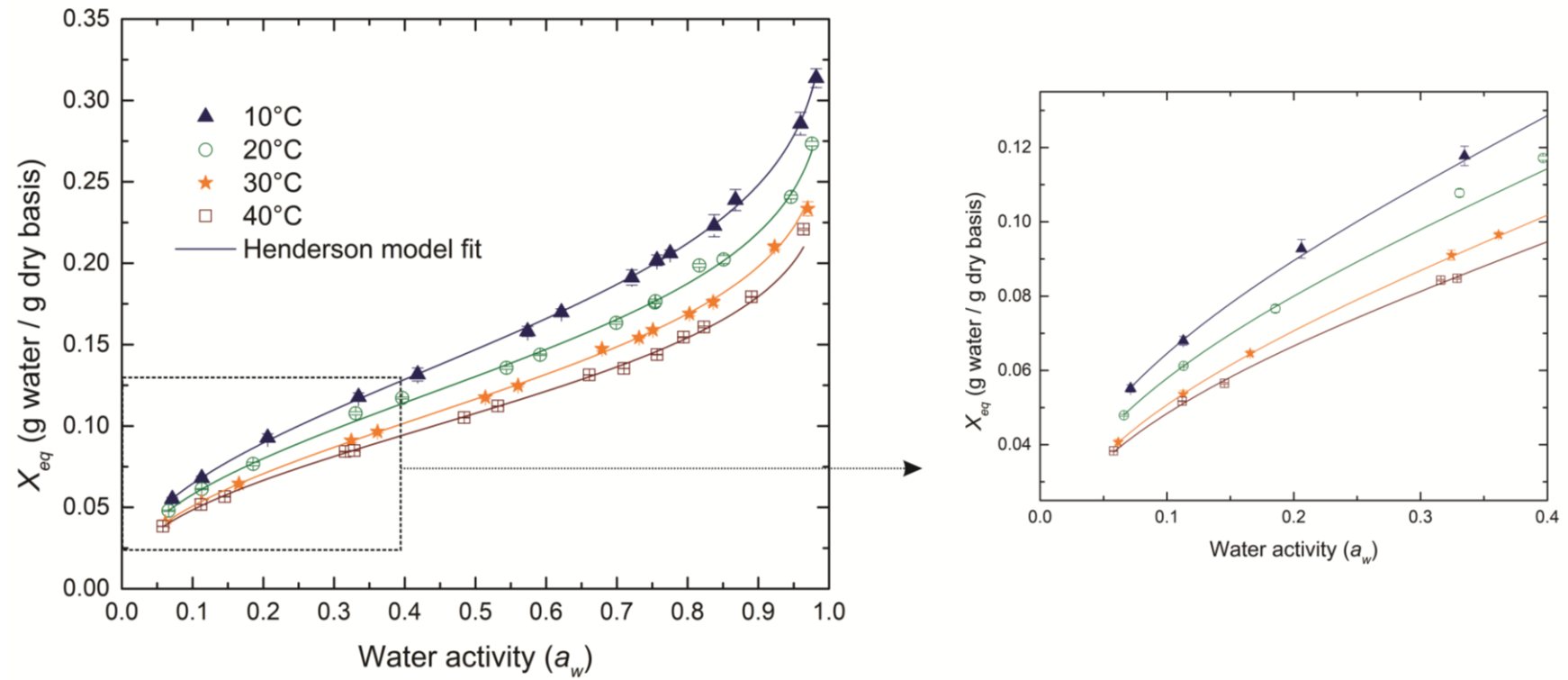
(SINGH *et al.*, 2011), amêndoa (TAITANO *et al.*, 2012), sementes de quinoa (BUSTOS- VANEGAS *et al.*, 2018), sementes de chia (ARSLAN-TONTUL, 2020), malte de cevada (BARREIRO; FERNÁNDEZ; SANDOVAL, 2003) e para farinhas de trigo e arroz integrais (ABEBE; RONDA, 2015).

As isotermas do tipo II indicam que existe uma possível adsorção de água da multicamada na superfície da estrutura de malte de trigo. Multicamadas e monocamadas de água são formadas em superfícies porosas e granulares quando a umidade relativa é alta o suficiente (WAN *et al.*, 2018).

Por esse motivo, essas isotermas podem ser classificadas em três regiões: a primeira corresponde à umidade de monocamada, em que as moléculas de água estão fortemente ligadas à matriz do alimento; a segunda é uma região praticamente linear que corresponde à umidade de multicamada; e a terceira região está relacionada a água livre disponível para reações químicas retidas por forças capilares (POLACHINI *et al.*, 2016).

A modelagem matemática das isotermas de sorção permite a predição dos dados e a avaliação da influência das variáveis. No entanto, a precisão de um determinado modelo deve ser satisfatória. Essas condições são atingidas quando os coeficientes de determinação ajustado (R_{Adj}^2) são maiores que 0,98 e os erros relativos ($P\%$) são menores que 10% (ARSLAN-TONTUL, 2020).

Figura 19 – Valores experimentais da umidade de equilíbrio e isothermas de sorção do malte de trigo em diferentes temperaturas ajustado ao modelo de Henderson.



Fonte: AUTORA, 2021.

Tabela 10 – Parâmetros dos modelos ajustados à isoterma de sorção para malte de trigo em temperaturas de armazenamento

Modelo	Parâmetros Estimados	Temperatura (°C)			
		10	20	30	40
GAB	X_m	0,1010	0,0911	0,0839	0,0732
	C	21,9066	22,0555	19,2699	24,1316
	k	0,6879	0,6783	0,6652	0,6901
	R_{Adj}^2	0,9962	0,9936	0,9978	0,9943
	P (%)	1,5709	1,9269	1,4008	2,0373
	$RQME$	0,0030	0,0029	0,0017	0,0025
Oswin	A	0,1457	0,1284	0,1139	0,1044
	B	0,2137	0,2238	0,2338	0,2482
	R_{Adj}^2	0,9429	0,9528	0,9483	0,9705
	P (%)	11,0479	9,6361	10,1780	7,6445
	$RQME$	0,0143	0,0116	0,0100	0,0068
Oswin Modificado	d_1	2,6017			
	d_2	0,0662			
	d_3	0,8744			
	R_{Adj}^2	0,9279			
	P (%)	12,3693			
	$RQME$	0,0172			
Henderson	H_1	57,3023	76,5198	95,6517	105,2493
	H_2	2,3044	2,3141	2,2937	2,2536
	R_{Adj}^2	0,9995	0,9981	0,9991	0,9978
	P (%)	0,6294	1,2894	0,5196	1,5039
	$RQME$	0,0011	0,0025	0,0009	0,0018
Henderson Modificado	h_1	-0,0032			
	h_2	-105,1000			
	h_3	0,8222			
	R_{Adj}^2	0,9322			
	P (%)	11,9636			
	$RQME$	0,0167			
Halsey	z_1	4111,6100	4183,4800	4216,6800	3204,4500
	z_2	4,0904	3,8424	3,6306	3,3673
	R_{Adj}^2	0,8782	0,8890	0,8795	0,9100
	P (%)	17,0764	15,8435	16,6689	14,2378
	$RQME$	0,0221	0,0184	0,0162	0,0127

Fonte: AUTORA, 2021.

Após avaliar os parâmetros de ajuste das isotermas de malte de trigo nas diferentes temperaturas (Tabela 10), observou-se que o modelo de Halsey apresentou os maiores valores de $P\%$ e RQME e o menor valor de R_{Adj}^2 . Os modelos de Oswin, Oswin modificado e Henderson modificado resultaram em $P\% > 10\%$, tornando-os inadequados para representação das isotermas. Vale ressaltar que a precisão reduzida (decréscimo do R_{Adj}^2) dos modelos Henderson modificado e Oswin modificado está relacionada ao fato de que esses modelos correlacionam simultaneamente o teor de umidade de equilíbrio com os dados de atividade de água e temperatura.

Dessa forma, observou-se que os modelos de Henderson e GAB apresentaram os maiores coeficientes de determinação ajustado ($R_{Adj}^2 > 0,9936$) e menores valores do erro médio relativo ($P\% < 10\%$). Embora tenha sido obtido um ajuste ligeiramente melhor para o modelo de Henderson, os critérios de informação de AIC e BIC (Tabela 11) foram adotados como método de seleção adicional. Esse método considera fatores adicionais, como a análise do grau de parametrização dos modelos comparados, podendo ser mais preciso (SILVEIRA *et al.*, 2012).

Tabela 11 – Critérios de seleção de Akaike (AIC) e Bayesiano de Schwarz (BIC) para os modelos de GAB e Henderson

Modelo	10 °C		20 °C		30 °C		40 °C	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
GAB	-105,47	-102,92	-102,35	-99,79	-120,85	-118,29	-110,49	-107,94
Henderson	-133,51	-131,59	-119,82	-117,90	-134,25	-132,34	-124,98	-123,07

Fonte: AUTORA, 2021.

A análise simultânea dos critérios de AIC e BIC mostrou, para fins matemáticos de predição de dados, que o modelo de Henderson foi o melhor modelo para representar X_{eq} em todas as temperaturas e atividade de água estudados. Por esse motivo, este modelo foi utilizado para estimar as propriedades termodinâmicas relacionadas à absorção de água.

Por outro lado, o modelo de GAB é considerado o modelo mais versátil para representar isotermas de sorção de vários produtos alimentícios (SAMAPUNDO *et al.*, 2007; TIMMERMANN; CHIRIFE; IGLESIAS, 2001). Além de apresentar precisão semelhante ao modelo de Henderson, os parâmetros do

modelo de GAB (C , k e X_m) fornecem importante significado físico que permite interpretar e discutir sobre as interações entre as moléculas de água e a matriz sólida.

