

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
ENGENHARIA QUÍMICA**

**LUIZA NUNES PORTINHO**

**ANÁLISE DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA VIA  
SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CEVADA (*Hordeum vulgare* L.) EM LEITO FIXO  
E CAMADA DELGADA**

**Bagé  
2022**

**LUIZA NUNES PORTINHO**

**ANÁLISE DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA VIA  
SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CEVADA (*Hordeum vulgare* L.) EM LEITO FIXO  
E CAMADA DELGADA**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Ricardo Felkl  
de Almeida

**Bagé  
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

PP852aa Portinho, Luiza Nunes

Análise do coeficiente global de transferência de massa via simulação da secagem de cevada (*Hordeum Vulgare* L.) em leito fixo de camada delgada / Luiza Nunes Portinho.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA,  
2022.

"Orientação: André Ricardo Felkl de Almeida".

1. Cevada. 2. Secagem em leito fixo e camada fina.
3. Modelagem matemática. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**LUIZA NUNES PORTINHO**

**ANÁLISE DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA VIA SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE CEVADA (*Hordeum Vulgare L.*) EM LEITO FIXO DE CAMADA DELGADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 18 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Profa. Dra. Gabriela Silveira Da Rosa  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Prof. Dr. Marcilio Machado Morais  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **ANDRE RICARDO FELKL DE ALMEIDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 13:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GABRIELA SILVEIRA DA ROSA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCILIO MACHADO MORAIS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0894710** e o código CRC **8E71C2F6**.

Referência: Processo nº 23100.016182/2022-21 SEI nº 0894710

## RESUMO

A cevada (*Hordeum vulgare* L.) é um grão de grande interesse econômico devido a sua aplicação no processo de malte nas indústrias de cervejaria, ração animal e como aditivo para composição de farinhas. É considerada o melhor grão para o processo de maltagem devido aos seus elevados teores de amido e de enzimas e adequado teor de proteínas, além de resistência natural a doenças e uma casca protetora que envolve o grão. No Brasil, o principal uso econômico é para a produção de malte, e o país não produz o suficiente para suprir a demanda nacional. A umidade da cevada imediatamente após a colheita pode variar de 12% a mais de 20%. Os grãos armazenados com umidade superior 12% perdem sua capacidade germinativa, produzindo maltes de baixa qualidade e, portanto, a secagem antes do armazenamento é crucial. A compreensão, modelagem e simulação da secagem de grãos é complexa pois esta consiste na ocorrência simultânea da transferência de calor e massa em um material biológico que pode sofrer danos facilmente. O calor é necessário para transformar a água do seu estado líquido para vapor, e o gradiente de concentração que é criado leva à transferência de massa que ocorre tanto do interior do grão para sua superfície, quanto da superfície para o ar de secagem. O processo de secagem ideal é aquele que mantém um equilíbrio entre esses dois fenômenos, enquanto preserva as qualidades da cevada para maltagem, principalmente sua capacidade germinativa e sua integridade física, e previne o desenvolvimento de bactérias e fungos. Em vista disso, o objetivo do presente trabalho foi coletar, simular e analisar dados de secagem de cevada em leito fixo de camada delgada com temperatura de ar na faixa de 40°C a 60°C, velocidades de ar de 1,0 m/s a 2,0 m/s e com umidade inicial de 13,90±7,70 a 15,95±9,00 % (base úmida). Para isso, foi realizada uma simulação utilizando um modelo teórico do tipo global para secagem em leito fixo e camada delgada para obter o coeficiente global de transferência de massa ( $K_p$ ) e a influência deste no poder germinativo das sementes em diferentes condições de secagem e uma análise de sensibilidade paramétrica para o coeficiente global de transferência de massa e o calor específico do sólido ( $C_{p_{ss}}$ ). O aumento da temperatura de secagem e da velocidade do ar levou a uma diminuição na umidade final das sementes, e em termos de germinação os resultados são na faixa de 88 a 84%. O modelo utilizado apresentou ajuste apropriado para as condições estudadas e demonstra que o fator com maior influência no