O parâmetro C relaciona a diferença logarítmica entre o potencial químico da molécula de sorbato no estado líquido puro e na primeira camada de sorção (TIMMERMAN; CHIRIFE; IGLESIAS, 2001). O parâmetro k está relacionado às interações entre as moléculas das multicamadas e o adsorvente (VIGANÓ; GABAS; TELIS-ROMERO, 2014). Quando o parâmetro k é menor que 1, modelo de GAB se mostra mais adequado comparado ao modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET) para o ajuste de isotermas de sorção, uma vez que o modelo de GAB prediz interações entre a matriz sólida e as moléculas de água em uma faixa mais ampla de atividade da água. Quando $k = 1$, o modelo GAB reduz para o modelo BET e as multicamadas se comportam como água líquida. Por outro lado, quando $k \gg 1$, a umidade de equilíbrio tende a valores infinitos em atividades de água mais altas, sendo ausente de significado físico (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

De acordo com Blahovec (2004), os parâmetros encontrados para as condições de armazenamento estudadas estão de acordo com aqueles estabelecidos para as isotermas do tipo II: k entre 0 e 1 e valores de C maiores que 2. Na medida em que a temperatura aumenta, a umidade de equilíbrio do produto diminui e valores crescentes de k ocorrem conforme o esperado (POLACHINI *et al.*, 2016).

Os valores do teor de água da monocamada (X_m , $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) fornecem informações sobre a quantidade de água que é fortemente adsorvida aos sítios ativos na superfície do produto e que ajuda a definir a estabilidade física e química dos alimentos (ARSLAN-TONTUL, 2020).

Observando-se os parâmetros do modelo de GAB (Tabela 10), constatou-se que a umidade de monocamada (X_m) variou de 0,1010 a 0,0732 $\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$, com o aumento da temperatura de 10 a 40 °C. Isso indica que, acima desses valores de umidade, a estabilidade do malte de trigo deve ser afetada mais facilmente.

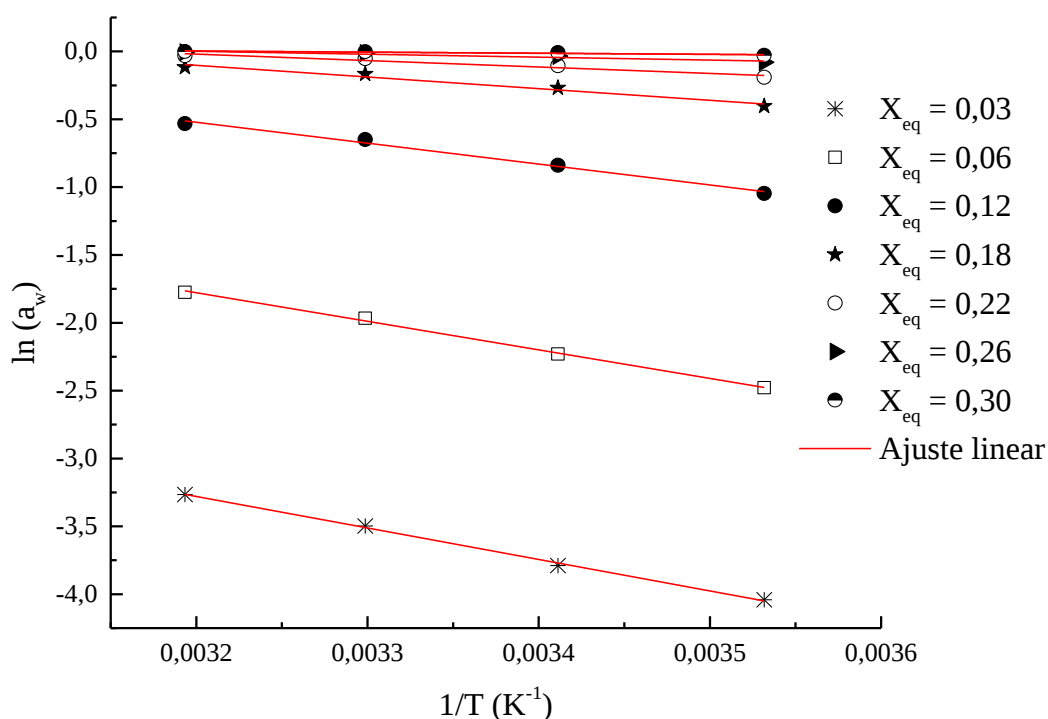
Como a X_m diminuiu com o aumento da temperatura, as características higroscópicas tendem a ser mais pronunciadas em temperaturas mais baixas. Samapundo *et al.* (2007) relataram que essa tendência se deve ao aumento do

estado de excitação das moléculas em altas temperaturas, aumentando a distância entre as moléculas de água e a consequente diminuição das forças de atração. Como a água da multicamada é fracamente ligada, as moléculas de água estão mais disponíveis para reações químicas e o desenvolvimento de microrganismos (CHOUDHURY *et al.*, 2011).

5.5 Propriedades Termodinâmicas

Como modelo de Henderson obteve o melhor ajuste, ele foi utilizado para calcular a atividade de água para um teor de água de equilíbrio constante (X_{eq}). Na Figura 20, são apresentadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água, em umidades de equilíbrio (b.s.) fixas de 0,03 a 0,30, em função de valores do inverso da temperatura absoluta (K) para o malte de trigo.

Figura 20 – Curvas de logaritmo neperiano da a_w em função de valores de $1/T$ para malte de trigo nas diferentes temperaturas calculadas pela equação de Henderson.



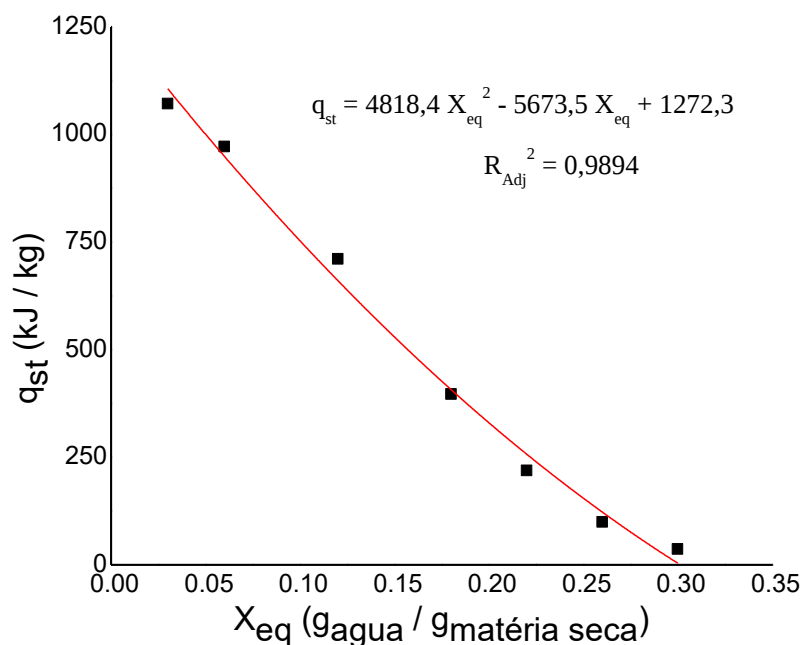
Fonte: AUTORA, 2021.

Em seguida, o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) foi obtido através dos coeficientes angulares de regressões lineares da Equação (35), e expresso em função do teor de água de equilíbrio (Figura 20). A energia necessária para a sorção da água no malte de trigo variou de 1071,82 a 36,95 kJ·kg⁻¹ no intervalo do teor de água de 0,03 a 0,30 (g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹) e na faixa de temperatura de 10 a 40 °C.

Corrêa *et al.* (2005) encontraram calor isostérico líquido de dessorção para grãos de trigo na faixa de ~1330 a ~380 kJ·kg⁻¹ no intervalo de temperatura de 25-55 °C e umidades de 0,12-0,19 (g_{água}·g_{matéria seca}⁻¹). Além das diferentes condições estudadas, essas diferenças também podem ser atribuídas devido ao processo de maltagem do trigo que desenvolve grãos com alta atividade enzimática e endosperma parcialmente digerido. Parte dos carboidratos complexos tendem a ser digeridos em carboidratos/açúcares de baixas cadeias moleculares (NOELLO *et al.*, 2012). Por esta razão, o teor de açúcar do malte de trigo é superior ao do grão de trigo, obtendo maior número de grupos hidrofílicos. Consequentemente, é esperado um aumento na capacidade de adsorção de água, reduzindo o calor isostérico líquido de sorção em comparação com o trigo *in natura*. Se a concentração de compostos moleculares baixos for muito alta, pode ocorrer o cruzamento das isothermas em alta a_w , como consequência da dissociação da água e do aumento da solubilidade desses compostos (PUSHPADASS *et al.*, 2013).

Na Figura 21, pode-se observar que os valores de q_{st} (kJ·kg⁻¹) são mais altos para menores teores de água e diminuem com o incremento da umidade. Segundo Bonner e Kenney (2013), esse fenômeno ocorre porque, em baixas umidades, as moléculas de água existentes estão fortemente ligadas a sítios de elevado grau energético para constituir a água da monocamada. Dessa forma, as interações mais fortes são observadas entre a água e o malte, resultando em maior q_{st} em menores umidades. Esse comportamento também foi observado para vários produtos agrícolas, como grãos de quinoa, grãos de arroz, sementes de quinoa, grãos de avelã (BUSTOS-VANEGAS *et al.*, 2018; TOĞRUL; ARSLAN, 2006; TOLABA *et al.*, 2004).

Figura 21 – Calor isostérico líquido de sorção para malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio para faixa de temperatura de 10 a 40 °C.



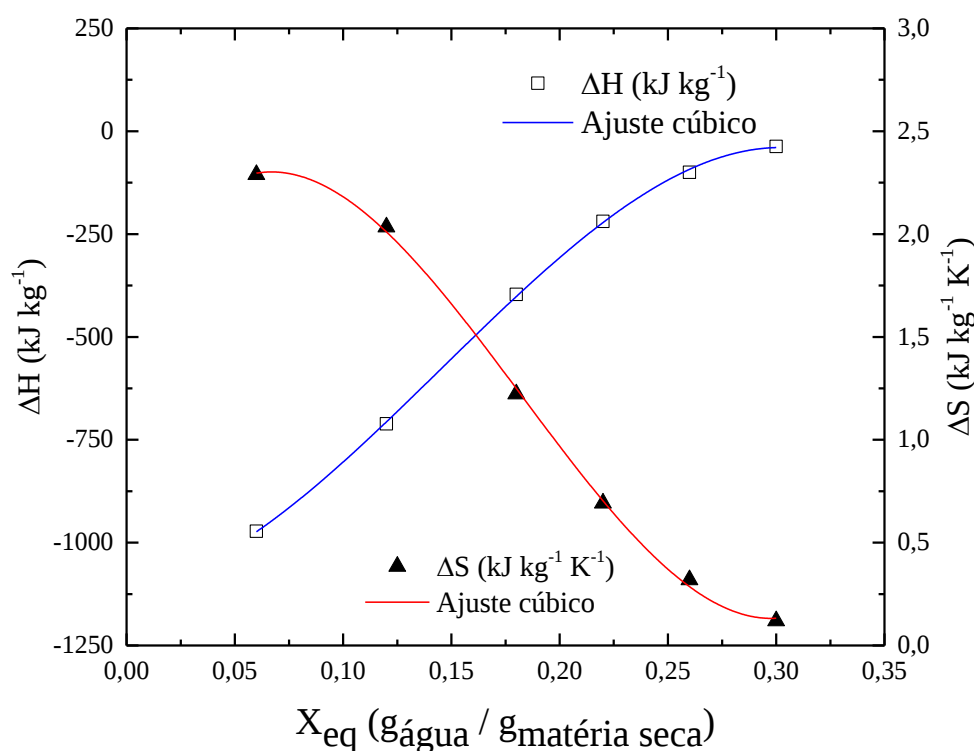
Fonte: AUTORA, 2021.

Além disso, o fenômeno da sorção de vapor de água pode ser avaliado pela entalpia diferencial (ΔH) e entropia diferencial (ΔS) na faixa de X_{eq} de 0,06 a 0,30. A mudança na entalpia foi representada por valores negativos variando de -1.071,82 a -36,95 kJ·kg⁻¹, caracterizando a adsorção de água como uma reação exotérmica. Por outro lado, a entropia foi representada por valores positivos variando de 2,29 a 0,12 kJ·kg⁻¹·K⁻¹. Os dois valores, em módulo, tendem a diminuir na medida em que a umidade aumenta (Figura 22). A entalpia, assim como o calor isostérico líquido da sorção, ilustra a energia necessária para realizar um trabalho útil.

A Figura 21 mostrou que o ΔH apresentou um valor máximo em $X_{eq} = 0,06$ g água·g matéria seca⁻¹ e depois diminuiu continuamente com o aumento da umidade de equilíbrio. Isso está relacionado à alta energia dos sítios ativos polares que ligam a água para criar a água da monocamada, dificultando

também o movimento da água do interior do grão para a superfície (AL-MAHASNEH; AMER; RABABAH, 2012). Isso significa que, nessa umidade de equilíbrio específica, os sítios ativos não estavam disponíveis e, então, a sorção ocorreu nos locais menos ativos, resultando em menores calores de sorção (ANSARI *et al.*, 2011).

Figura 22 – Mudança na entalpia e na entropia do malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio para a faixa de temperatura de 10 a 40 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

Observou-se na Figura 22 que o maior valor de ΔS ($2,29 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) foi registrado para menores umidades, ou seja, quando a água adsorvida saturou completamente a monocamada ($X_{eq} = 0,06 \text{ g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$). Na medida em que a ΔS diminui, as moléculas de água que constituem a monocamada estão mais disponíveis até que, em $X_{eq} = 0,3 \text{ g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$, obteve-se o menor valor de ΔS ($0,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), este resultado é esperado porque essa propriedade termodinâmica é diretamente proporcional ao número de sítios de sorção disponíveis para um sistema, estando assim associado à perda da mobilidade das moléculas de água no produto. Supõe-se que a entropia diminua na medida em que os sítios disponíveis são ligados pelas moléculas de água livre.

A entropia também está associada à perda de mobilidade das moléculas de água. Em baixas umidades, as moléculas de água estão fortemente ligadas à matriz alimentar - limitando assim seus movimentos. Quando a umidade aumenta, as moléculas de água livre tendem a adsorver na monocamada para formar multicamadas com menor energia de ligação. Essa energia de ligação mais baixa permite maior mobilidade para rotação e translação das moléculas (DANNENBERG; KESSLER, 1988).

A estimativa da entalpia diferencial (energia disponível) e da entropia diferencial (energia indisponível) é importante porque elas refletem nos valores da energia livre de Gibbs (ΔG). A energia livre de Gibbs representa a quantidade máxima de energia livre liberada em um processo sob temperatura e pressão constantes para realizar um trabalho útil (RIZVI, 2005). Além disso, a viabilidade e melhores condições de uma reação química podem ser estimadas medindo-se as mudanças na energia livre de Gibbs (TELIS *et al.*, 2000).

Do ponto de vista termodinâmico, ΔG é um indicativo da adsorção de água por afinidade e fornece um critério para determinar se ao processo de sorção de vapor de água é espontâneo ($-\Delta G$) ou não espontâneo ($+\Delta G$) (SPADA *et al.*, 2013). Nesse caso, o processo variou de $-324,13$ a $-0,13 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para as condições estudadas, caracterizando o processo como espontâneo ($\Delta G < 0$).

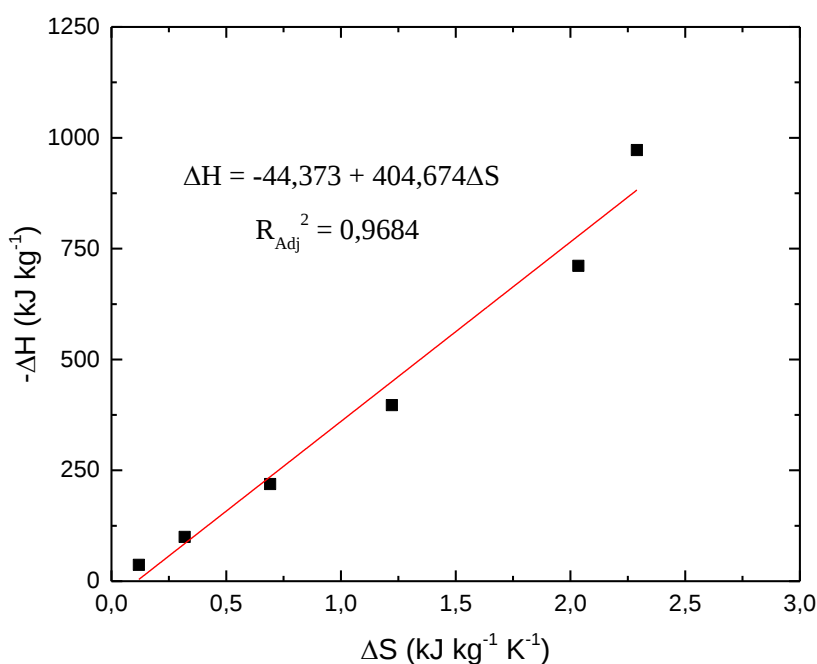
Valores negativos são esperados, uma vez que a adsorção é um processo espontâneo, conforme observado no presente trabalho para o malte de trigo. Como os valores de ΔG devem ser acompanhados por alterações na entalpia e na entropia, a análise da teoria da compensação é grande interesse.

O emprego da teoria da compensação consiste na avaliação dos fenômenos físicos e químicos decorrentes das reações de sorção. A compensação resulta da natureza da interação entre soluto e solvente e, quando apresenta relação linear, significa que a microestrutura do alimento é estável e o mesmo não sofre alterações significativas durante esse processo (OLIVEIRA

et al., 2014a). A teoria da compensação foi verificada pela relação linear entre entalpia e entropia para malte de trigo com uma precisão de $R_{Adj}^2 = 0,9684$ (Figura 23).

A tendência linear apresentada na Figura 23 representa que a mudança na entalpia é acompanhada por mudanças tanto na entropia como na energia livre de Gibbs. Essa evidência fornece informações de que a teoria isocinética ou a teoria de compensação de entalpia-entropia está confirmada. No entanto, uma forma adicional para validar a teoria da compensação pode ser realizada comparando a temperatura isocinética (T_B) com a temperatura média harmônica (T_{hm}) na faixa de temperatura estudada.

Figura 23 – Relação entre entalpia diferencial versus entropia diferencial para o malte de trigo em função do teor de água de equilíbrio na faixa de temperatura de 10 a 40 °C.



Fonte: AUTORA, 2021.

A temperatura isocinética tem um significado físico importante, pois representa a temperatura na qual todas as reações da série (oxidação lipídica, reação de Maillard, reações enzimáticas e hidrolíticas) ocorrem na mesma taxa. Ela é obtida pelo coeficiente angular da regressão entre entalpia-entropia

(ASCHERI *et al.*, 2009). Dessa forma, a temperatura isocinética do malte de trigo neste trabalho foi de $404,67 \pm 83,73$ K em um intervalo de confiança de 320,94 a 488,40 K. Por outro lado, a temperatura média harmônica (T_{hm}) calculada pela Equação (41) foi de 297,73 K, sendo significativamente diferente do intervalo de temperatura isocinética descritos> Este fato confirma a teoria da compensação entalpia-entropia para o malte de trigo.