coeficiente global de transferência de massa é o aumento da temperatura. Os valores encontrados estão na faixa de  $9,0 \times 10^{-5}$  a  $6,7 \times 10^{-4}$  kg/(m<sup>2</sup>s). Na análise de sensibilidade paramétrica, conclui-se que os valores de  $K_p$  encontrados são o melhor ajuste possível para previsão das condições estudadas, e que o valor de  $C_{p_{ss}}$  utilizado não influenciou consideravelmente na simulação da operação.

Palavras-chave: Cinética de secagem. Maltagem. Modelagem matemática.

## ABSTRACT

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is a grain of great economic interest due to its application in the production of malt for beer industries, animal feed, and flours. It's considered the best grain for the malting process due to its high starch content, high enzyme content, and appropriate protein composition, as well as its natural disease resistance and its protective shell which envelops the grain. In Brazil the main economic use is for the production of malt and the country does not yet produce enough to satisfy the national demand. The humidity in barley immediately after Harvest can vary anywhere from 12% to more than 20%. Grains stored with humidity higher than 12% lose their germinative capacity, producing low-quality malts, thus, the drying of barley previous to its storage is crucial. The understanding, analysis, modeling, and simulation of the drying of grains is complex due to the simultaneous occurrence of heat and mass transfer in a fragile biological material. Heat is necessary to transfer water from a liquid to a gas and the concentration gradient created leads to the mass transfer, which occurs both from the inside of the grain to its surface and from the grain surface to the air. The ideal drying process is one which maintains the equilibrium between those two processes while preserving the quality of malting barley, especially its germinative ability and physical integrity and prevents the development of fungi, bacteria, and insects. With that in mind, the objective of this work is to collect, analyze, and simulate barley drying data in a fixed bed and thin layer with drying air temperatures ranging from 40 °C to 60°C, air velocities of 1,0 m/s to 2,0 m/s and initial humidity ranging from  $13,90 \pm 7,70$  to  $15,95 \pm 9,00$  % (wet basis). For this, a simulation using a global theoretical drying model for fixed bed drying in a thin layer was used to obtain the global mass transfer coefficient and its effect in the germinative power of the grain with different drying conditions, and a parametric sensitivity analysis of the global mass transfer coefficients and the specific heat of the solid was made. The increase in temperature and velocity of the drying air led to a reduction of the final humidity of the seeds, and, in terms of germination, the results were in the range of 88 to 84%. The model used presented appropriate fitting for the conditions used and demonstrated that the greatest influence on the value of the global mass transfer coefficient was the drying air temperature. The values obtained are in the range of  $9,0 \times 10^{-5}$  a  $6,7 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s. In the parametric sensibility analysis, it was found that the  $K_p$  found were the



best possible fitting for the conditions studied, and the value of  $C\rho_s$  used was appropriate and didn't noticeably affect the simulation used.

Palavras-chave: Drying kinetics. Malting. Mathematical modelling.

## LISTA DE FIGURAS DO TCC II

Figura 1 – Teor de umidade em função do tempo.	25
Figura 2 – Taxa de secagem em função do teor de umidade	25
Figura 3 – Classificação de isotermas pelo formato.	27

## LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figura 1 – Fluxograma dos dados utilizados neste trabalho.	38
Figura 2 – Esquematização do modelo de secagem de cevada em leito fixo e camada fina.	39
Figura 3 – Ajuste do modelo em relação aos dados experimentais na condição de 40°C e 1 m/s para a umidade em base seca.	43
Figura 4 – Ajuste do modelo em relação aos dados experimentais na condição de 40°C e 1 m/s para a umidade em base úmida.	44
Figura 5 – Temperatura dos grãos de cevada durante o processo de secagem para a condição de 40°C e 1 m/s.	44
Figura 6 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $K_p$ em relação a $UB_s$ .	45
Figura 7 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $K_p$ em relação a $UB_u$ .	46
Figura 8 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $K_p$ em relação a $T_s$ .	46
Figura 9 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $Cp_s$ em relação a $UB_s$ .	47
Figura 10 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $Cp_s$ em relação a $UB_u$ .	47
Figura 11 – Análise de sensibilidade paramétrica para o $Cp_s$ em relação a $T_s$ .	48

## LISTA DE QUADROS DO TCC II

Quadro 1 – Condições de contorno para a Equação 3.10.	31
Quadro 2 – Resumo dos principais modelos de parâmetros distribuídos para secagem em camada delgada.	34

## LISTA DE TABELAS DO TCC II

Tabela 1 – Principais modelos de isotermas de sorção.	28
Tabela 2 – Modelos empíricos e semiempíricos de secagem em leito fixo.	32

## **LISTA DE TABELAS DO ARTIGO**

Tabela 1 – Dados relacionados aos ensaios de secagem de sementes de cevada, germinação, e coeficiente global de transferência de massa.

42

## LISTA DE SIGLAS DO TCC II

BAG – Banco Ativo de Germoplasma

BET – *Brunauer, Emmett e Teller*

COLBASE – Coleção Base

DPIRD – *Department of Primary Industries and Regional Development*

FAOSTAT – *Food and Agriculture Administration of the United Nations Statistics Division*

GAB – *Guggenheim- Anderson-de Boer*

RS – Rio Grande do Sul

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

## LISTA DE SÍMBOLOS DO TCC II

$a, b, c, g, h,$		
$k, k_2, k_3, n,$	Constante do modelo de secagem	[-]
$n_1, n_2$		
$a_w$	Atividade de água	[-]
$C_t, K$	Constante associada a entalpia de sorção	[-]
$C_p$	Calor específico à pressão constante	[LT <sup>2</sup> θ <sup>-1</sup> ]
$D_{ef}$	Difusividade Efetiva	[L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$D_0$	Parâmetro de correlação com <i>Arrhenius</i>	[L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$E_a$	Energia de Ativação	[MLT <sup>2</sup> ]
$G$	Velocidade mássica	[MT <sup>-1</sup> ]
$h_a$	Coeficiente volumétrico efetivo da transferência de calor	[MTL <sup>-1</sup> θ <sup>-1</sup> ]
$K_{sa}$	Coeficiente volumétrico efetivo de transferência de massa	[ML <sup>-3</sup> ]
$L$	Espessura da célula de secagem	[L]
$m_{as}$	Massa seca da amostra	[M]
$m_{eq}$	Massa da amostra no equilíbrio	[M]
$MR$	Umidade relativa	[-]
$P_v$	Pressão do vapor de água no ar	[MT <sup>-1</sup> L <sup>-2</sup> ]
$P_w$	Pressão de vapor da água pura na condição de saturação	[MT <sup>-1</sup> L <sup>-2</sup> θ T <sup>-2</sup> ]
$R$	Constante universal dos gases ideais	[M <sup>2</sup> L <sup>2</sup> ]
$t$	Tempo	[T]
$T$	Temperatura	[θ]
$X_0$	Umidade na temperatura inicial	[MM <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}$	Umidade volumétrica do sólido	[MM <sup>-1</sup> ]
$X$	Umidade	[MM <sup>-1</sup> ]
$X_e$	Umidade de equilíbrio	[MM <sup>-1</sup> ]
$X_m$	Umidade na monocamada do material	[MM <sup>-1</sup> ]
$z$	Direção de escoamento do fluido	[L]
$\varepsilon$	Porosidade	[-]
$\rho_s$	Massa específica real	[ML <sup>-3</sup> ]