Para este caso específico em que $T_b > T_{hm}$, a adsorção de água pelo malte de trigo pode ser considerada como um processo controlado pela entalpia (SPADA *et al.*, 2013). Esses resultados estão de acordo com outros trabalhos que aplicaram com sucesso a teoria isocinética sobre a sorção de produtos amiláceos como sementes de *Araucaria angustifolia*, grãos de milho e bagaço de mandioca (OLIVEIRA *et al.*, 2013; POLACHINI *et al.*, 2016; THYS *et al.*, 2010).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou diferentes processos envolvidos na produção de malte de trigo, desde a caracterização dos grãos até estocagem do produto final. De acordo com os resultados obtidos na caracterização dos grãos, mostraram-se que os grãos estavam com boa qualidade e ricos em amido e proteína, macronutrientes de importância nutricional e tecnológica para o processo de hidratação. Os resultados apresentados na composição química e geometria do grão auxiliam para melhor entendimento do comportamento do grão diante das etapas de malteação (hidratação e secagem) bem como no desenvolvimento de equipamentos.

As cinéticas de hidratação resultaram em um comportamento dividido em duas fases, sendo a primeira regida por forças capilares e a segunda pelo mecanismo de difusão, fases observadas pela taxa de absorção de água.

Utilizando o modelo de Weibull para hidratação de grãos de trigo, na condição de processo a 20°C, permite projetar o controle do processo de hidratação industrial de forma simples e barata.

O tempo médio para a germinação do grão de trigo ocorrer é de aproximadamente 5 dias. Os grãos de trigo apresentam poder germinativo condizente ao requerido para o processo de maltagem (máximo de 92,75%).

Com relação as propriedades de sorção do malte verde de trigo e do malte de trigo acabado ambas apresentaram um acréscimo no valor do teor de água de equilíbrio com o incremento da atividade de água e a diminuição da temperatura. E seguiram comportamento sigmoidal característicos de isotermas do tipo II.

Além disso, este estudo apresentou a estimativa das propriedades termodinâmicas do processo simulando condições de secagem do malte verde de trigo e armazenamento do malte de trigo acabado, as quais foram influenciadas pelo teor de água dos grãos e forneceram informações sobre a energia de ativação (E_a) e as variações de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) associada ao grau de desordem e a Energia Livre de Gibbs (ΔG), associada à espontaneidade do processo. Os resultados obtidos dessas propriedades são relevantes para indústrias que processam grãos, o que permite uma melhor

caracterização do processo de hidratação e qualidade do produto obtido, podendo ser de grande interesse para cientistas, pesquisadores e profissionais.

Quanto a cinética de secagem, utilizando o modelo de Midilli, nas mesmas circunstâncias estudadas, pode ser útil para projetar condições adequadas de secagem do malte verde de trigo e condições ideais de armazenamento do malte de trigo pronto.

O processo de malteação realizado mostrou-se promissor não apenas na utilização do malte para elaboração de bebidas como também na aplicação em alimentos, pois o malte de trigo pode ser utilizado como aditivos na elaboração de bolos, biscoitos, pães e sorvetes.

Utilizando os modelos de Weibull para hidratação de grãos de trigo e Midilli para secagem de malte verde podem auxiliar, de forma simples e prática, na manutenção de processos industriais, controle do processo, no desenvolvimento e dimensionamento de equipamentos, melhoria de produtos e processos visando maior rendimento, determinação de prazos e garantia de produtos, ou, ainda, no estabelecimento de padrões mínimos de qualidade do produto ao longo do tempo.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho podem ser complementados e aprimorados realizando estudos sobre o comportamento da atividade enzimática do malte de trigo nas diferentes temperaturas de secagem dos grãos germinados.

Além disso, sugere-se avaliar a influência das diferentes temperaturas de secagem quanto ao teor de açúcar redutor e caracterizar os diferentes maltes de trigo obtidos quanto à sua composição físico-química.

Outro ponto que ajudaria a discutir melhor os resultados de hidratação, seria a compreensão de como o grão incha com o tempo através de medidas físicas das dimensões do grão durante a hidratação e também realização de análises microscópicas nos mesmos tempos pré-estabelecidos.

REFERÊNCIAS

- ABITRIGO. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. **Estatísticas**.2019. Disponível em <<http://www.abitrigo.com.br/categoria-estatisticas/trigo/>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2020.
- ABITRIGO. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. **História do Trigo**.2020. Disponível em: <<http://www.abitrigo.com.br/conhecimento/historia-do-trigo/>>. Acesso em: 04 de janeiro de 2020.
- ABITRIGO. Associação Brasileira da Indústria do Trigo. **O Triticulor e o Mercado**. São Paulo: ABITRIGO, 2011. Disponível em: <http://abitrigo.com.br/associados/arquivos/cartilha_triticulor.pdf>. Acesso em: 12 janeiro 2020.
- ABEBE, W.; RONDA, F. Flowability, moisture sorption and thermal properties of tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] grain flours. **Journal of Cereal Science**, v. 63, p. 14-20, 2015.
- ABOUMRAD, J. P. C. **Análise e simulação das operações de mosturação e fermentação no processo de produção de cervejas**. 2015. 81f. Trabalho (Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Niterói, 2015.
- AGUILAR, G.; MORLON-GUYOT, J.; TREJO-AGUILAR, B.; GUYOT, J. P. Purification and characterization of an extracellular α -amylase produced by *Lactobacillus manihotivorans* LMG 18010T, an amylolytic lactic acid bacterium. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 27, n. 6, p. 406-413, 2000.
- AGUILAR, J.; MIANO, A.C.; OBREGÓN, J.; SORIANO-COLCHADO, J.; BARRAZA-JÁUREGUI. Malting process as an alternative to obtain high nutritional quality quinoa flour. **Journal of Cereal Science**, v. 90, p. 102858, 2019.
- AKAIKE, H. A New Look at the Statistical Model Identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ALBINI, G. **Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leito fixo**. 2015. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2015.
- AL-MAHASNEH, M. A.; AMER, M. M. B.; RABABAH, T. M. Modeling moisture sorption isotherms in roasted green wheat using least square regression and neural-fuzzy techniques. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, 165-170, 2012.
- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, p.72-83, 2009.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioprocess Processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 1 jun. 2002.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v.62, p.135-142, 2004.

ALTAMIRANO-FORTOUL, R.; ROSELL, C. M. Physico-chemical changes in breads from bake off technologies during storage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 631-636, 2011.

AMER, B. M. A.; GOTTSCHALK, K.; HOSSAIN, M. A. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. **Renewable Energy**, v. 121, p. 539-547, 2018.

ANDRADE, E. T. *et al.* Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, v. 08, n. 02, p. 83-95, 2006.

ANSARI, S.; FARAHNAKY, A.; MAJZOBI, M.; BADII, F. Modeling the Effect of Glucose Syrup on the Moisture Sorption Isotherm of Figs. **Food Biophysics**, v. 6, n. 3, p. 377-389, 2011.

ANTHERO, A. G. S. **Estudo do processo de malteação da aveia (*Avena sativa*)**. 2017. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná. Paraná, Curitiba, 2017.

AOAC. **Association of Official Analytical Chemistry**. 18th. ed. Gaithersburg, 2016.

ARAUJO, L. F.; OLIVEIRA, L. S. C.; PERAZZO NETO, A.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, F. L. H. Equilíbrio higroscópico da palma forrageira: relação com a umidade ótima para fermentação sólida. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 379-384, 2005.

ARSLAN-TONTUL, S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. **LWT**, v. 119, p. 108859, 2020.

ASAE, AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, MI, 1974.

ASCHERI, D. P. R.; BASTOS, S. M. C. Propiedades de adsorción de água de dos genótipos de arroz rojo. **Engenharia Agrícola**, v.35, p.134-143, 2015.

ASCHERI, D. P. R.; MOURA, W. S.; ASCHERI, J. L. R.; FREITAS JUNIOR, E. A. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 2, p. 454-462, 2009.

ATWELL, W. A. Wheat Flour. **Eagen Press Handbook Series. American Association of Cereal Chemists**. St. Paul, 2001.

ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T. **Conservação de grãos**. Campinas: Fundação Cargill, 1998.

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; AREGBESOLA, O. A.; ADEDEJI, M. A. Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50°C. **Journal of Stored Products Research**, v. 42, n. 3, p. 290-301, 2006.

AYKIN-DINÇER, E.; ERBAS, M. Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. **Meat Science**, v. 145, p. 114-120, 2018.

BAMFORTH, C. W. Barley β -glucans: their role in malting and brewing. **Brewers Dig.**, v. 57, n. 6, p. 22-27, 1982.

BANDINELLI, P. C. **Estudo de caso de melhoria no processo de mosturação de uma cervejaria no RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2015, 47f.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FERNÁNDEZ-MOLINA, J. J.; ALZAMORA, S. M.; TAPIA, M. S.; LÓPEZ-MALO, A.; CHANES, J. W. **Handling and Preservation of Fruits and Vegetables by Combined Methods for Rural Areas**. Roma: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2003.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA JÚNIOR, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods – Fundamentals and Applications**. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

BARREIRO, J. A.; FERNÁNDEZ, S.; SANDOVAL, A. J. Water sorption characteristics of six row barley malt (*Hordeum vulgare*). **LWT - Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 37-42, 2003.

BASTOS, S. M. C. B. **Propriedades termodinâmicas de adsorção de água de dois genótipos de arroz-vermelho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Goiás. 2009.

BETIOL, L. F. L.; EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; BASSO, R. C.; GULLÓN, B.; LORENZO, J. M.; BARRETTO, A. C. S.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT – Food Science and Technology**, v. 123, p. 109112, 2020.

BATISTA, C. S.; COUTO, S. M.; CECON, P. R.; PEIXOTO, A. B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial café, n.6, p.42-53, 2003.