## LISTA DE SÍMBOLOS DO ARTIGO

$a_r$	Área específica do meio de sólidos	$[L^{-1}]$
$C_p$	Calor específico à pressão constante	$[LT^2\theta^{-1}]$
$G$	Capacidade germinativa	$[-]$
$h$	Coefficiente global de transferência de calor	$[MTL^{-1}\theta^{-1}]$
$K_g$	Condutividade térmica do gás à 0°C	$[L^2T^{-3}\theta^{-1}]$
$K_p$	Coefficiente global de transferência de massa	$[MT^{-1}]$
$m_s$	Massa do leito do sólido	$[M]$
$Nu_L$	Número de <i>Nusselt</i> local	$[-]$
$P_{atm}$	Pressão atmosférica do ar	$[MT^{-1}L^{-2}]$
$PM$	Peso molecular	$[M]$
$Pr$	Número de <i>Prandtl</i>	$[-]$
$P_v$	Pressão de vapor	$[MT^{-1}L^{-2}]$
$P_{vs}$	Pressão de vapor na saturação	$[MT^{-1}L^{-2}]$
$r$	Raio da bandeja de secagem	$[L]$
$Re_L$	Número de <i>Reynolds</i> local	$[-]$
$T$	Temperatura	$[\theta]$
$UA$	Umidade absoluta do gás	$[ML^{-3}]$
$UB_u$	Umidade em base úmida	$[-]$
$UB_s$	Umidade em base seca	$[-]$
$v_g$	Velocidade do gás	$[LT^{-1}]$
$Y_s$	Umidade do sólido	$[MM^{-1}]$
$Y_{s,eq}$	Umidade dos sólidos no equilíbrio	$[MM^{-1}]$
$Y_{s,0}$	Fração mássica de água nos sólidos no tempo 0	$[MM^{-1}]$
$\rho$	Massa específica	$[ML^{-3}]$
$\lambda$	Calor latente de vaporização	$[M^2L^2T^{-2}]$
$\mu_g$	Viscosidade do gás a 0°C	$[ML^{-1}T^{-1}]$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Visão geral da cevada no Brasil e aspectos gerais para o beneficiamento.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Requerimentos para a maltagem da cevada.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Fundamentos de secagem .....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Isotermas de sorção.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5 Cinética de secagem.....</b>	<b>30</b>
<b>3.6 Modelagem matemática .....</b>	<b>33</b>
<b>4 ARTIGO CIENTÍFICO .....</b>	<b>36</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cevada ocupa a quinta posição em importância econômica no mundo (MINELLA *et al.*, 1999). No Brasil, a produção é concentrada na região sul, sendo Paraná o principal produtor do país, e é voltada ao mercado cervejeiro (GUILMANN; SANTOS, 2016).

Na colheita a cevada pode apresentar umidade de 12 a 20%, sendo que, quando a umidade for maior que 13% ela está sujeita a ataques por fungos, bactérias e insetos (SILVA, 2005). Se armazenada úmida, a cevada perde sua capacidade germinativa rapidamente e produz um malte de má qualidade (SILVA, 2005). A cevada para maltagem deve atingir estritos padrões de qualidade e, para tanto, aos produtores que a fornecem é pago um *premium* (REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2017). As principais propriedades a considerar incluem umidade, tamanho e formato do grão, capacidade germinativa, teor de proteínas, teor de  $\beta$ -glucanas e as características da casca (KUNZE, 2004; KUMAR *et al.*, 2013; PINTO, 2013).