BECKERT, O. P.; MIGUEL, M. H.; MARCOS FILHO, J. Absorção de água e potencial fisiológico em sementes de soja de diferentes tamanhos. **Scientia Agrícola**, v. 57, p. 671-675, 2000.

BERNFELD, P. **Amylase α and β in methods in enzymology**. In: Colowick, S.P., Kaplan, N. (Eds.). New York: Academic Press, 1955, 149p.

BETIOL, L. F. L.; EVANGELISTA, R. R.; SANCHES, M. A. R.; BASSO, R. C.; GULLÓN, B.; LORENZO, J. M.; BARRETTO, A. C. S.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and chemical composition on water sorption isotherms for dry-cured ham. **LWT – Food Science and Technology**, v. 123, p. 109112, 2020.

BEUCHAT, L. R. Microbial stability as affected by water activity. **Cereal Foods World**, v. 26, n. 7, p. 345-349, 1981.

BEUCHAT, L. R. Influence of water activity on growth, metabolic activities and survival of yeasts and molds. **Journal of Food Protection**, v. 46, n. 2, p. 135-141, 1983.

BHATTY, R.S. Note on the development of proteolytic enzymes in germinating barley. **Cereal Chemistry**, v. 47, p. 74-77, 1969.

BIAZUS, J. P. M.; SOUZA, R. R.; CURVELO-SANTANA, J. C.; TAMBOURGI, E. B. Otimização da secagem do malte de *Zea mays*. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 4, p. 787-792, 2006.

BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 4, p. 489-495, 2004.

BONAFACCIA, G.; GALLI, V.; FRANCISCI, R.; MAIR, V.; SKRABANJA, V.; KREFT, I. Characteristics of spelt wheat products and nutritional value of spelt wheat-based bread. **Food Chemistry**, v. 68, n. 2000, p. 437-441, 2000.

BONNER, I. J.; KENNEY, K. L. Moisture sorption characteristics and modeling of energy sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench). **Journal of Stored Products Research**, v. 52, p. 128-136, 2013.

BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 — a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 13, n. 3, p. 159–174, 1978.

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 efetivo de grãos de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 260-272, 2015.

BOULTON, C.; QUAIN, D. **Brewing Yeast and Fermentation**. John Wiley & Sons, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº7 de 15 de agosto de 2001. **Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade do Trigo**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2001. 33 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento /Secretaria De Defesa Agropecuária. Instrução Normativa Nº 36, de 4 de Outubro de 2017. Normas Para Certificação De Sementes Destinadas à União Europeia. Diário Oficial da União. Brasília, 2017.

BRASIL. ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 1978. Resolução - CNNPA nº 12, de 1978. Disponível em: <<https://sogi8.sogi.com.br/Arquivo/Modulo113.MRID109/Registro4760/documeto%201.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2020.

BRIGGS, D. E. Malt modification—a century of evolving views. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 108, n. 4, p. 395-405, 2002.

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. **Brewing: Science and Practice**. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2004.

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

BROWN, H. T.; MORRIS, G. H. Researches on the germination of some of the Gramineae. **American Journal of Pharmacy (1835-1907)**, p. 417, 1890.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On the theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.

BRUNAUER, S.; EMMET, T. H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

BRYCE, J. H.; GOODFELLOW, V.; AGU, R. C.; BROSNAN, J. M.; BRINGHURST, T. A.; JACK, F. R. Effect of different steeping conditions on endosperm modification and quality of distilling malt. **J. Inst. Brew**, v. 116, n. 2, p. 125-133, 2010.

BUSCH, J. More Beer, 2015. Disponível em: <<https://www.morebeer.com/articles/advancedmashing>>

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**, v. 38, n. 6, p. 941-950, 2018.

CALATAYUD, M. V.; COSÍN, D. A.; CÁNOVAS, R. R.; GÓMEZ, M. L. C.; ORTOLÁ, M. D. O. Modeling of the soaking and drying stages for Senia-type precooked rice. **Cereal Chemistry**, v. 98, n. 3, p. 814-823, 2021.

CAMPONOGARA, Alexandre et al. O atual contexto da produção de trigo no Rio Grande do Sul. **REGET/UFSM.**, Santa Maria, v.19, n. 2, mai-ago 2015 p. 246-257.

CANZIANI, J.R.; GUIMARÃES, V.D.A. O trigo no Brasil e no mundo: cadeia de produção, transformação e comercialização. In: CUNHA, G.R. **Oficina sobre trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa, p. 29-72, 2009.

CARVALHO, D. B.; CARVALHO, R. I. N. Qualidade fisiológica de sementes de guaxuma em influência do envelhecimento acelerado e da luz. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 489-494, 2009.

CARVALHO, G. R. **Aplicação de ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para produção de malte**. 2018. Tese. 123f. (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, São José do Rio Preto, 2018.

CARVALHO, G. R.; POLACHINI, T. C.; DARROS-BARBOSA, R.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Effect of intermittent high-intensity sonication and temperature on barley steeping for malt production. **Journal of Cereal Science**, v. 82, p. 138-145, 2018.

CARVALHO, P. T. **Trigo com germinação pré-colheita na produção de malte**. 2015. Tese. 129f. (Doutorado em Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos. Londrina, 2015.

CHEN, C. C.; MOREY, R. V. Comparison of four EMC/ERH equations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 32, n. 3, p. 983-990, 1989.

CHEN, C. Factors which effects equilibrium relative humidity of agricultural products. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.43, n.3, p.673-683, 2000.

CHEN, Z.; WANG, R.; LI, X.; ZHU, J.; XU, Y.; LIU, J. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of cold plasma treated milled rice. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 55, p. 35-47, 2019.

CHHINNAN, M.S.; BEUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **LWT – Food Science & Technology**, v. 18, p. 83-88, 1985.

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 — A review. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 159-174, 1978.

CHOUDHURY D.; SAHU J.K.; SHARMA G.D. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and properties of sorbed water of raw bamboo (*Dendrocalamus longispatus*) shoots. **Industrial Crops and Products**, v.33, n. 1, p. 211-216, 2011.

CONAB. **Trigo – Análise Mensal – Junho 2020**. Brasília: Conab, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-trigo/item/13911-trigo-analise-mensal-junho-2020>>. Acesso em: 31 de julho de 2020.

CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor esotérico de dessorção para grãos de trigo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.7, p.39-48, 2005.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 665-670, 2006.

CORRÊA, P. C.; SILVA F. S.; JAREN C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; ARANA, I. Physical and mechanical properties in rice processing. **Journal of Food Engineering**, v. 79; n. 1, p. 137-142, 2007.

CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 34, n. 6, p. 993-1008, 2010.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. Determination Of Hygroscopic Equilibrium Isotherms Of Crambe Fruit By Dynamic Method. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 382-391, 2015.

COULTATE, T. P. Food – The chemistry of its components. **The Royal Society of Chemistry Paperbacks (3rd ed.) chapter**, v. 3, p. 29-53, 1996.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M.; BASTOS, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1999.

CUNHA, L. M.; OLIVEIRA, F. A. R.; ABOIM, A. P.; FRÍAS, J. M.; PINHEIRO-TORRES, A. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, n. 3, p. 253-262, 2001.

CURVELO SANTANA, J. C.; ARAÚJO, S. A.; LIBRANTZ, A. F. H.; TAMBOURGI, E. B. Optimization of Corn Malt Drying by Use of a Genetic Algorithm. **Drying Technology**, v. 28, n. 11, p. 1236-1244, 2010.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2010.

DANNENBERG, F.; KESSLER, H.-G. Reaction kinetics of the denaturation of whey proteins in milk. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 1, p. 258-263, 1988.

DE MORI, C.; MINELLA, E. Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, 2012. 28 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 139). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do139.htm.

DENDY, D.A.V.; DOBRASZCYK, B.J. Cereales y Productos Derivados: Química y Tecnología. **Zaragoza: Acribia**, 2001, 537 p.

DEPRAETERE, S.A.; DELVAUX, F.; COGHE, S.; DELVAUX, F.R. Wheat variety and barley malt properties: influence on haze intensity and foam stability of wheat beer. **Journal of Institute of Brewing**, v. 110, n. 3, p. 200-206, 2004.

DEWETTINCK, K.; VAN BOCKSTAELE, F.; KÜHNE, B.; VAN DE WALLE, D.; COURTENS, T. M.; GELLYNCK, X. Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception - Review. **Journal of Cereal Science**, v.48, n.2, p.243-257, 2008.

DING, J.; YANG, T.; FENG, H.; DONG, M.; SLAVIN, M.; XIONG, S.; ZHAO, S. Enhancing contents of γ -aminobutyric acid (GABA) and other micronutrients in dehulled rice during germination under normoxic and hypoxic conditions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 5, p. 1094-1102, 2016.

DING, J.; HOU, G. G.; NEMZER, B. V.; XIONG, S.; DUBAT, A.; FENG, H. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication. **Food Chemistry**, v. 243, n. 15, p. 214-221, 2018.

DITCHFIELD, C. **Estudo dos métodos para medida da atividade de água**. 2000. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

EBC, **Analytica-EBC**. Real Degree of Fermentation of Beer. 9.5, 2000.

EKKA, J. P.; PALANISAMY, M. Determination of heat transfer coefficients and drying kinetics of red chilli dried in a forced convection mixed mode solar dryer. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 19, p. 100607, 2020.

EL-DASH, A; MIRANDA de M. Z. Farinha integral de trigo germinado. Características Nutricionais e estabilidade ao armazenamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, n. 3, p. 216-223, 2002.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. A importância do trigo para a sustentabilidade da agricultura brasileira. 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/23416523/artigo---a-importancia-do-trigo-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2020.

ERBAS, M.; AYKIN, E.; ARSLAN, S.; DURAK, A. N. Adsorption behaviour of bulgur. **Food Chemistry**, v. 195, p. 87-90, 2016.

ESKIN, N. A. M. Biochemistry of food processing: browning reactions in foods. **Biochemistry of foods**, v. 2, 1990.

FAN, J.; SIEBENMORGEN, T. J.; MARKS, B. P. Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice. **Applied Engineering in Agriculture**, v.16, n.3, p. 245-251, 2000.

FERNANDES, L. S.; CORRÊA, P. C.; DINIZ, M. D. M. S.; LEITE, D. M.; VASCONCELLOS, D. S. L. **Biosci. J.**, Uberlandia, v. 30, supplement 1, p. 219-223, June/14.

FICCO, D. B. M.; BORRELLI, G. M.; MIEDICO, O.; GIOVANNIELLO, V.; TARALLO, M.; POMPA, C.; DE VITA, P.; CHIARAVALLE, A. E. Effects of grain debranning on bioactive compounds, antioxidant capacity and essential and toxic trace elements in purple durum wheats. **LWT – Food Science and Technology**, v. 118, p. 108734, 2020.

FIEP. **Panorama Setorial Industria do Trigo Paraná 2016**. Disponível em: <[http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/Panorama_do_Trigo_final_Alta\[76388\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/Panorama_do_Trigo_final_Alta[76388].pdf)>. Acesso em: 31 de julho de 2020.

FRACASSO, A. F.; PERUSSELLO, C. A.; HAMINIUKI, C. W. I.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Hydration kinetics of soy beans: Transgenic and Conventional cultivars. **Journal of Cereal Science**, v. 60, p. 584-588, 2014.

FRANCESCHINA, C. S. **Digestibilidade da proteína e proteína verdadeira solúvel de coprodutos de trigo para suínos em crescimento**. 2013. 34f. Trabalho apresentado como requisito parcial para graduação em Medicina Veterinária, Faculdade de Veterinária, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J.; KOHAYAKAWA, M. N.; SILVEIRA Jr, V.; PEDRO, M. A. M. Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.297-303, 2005.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes: Momentum, Heat and Mass**, Series in engineering. 350p, 1983.

GEORG-KRAEMER, J. E.; MUNDSTOCK, E. C.; CAVALI-MOLINA, S. Developmental expression of amylases during barley malting. **Journal of Cereal Science**, v.33, p. 279-288, 2001.

GIBSON, T. S.; SOLAH, V.; HOLMES, M. G.; TAYLOR, H. R. Diastatic power in malted barley: contributions of malt parameters to its development and the potential of barley grain beta-amylase to predict malt diastatic power. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 101, n. 4, p. 277-280, 1995.

GIBSON, G. Malting. In: **Cereals Processing Technology**. Wood head Publishing, p. 173-203, 2001.

GICHAU, A. W.; OKOTH, J. K.; MAKOKHA, A. Moisture sorption isotherm and shelf life prediction of complementary food based on amaranth–sorghum grains. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 3, p. 962-970, 2020.

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

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

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

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

GREEN, D. The Science of Step Mashing. **The How-To Homebrew Beer Magazine**, 2008. Disponível em: <<https://byo.com/mead/item/1497-the-science-of-stepmashing>>.

GUIMARÃES, B. **Aplicação de ultrassom de potência para a produção de malte de trigo**. 2019. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, São José do Rio Preto, 2019.

GUIMARÃES, B.; POLACHINI, T. C.; AUGUSTO, P. E. D.; TELIS-ROMERO, J. Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 155, p. 108045, 2020.

GUTKOSKI, L. C.; JACOBSEN NETO, R. Procedure to laboratorial test of bread making: form bread type. **Ciência Rural**, v. 32, n. 5, p. 873-879, 2002.

GWIRTZ, J. A.; WILLYARD, M. R.; MCFALL, K. L. W. Wheat: more than just a plant. In: MÜHLENCHÉMIE. Future of flour: a compendium of flour improvement. 2014. Disponível em: <<http://muehlenchemie.de/english/know-how/future-of-flour.html>>. Acesso em: 11 janeiro de 2020.

HADDAD, Y.; BENET, J. C.; DELENNE, J. Y.; MERMET, A.; ABECASSIS, J. Rheological Behaviour of Wheat Endosperm—Proposal for Classification Based on the Rheological Characteristics of Endosperm Test Samples. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p.105-113, 2001.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **The Journal of Chemical Physics**, v. 16, n. 10, p. 931-937, 1948.

HARDMAN, T. M. **Water and food quality**. 1st ed. Londres: Elsevier, 1987.

HENDERSON, S. M., PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 06, p. 169-174, 1961.

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

HENRY, R. J.; KETTLEWELL, P. S. **Cereal grain quality**. London: Chapman & Hall, 1996.

HOSENEY, R. C. **Principles of cereal science and technology**. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 327p, 1986.

HOSENEY, R. C. **Principios de ciencia y tecnologia de los cereales**. Zaragoza: Acribia, 321p, 1991.

HOSENEY, C. A. **Principles of Cereal Technology**. 2 ed. American Association of Cereal Chemists Inc., St Paul, Minnesota. 1998.

HOUGH, J. S.; BRIGGS, D. E.; STEVENS, R.; YOUNG, T. W. **Malting and brewingscience**. 2a ed. Chapman & Hall: New York, 1982.

HUNG, P. V.; HATCHER, D. W.; BARKER, W. Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. **Food Chemistry**, v. 126, n. 4, p. 1896-1901, 2011.

IAC - Instituto Agronômico de Campinas. Informações Técnicas: Cultivo de Trigo Duro no Brasil. **O Agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 1, 2000.

IZYDORCZYK, M. S., MACGREGOR, A. W. Evidence of intermolecular interactions of Eglucans and arabinoxylans. **Carbohydrate Polymers**, v. 41, p. 417-420, 2000.

JIN, Y.; ZHANG, K.; DU, J. Effects of Wheat Protein Content on Endosperm Composites and Malt Quality. **Journal of The Institute of Brewing**, v. 114, n. 4, p. 289-293, 2008.

JIN, Y. H.; DU, J. H.; ZHANG, K. L.; ZHANG, X. C. Effects of wheat starch contents on malt qualities. **Journal of The Institute of Brewing**, v. 117, n. 4, p. 534-540, 2011.

JIN, Y. L., Speers, R. A., Paulson, A. T., Stewart, R.J. 2004. Barley E-glucan and their degradation during malting and brewing. **Technical Quaterly-Master Brewers Association of the Americas**, 41, 231-240.

JIN, Y.; TANG, J.; SABLANI, S. S. Food component influence on water activity of low-moisture powders at elevated temperatures in connection with pathogen control. **LWT – Food Science and Technology**, v. 112, p. 108257, 2019.

JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H. F. T.; SPIESS, W. E. L.; VOS, G. **Physical properties of food**. London, UK and New York, USA: Applied Science Publishers, 1983.

KANNENBERG, J. R.; FULAYTER, B., **Process for drying malt**. U.S. Patente.US: 5637336, 1997.

KAREL, M.; LUND, D. B. **Physical Principles of Food Preservation**. CRC Press, 2003.

KARIMI, F.; RAFIEE, S.; TAHERI-GARAVAND, A.; KARIMI, M. Optimization of an air drying process for Artemisia absinthium leaves using response surface and

artificial neural network models. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v.43, Issue 1, p. 29-39, 2012.

KARTIKA, A. I. S.; YULIANI, S.; KAILAKU, S.I.; RIGAL, L. Moisture sorption behaviour of jatropha seed (*Jatropha curcas*) as a source of vegetable oil for biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 226-233, 2012.

KASHANINEJAD, M.; DEHGHANI, A. A.; KASHIRI, M. Modeling of wheat soaking using two artificial neural networks (MLP and RBF). **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 602-607, 2009.

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, n. 4, p. 1383-1390, 2007.

KASHIRI, M.; GARMAKHANY, A. D.; DEHGHANI, A. D. Modelling of sorghum soaking using artificial neural networks (MLP). **Quality Assurance and Safety Crops & Foods**, v. 4, n. 4, p. 179-184, 2012.

KHAZAEI, J. MOHAMMADI, N. Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 542–552, 2009.

KOEHLER, P.; HARTMANN, G.; WIESER, H.; RYCHLIK, M. Changes of folates, dietary fiber, and proteins in wheat as affected by germination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 12, p. 4678-4683, 2007.

KUNTZ, R.J.; BAMFORTH, C.W. Time course for the development of enzymes in barley. *Journal Institute of Brewing*, v.113, p. 196-205, 2007. Disponível em: <<http://www.scientificsocieties.org/4098782E-6027-4464-9EF0-4AFD89C45DB3/>>.

KUNZE, W; **Tecnologie Brauer Malzer**. 7th ed, Ed VLB, Berlin Ale, 1994.

KUNZE, W. **Brewing and Malting**. Berlin: Vlb, p. 18-152, 2004.

KUNZE, W. **Tecnologia para Cerveceros y Malteros**, VBL, Berlin Germany, 2006.

LABUZA, T. Creation of moisture sorption isotherms for hygroscopic materials. Sorption isotherm methods. In. **International Symposium on Humidity and Moisture**, v. Washington, 1963.

LABUZA, T.P. Sorption phenomena phenomena in foods. **Food Technology**, v. 22, p. 263-272, 1968.

LABUZA, T. P. Water content and stability of low moisture and intermediate moisture foods. **Food Technology**, v. 24, p. 543-550, 1970.

LAZOUK, M. A.; SAVOIRE, R.; KADDOUR, A.; CASTELLO, J.; LANOISELLÉ, J. L.; HECKE, E. V.; THOMASSET, B. Oilseeds sorption isotherms, mechanical

properties and pressing: Global view of water impact. **Journal of Food Engineering**, v. 153, p. 73-80, 2015.

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

LIMA, U. A. **Matérias primas dos alimentos**. Blucher Ed., pp. 62, 2010.