Durante o beneficiamento desses grãos, a aplicação de um processo de secagem que preserve as qualidades da cevada é crucial (KUNZE, 2004). Nesse sentido, a secagem em leito fixo atende aos requisitos e preserva a integridade do grão, sendo a mais utilizada na atualidade (HELLEVANG; WILCKE, 2018). A secagem é, basicamente, a remoção da umidade de um material e sua modelagem e compreensão é complexa pois consiste na ocorrência simultânea da transferência de calor e de massa (GEANKOPLIS, 1998). O processo pode ser dividido em três etapas de acordo com a taxa de secagem, sendo a inicial, a constante e a de taxa decrescente, que está dividida entre a primeira e segunda etapa de taxa decrescente (SHEERWOOD, 1929). Na etapa inicial o produto é aquecido ou resfriado até a temperatura de secagem, na etapa de taxa constante a transferência de massa é igual à transferência de calor, sendo que essa etapa ocorre até o produto atingir sua umidade crítica. Finalmente, ocorre a etapa de taxa decrescente, onde a umidade do produto decai até atingir a umidade do equilíbrio (GEANKOPOLIS, 1998).

A umidade do equilíbrio ocorre quando há equilíbrio nas pressões de vapor de água no material e no meio, e, portanto, varia com a temperatura e umidade relativa do ar (FUMAGALLI, 2007) logo, o produto não pode perder uma quantidade maior de água que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem. Por caracterizar a

umidade mínima que o material pode atingir nas condições de processo, ela é de suma importância para a análise da secagem e pode ser obtida através do estudo das isotermas de sorção (ALBINI, 2019).

O conhecimento da cinética de secagem é de suma importância pois é nela que são baseados os dimensionamentos de secadores. É na análise da cinética de secagem que começam os estudos sobre a transferência de calor e massa, pois a cinética fornece uma previsão adequada das taxas de secagem, para utilização na modelagem dos fenômenos de transferência (ALBINI, 2019). Após o estudo das isotermas de sorção e cinética, é possível desenvolver uma modelagem mais complexa do sistema de secagem através da utilização de modelos teóricos, empíricos e semiempíricos de secagem. Os modelos semiempíricos são geralmente baseados em simplificações da lei de *Fick* ou da lei de *Newton* de resfriamento (ERBAY; ICIER, 2009).

Por serem baseados principalmente em constantes empíricas, os modelos empíricos e semiempíricos não permitem a análise de parâmetros necessários para o *design* e aprimoramento de equipamentos de secagem e são geralmente restritos para as condições de processo em que foram derivados (PARRY, 1985). Portanto, para uma análise mais profunda do processo é necessário empregar modelos teóricos, que são divididos em modelos globais, quando consideram o leito como um todo, e modelos diferenciais, quando consideram apenas os fenômenos dentro de um grão.

Em vista disso, o objetivo do presente trabalho foi coletar, simular e analisar dados de secagem de cevada em leito fixo de camada delgada obtidos em 2018 com temperatura de ar na faixa de 40 °C a 60°C, velocidades de ar de 1,0 m/s a 2,0 m/s e com umidade inicial de  $13,90 \pm 7,70$  a  $15,95 \pm 9,00$  % (base úmida). Para isso foi realizada simulação utilizando um modelo teórico do tipo global para secagem em leito fixo e camada delgada para obter o valor do coeficiente global de transferência de massa, a análise do efeito da mudança das condições de secagem no poder germinativo das sementes e uma análise de sensibilidade paramétrica para o coeficiente global de transferência de massa e o calor específico do sólido.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

O estudo teve como objetivo determinar a aplicabilidade de um modelo global de secagem em leito fixo de camada delgada para prever parâmetros de secagem da cevada (*Hordeum vulgare* L.).

### 2.2 Objetivos específicos

- Compilar e avaliar os dados experimentais de secagem de cevada obtidos por Borba *et al.* (2018), Dos Santos *et al.* (2018) e Borba *et al.* (2020). Esses dados compreenderam as caracterizações físicas e dados experimentais de secagem das sementes.
- Desenvolver um modelo global de secagem em camada delgada para as condições estudadas.
- Modelar e simular o processo utilizando um modelo global de secagem em camada delgada.
- Avaliar a influência da temperatura e velocidade do ar no poder germinativo da semente, umidade final e coeficiente global de transferência de massa.
- Realizar uma análise de sensibilidade paramétrica do coeficiente global de transferência de massa e do calor específico dos sólidos para determinar se os ajustes obtidos e valor do calor específico utilizado foram apropriados.
- Reunir os resultados obtidos em um artigo científico para ser submetido para uma revista científica.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Visão geral da cevada no Brasil e aspectos gerais para o beneficiamento