LI, P.; LI, Y.; WANG, L.; ZHANG, H.; QI, X.; QI, H. Study on water absorption kinetics of black beans during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 283, p. 110030, 2020.

LI, X.; CAO, Z.; WEI, Z.; FENG, Q.; WANG, J. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China. **Journal of Stored Products Research**, v. 47, n. 1, p. 39-47, 2011.

LI, Y.; SCHWARZ, P. B.; BARR, J.M.; HORSLEY, R. D. Factors predicting malt extract within a single barley cultivar. **Journal of Cereal Science**, v. 48, p. 531-538, 2008.

LIU, Y.; ZENG, Y.; HU, X.; SUN, X. Effect of ultrasonic power on water removal kinetics and moisture migration of kiwifruit slices during contact ultrasound intensified heat pump drying. **Food Bioprocess Technology**, v. 13, p. 430-441, 2020.

LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R. L. TING, E. C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. Transactions of the ASAE, St Joseph, v. 33, n.2, p. 559-565, 1990.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations part II: Milk, coffee, tea, nuts, oilseeds, spices and starchy foods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 118-124, 1985.

LOTTERMANN, M. T. **Purificação e caracterização estrutural de uma α -amilase de *Cryptococcus flavus* expressa em *Saccharomyces cerevisiae* "MFL"**. 2012. 71f. Dissertação (Mestrado em Biologia Molecular) - Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

LOWE, D. P.; ARENDT, E. K. The use and effects of lactic acid bacteria in malting and brewing with their relationships to antifungal activity, mycotoxins and gushing: A review. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 110, n. 3, p. 163-180, 2004.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v. 28, n. 2, p. 109-119, 1996.

MAKAWY, M. M.; EL-SAYD, N. I. Comparison of Methods for Determination of Moisture in Food 1. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v. 6, n. 6, p. 906-911, 2010.

MALTEUROP. **Os nossos domínios – Maltagem**. Mateurop Inc. html. Disponível em: < <https://pt.malteurop.com/os-nossos-dominios/maltes/maltagem>>. 2018. Acesso em: 03 de fevereiro de 2020.

MANDARINO, J. M. G. **Componentes do trigo: características físico-químicas, funcionais e tecnológicas**. Londrina, EMBRAPA-CNPSo, n. 75, 36p, 1994.

MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/trigo>>. Acesso em jan/2020.

MARABI, A.; SAGUY, I. S. Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 84, n. 10, p. 1105-1110, 2004.

MARKOWSKI, M.; BIAŁOBRZEWSKI, I.; MODRZEWSKA, A. Kinetics of spouted-bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 3, p. 380-387, 2010.

MARSH, A. J.; HILL, C.; ROSS, R. P.; COTTER, P. D. Fermented beverages with health-promoting potential: Past and future perspectives. **Trends in Food Science & Technology**, v. 38, n. 2, p. 113-124, 2014.

MARTI, A.; CARDONE, G.; PAGANI, M. A.; CASIRAGHI, M. C. Flour from sprouted wheat as a new ingredient in bread-making. **LWT – Food Science and Technology**, v. 89, p. 237-243, 2018.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊ, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 03, p. 301-306, 2007.

MARTINS, V. M. R.; RODRIGUEZ, M.A. Produção e tecnologia de cereais: processo de maltagem da cevada. In: RODRIGUEZ, M. A. *et al.* **Jornada de lúpulos e Cervejas: novas oportunidades de negócio**. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança. Dez. 2015. Cap.4, p. 37-51.

MATTIODA, F.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M.M. Wheat hydration process intensification by periodic operation. **Journal of Food Engineering**, v. 246, p. 153-159, 2019.

MIANO, A. C.; AUGUSTUS, P. E. D. The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 17, n. 2, p. 352-370, 2018.

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

MÓDENES, A. N.; SILVA, A. M.; TRIGUEROS, D. E. G. Avaliação das propriedades reológicas do trigo armazenado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 3, 508-512, 2009.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

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

MONTANUCI, F. D. **Avaliação do efeito das variáveis de processo na produção de malte de cevada e na produção de bebidas tipo chá**. 2014. 129p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 690-698, 2013.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; PRIETO, D. M.; TORRES, M. D. Water Adsorption Isotherms of Chia (*Salvia hispanica* L.) Seeds. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 3, p. 1077-1082, 2012.

MOUSIA, Z.; EDHERLY, S.; PANDIELLA, S. S.; WEBB, C. Effect of wheat pearling on flour quality. **Food Research International**, v.37, p. 449-459, 2004.

NELSON, K.; STOJANOVSKA, L.; VASILJEVIC, T.; MATHAI, M. Germinated grains: a superior whole grain functional food? **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 91, n. 6, p. 429-441, 2013.

NETO, R. A. T.; DENIZO N.; QUAST, D. G. **Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos**. v. 7, p. 191-206, 1976.

NOELLO, C.; BIDUSKI, B.; CAREGNATTO, G.; ELIAS, M. C.; GUTKOSKI, L. C. Avaliação da atividade enzimática de malte de trigo. **Acta Iguazu**, v. 1, n. 4, p. 78-82, 2012.

OKOS, M. R.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R. K. Food dehydration, in **Handbook of Food Engineering**, Heldman, R.; Lund, D. B., Eds., Marcel Dekker, Inc., NY, 1992.

OLI, P.; WARD, R.; ADHIKARI, B.; TORLEY, P. Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. **Journal of Food Engineering**, v. 124, p. 173-183, 2014.

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

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

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CAMPOS, R. C.; DE SOUZA, K. A. Propriedades termodinâmicas de sementes de Tucumã-de-Goiás (*Astrocaryumhuaimi* Mart.). **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 53-62, 2014a.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUSA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. S. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-manso. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, supplement 1, p. 147-157, 2014b.

OMOTO, E. S. **Modelagem da hidratação de grãos de ervilha segundo a hipótese de volume constante**. 2006. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Paraná, Paraná, Maringá, 2006.

ORTH, R. A.; SHELLENBERGER, J. A. Origin, production, and utilization of wheat. In: POMERANZ, Y. (ed) **Wheat: chemistry and technology**. 3a ed., v. 1, St. Paul (USA): AACC, 1988, 514 p.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 65, n. 12, p. 419-421, 1946.

OWENS, G. Cereal processing technology. In: EVANS, E. J. **Cereal production methods**. CRC Press. 2001.

PALMER, J.J. How to brew: **Everything You Need to Know to Brew Beer Right the First Time**. Estados Unidos: Natl Book Network. 2006.

PALIPANE, K. B.; DRISCOLL, R. H. Moisture sorption characteristics of in shell macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**, California, v.18, p.63-76, 1992.

PAPAZIAN, Charlie. **The Complete Joy of Homebrewing**. 4. ed. New York: HarperCollins, 2014.

PARKES, S. Understanding Enzymes: Homebrew Science. **The How-To Homebrew Beer Magazine**, 2001. Disponível em: <<https://byo.com/mead/item/1543-understandingenzymes-homebrew-science>>.

PELEG, M. An empirical-model for desorption of moisture sorption curve. **Journal of Food Science**, v. 53, p. 1216-1219, 1988.

PELIZER, L. H.; DANESI, E. D. G.; RANGEL, C. O.; SASSANO, C. E. N.; SATO, S.; MORAES, I. O. Influence of inoculum age and concentration in *Spirulina platensis* cultivation. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 3, p. 371-375, 2003.

PINEDA-GÓMEZ, P.; ROSALES-RIVEIRA, A.; RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E. Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermo-alkaline treatment. **Journal of Food Engineering**, v. 113, n. 3, p. 434-441, 2012.

PIRES, C. V.; OLIVEIRA, M. G. A.; ROSA, J. C.; COSTA, N. M. B. Qualidade nutricional e escore químico de aminoácidos de diferentes fontes proteicas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 1, p. 179-187, 2006.

PIRES, M. J. A importância nutricional do trigo. **Web artigos**, 2012.

PLATEL, K.; EIPESON, S. W.; SRINIVASAN, K. Bioaccessible mineral content of malted finger millet (*Eleusine coracana*), wheat (*Triticum aestivum*), and barley (*Hordeum vulgare*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 13, p. 8100-8103, 2010.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; LOPES-FILHO, J. F.; TELIS-ROMERO, J. Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, v. 632, p. 79-85, 2016.

POMERANZ, Y. Composition and functionality of wheat flour components. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Wheat: chemistry and technology**, 3.ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, Inc., v.2, p. 219- 370, 1988.

POPPER, L.; SCHÄFER, W.; FREUND, W. **Future of Flour – A Compendium of Flour Improvement**. Kansas City: Agrimedia, 325p, 2006.

POREDA, A. BIJAK, M.; ZDANIEWICZ, M.; JAKUBOWSKI, M.; MAKAREWICZ, M. Effect of wheat malt on the concentration of metal ions in wort and brew house by-products. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 121, n. 2, p. 224-230, 2015.

POSNER, E. S. Wheat. In: KULP, K.; PONTE-JUNIOR, J. G. (Eds.). **Handbook of cereal science and technology**. 2. ed. New York: CRC Press, p. 1-30, 2000.

PRASAD, K.; VAIRAGAR, P. R.; BERA, M. B. Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 483-488, 2010.

PUSHPADASS, H. A.; EMERALD, F. M. E.; CHATURVEDI, B.; RAO, K. J. Moisture sorption behavior and thermodynamic properties of gulabjamun mix. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.38, n. 6, p. 2192-2200, 2013.

QI, J. C.; ZHANG, G.P.; ZHOU, M. X. Protein and hordein content in barley seeds as affected by nitrogen level and their relationship to beta-amylase activity. **Journal of Cereal Science**, v. 43, p. 102-107, 2006.

RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook**. 1st ed. CRC Press, Boca Raton, 1995.

RAHMAN, M. S. **Handbook of Food Preservation**. Nova York: CRC Press, 2007.

REBELLO, F. D. F. P. Produção de Cerveja. **Revista Agrogeoambiental**, p. 145-155, 2009.

REGULY, J.C. **Biotecnologia de Processos Fermentativos e suas Matérias Primas**. Pelotas: UFPEL, p. 321, 1996.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora*

Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 31, n. 2, p.189-196, 2009.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho, e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 1, p. 15-24, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. Isotermas e calor isostérico de dessorção do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.31, p. 91-99, 2006a.

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, 2006b.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 3, p. 373-378, 2007.

RICE, T.; SAHIN, A. W.; HEITMANN, M.; LYNCH, K. M.; JACOB, F.; ARENDT, E. K.; COFFEY, A. Application of mannitol producing *Leuconostoc citreum* TR116 to reduce sugar content of barley, oat and wheat malt-based worts. **Food Microbiology**, v. 90, p. 103464, 2020.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (Eds.). **Engineering Properties of Foods**. 3rd. ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2005.

ROCA, E.; GUILLARD, V.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Moisture migration in a cereal composite food at high water activity: Effects of initial porosity and fat content. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 2, p. 144-151, 2006.

ROCKLAND, L. B.; BEAUCHAT, L. R. **Water activity: theory and application to food**. Nova York: CRC Press, 1987

ROSA, D. P.; CANTÚ-LOZANO, D.; LUNA-SOLANO, G.; POLACHINI, T. C.; TELIS-ROMERO, J. Modelagem matemática da cinética de secagem de semente de laranja. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 3, p. 291-300, 2015.

SAIKA, H., NAKAZONO, M., IKEDA, A., YAMAGUCHI, J., MASAKI, S., KANEKATSU, M., & NEMOTO, K. A transposon-induced spontaneous mutation results in low α - and β -amylase content in rice. **Plant Science**, v. 169, p. 239-244, 2005. DOI: 10.1080/1343943X.2016.1140008

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHERE, F.; MEULENAERB. D.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 168-175, 2007.

SANDRIN, R. **Caracterização Físico-química de diferentes frações da aveia (*Avena sativa* L) e atividade antioxidante de seus extratos**.2013. 167f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SANDULACHI, E. Water Activity Concept and Its Role In Food Preservation. **Meridian Engineering**, v. 4, p. 40-48, 2012.

SANTOS, I. J.; COUTO, S. M.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem em camada fina do malte verde de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 3, n. 1, p. 53-59, 2001.

SANTOS, I. J.; SANTOS, Y. L.; OLIVEIRA, M. G. A.; SILVA, P. H. A. Expressão da alfa e beta amilase durante a germinação de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.12, n.1, p. 67-73, 2010.

SCHEUER, P. M.; FRANCISCO, A.; MIRANDA, M. Z.; LIMBERGER, V. M. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.2, p. 211-222, 2011.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 553-559, 2009.

SCHMITT, M. R.; MARINAC, L. Beta-amylase degradation by serine endo proteinases from green barley malt. **Journal of Cereal Science**, v. 47, p. 480-488, 2007.

SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. **Annals of Statistics**, v. 2, n. 5, p. 347-370, 1978.

SERNA-SALDIVAR, S. O. **Cereal Grains Properties, Processing and Nutritional Attributes**. CRC Press. 796p. 2010.

SHEWRY, P.R.; CHARMET, G.; BRANLARD, G.; LAFIANDRA, D.; GERGELY, S.; SALGADO, A.; SAULNIER, L.; BEDIO, Z.; CLARE MILLS, E.N.; WARD, J.L. Developing new types of wheat with enhanced health benefits. **Trends in Food Science & Technology**, v. 25, n. 2, p. 1-8, 2012.

SILVA, D. A. R. O.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Kinetics study and modelling of sorghum grain hydration. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 1, p. 44-53, 2019.

SILVA, D. B.; GUERRA, A.F.; REIN, T.A.; ANJOS, J.R.N.; ALVES, R.T.; RODRIGUES, G.C.; SILVA, I.A.C. **Trigo para o abastecimento familiar: do plantio à mesa**. Brasília: EMBRAPA-SPI, Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 176p, 1996.

SILVA, F.; NOGUEIRA, L. C.; GONÇALVES, C.; FERREIRA, A. A.; FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; TEIXEIRA, N. Electrophoretic and HPLC methods for comparative study of the protein fractions of malts, worts and beers produced from Scarlett and Prestige barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. **Food Chemistry**, v.106, p. 820-829, 2008.

SILVA, K. S.; POLACHINI, T. C.; LUNA-FLORES, M.; LUNA-SOLANO, G.; RESENDE, O.; TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. **Journal Food Process Engineering**, 2021, e13784. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13784>.

SILVEIRA, F. G. DA.; SILVA, F. F.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C. H. M. Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovinos de corte. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 1, p. 62-73, 2012.

SINGH, K. P.; MISHRA, H. N.; SAHA, S. Sorption Isotherms of Barnyard Millet Grain and Kernel. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 5, p. 788-796, 2011.

SINGH, S.; KUMAR, S. New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. **Solar Energy**, v. 86, n. 7, p. 1981-1991, 2012.

SLAVIN, J. Why whole grains are protective: biological mechanisms. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 62, p. 129-134. 2003.

SORMOLI, E. M.; LANGRISH, T. A. G. Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 875-882, 2015.

SOARES, M. A. B.; JORGE, L. M. M.; MONTANUCI, F. D. Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. **Food Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 638-645, 2016.

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

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SPADA, J. C.; NOREÑA, C. P. Z.; MARCZAK, L. D. F.; TESSATO, I. C. Water adsorption isotherms of microcapsules with hydrolyzed pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch as wall material. **Journal of Food Engineering**, v. 114, n. 1, p. 64-69, 2013.

SPAGGIARI, M.; CALANI, L.; FOLLONI, S.; RANIERI, R.; DALL'ASTRA, C.; GALAVERNA, G. The impact of processing on the phenolic acids, free betaine and choline in *Triticum* spp. L. whole grains and milling by-products. **Food Chemistry**, v. 311, p. 125940, 2020.

STARZYŃSKA-JANISZEWSKA, A.; STODOLAK, B.; SOCHA, R.; MICKOWSKA, B.; WYWROCKA-GURGIL. Spelt wheat tempe as a value-added whole-grain food product. **LWT – Food Science & Technology**, v. 113, p. 108250, 2019.

TAITANO, L. Z.; SINGH, R. P.; LEE, J. H.; KONG, F. Thermodynamic analysis of moisture adsorption isotherms of raw and blanched almonds. **Journal of Food Process Engineering**, v. 35, n. 6, p. 840-850, 2012.

TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, n. 1-2, p. 49-56, 2000.

THOMPSON, T. L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 15, n. 2, p. 333-337, 1972.

THYS, R. C. S.; NOREÑA, C. P. Z.; MARCZAK, L. D. F.; AIRES, A. G.; CLADERA-OLIVERA, F. Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 3, p. 468-473, 2010.

TIMMERMAN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 1, p. 19-31, 2001.

TOĞRUL, H.; ARSLAN, N. Moisture Sorption Behaviour and Thermodynamic Characteristics of Rice stored in a Chamber under Controlled Humidity. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 2, p. 181-195, 2006.

TOLABA, M. P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N. POLLIO, M. L. Grain sorption equilibria of quinoa grains. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 365-371, 2004.

TSCHOPE, E. C.; NOHEL, F. **A malteação da cevada**. Vassouras: Senai-RJ, p. 272, 1999.

TSOTSAS, E.; MUJUMDAR, A. S. **Modern Drying Technology - Volume 3: Product Quality and Formulation**. 1st ed. New York: Wiley, 2011.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, L. M. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 64-69, 2015.

VAN DER BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: **Engineering and Food**. London: B. M. McKenna, Elsevier Applied Science, v. 1, p. 311-321, 1984.

VAN DER BERG, C. **Water activity**. In: MACCARTHY, D. ed. Concentration and drying of foods. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. 11-36 p.

VENTURINI, W.G. CERADA, M.P. Cerveja. In: AQUARONE, E. *et al.* **Biotechnologia Industrial: Biotechnologia em alimentos**. São Paulo: Blucher, Cap.4, p. 91-143, 2013.

VELÁZQUEZ-GUTIÉRREZ, S. K.; FIGUEIRA, A. C.; RODRÍGUEZ-HUEZO, M. E.; ROMÁN-GUERRERO, A.; CARRILLO-NAVAS, H.; PÉREZ-ALONSO, C. Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). **Carbohydrate Polymers**, v. 121, p. 411-419, 2015.

VIGANÓ, J.; GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J. Moisture sorption characteristics of pineapple processing waste: Shell and central cylinder. **Journal of Food Process Engineering**, v. 37, n. 2, p. 100-110, 2014.

WAN, J.; DING, Y.; ZHOU, G.; LUO, S.; LIU, C.; LIU, F. Sorption isotherm and state diagram for indica rice starch with and without soluble dietary fiber. **Journal of Cereal Science**, v. 80, p. 44-49, 2018.

WATERS, D. M.; COFFEY, A. M. A.; ARENDT, E. K.; ZANNINI, E. Lactic Acid Bacteria as a Cell Factory for the Delivery of Functional Biomolecules and Ingredients in Cereal-Based Beverages: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 4, p. 503-520, 2014.

WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 22, n. 4, p. 1079-1106, 1993.

WROBEL, R., JONES, B.L. Electrophoretic study of substrate and pH dependence on endoproteolytic enzymes in green malt. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 98, p. 471-478, 1992.

XIAO, Z.; STORMS, R.; TSANG, A. A quantitative starch-iodine method for measuring alpha-amylase and glucoamylase activities. **Analytical Biochemistry**, v. 351, p. 146-148, 2006.

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

ZSCHOERPER, O. P. **Apostila curso cervejeiro e malteador – AMBEV**. Porto Alegre: 2009.