A cevada ocupa a quinta posição em importância econômica no mundo. No Brasil, devido ao clima propício, a produção é principalmente restrita à região sul, que em 2013 foi responsável por 100% da produção nacional (GUILMANN; SANTOS, 2016). O principal incentivo para o início da produção nacional foi o encarecimento da cevada para malteria externa em 1970, portanto a sua expansão ainda é recente no país, e o mercado é altamente especializado para a indústria cervejeira (DE MORI, 2012).

A produção de cevada em 2019 foi de 409.099 toneladas com rendimento de 3,59 ton por hectare, o que representa um aumento de 23,83% na produção e 10,29% no rendimento comparada à produção de 2018 (FOOD AND AGRICULTURE ADMINISTRATION, 2019).

O Estado do Rio Grande do Sul foi o maior produtor de cevada até 2008, ano em que foi superado pelo Paraná. Santa Catarina é o estado com menor produção na região sul do país. O Paraná teve sua produção mais do que triplicada entre os anos de 1990 e 2014, indicando a crescente importância da cevada na economia deste estado (GUILMANN; SANTOS, 2016). Existem também pequenas produções de cevada na região do cerrado, que não são significativas comparada à região Sul, mas produzem malte de alta qualidade e valor agregado (PINHEIRO, 2016).

Devido à sua importância para a economia do sul do país, o Brasil mantém a quinta maior coleção *ex situ* de cevada do mundo (CARPENTIERI-PIPOLO; KIIHL, 2019). Esta coleção está armazenada na Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia em Brasília, DF (Coleção Base - COLBASE) e na Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS (Banco Ativo de Germoplasma - BAG) (CARPENTIERI-PIPOLO; KIIHL, 2019). A coleção é usada para conservação e melhoria genética da produção do país.

A umidade da cevada pós colheita é, em média de 14 a 15%, podendo chegar à 20% ou tão baixo quanto 12% dependendo das condições de colheita e genética (KUNZE, 2004). A cevada, se armazenada úmida, perde sua capacidade de germinar rapidamente e produz um malte de baixa qualidade.

Além da perda de capacidade germinativa, as bactérias se desenvolvem em produtos cuja a atividade de água é superior a 0,90, enquanto para fungos os valores

variam de 0,65 a 0,90, faixa que em grãos representa teor de umidade de 14 a 22% (SILVA, 2005). Portanto, antes da secagem a cevada é altamente suscetível a infecções por micro-organismos e fungos. Se o teor de umidade da cevada é menor que 13%, não há riscos substanciais de desenvolvimento de fungos durante a armazenagem (SWEETS, 2018).

A umidade máxima de 13% e controle de temperatura também impedem o desenvolvimento de insetos e pragas como pulgões, lagartas e corós (REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2017). Até mesmo uma pequena infestação de pulgões durante o armazenamento pode reduzir drasticamente a capacidade germinativa da cevada e seu peso. Em casos de infestações intensas, pode ser necessário fumigação emergencial com inseticidas (DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES AND REGIONAL DEVELOPMENT, 2019).

O embrião de cevada respira durante o processo de armazenamento, o que leva a perda de amido que é importante para o processo de maltagem, portanto esse efeito deve ser reduzido ao máximo. Este processo pode ser controlado com a redução da umidade do grão para 13% ou inferior. (KUNZE, 2004).

Todos esses fatores indicam que a secagem da cevada até a obtenção de umidade máxima de 13% antes do armazenamento é crucial para manter o padrão de qualidade necessário para maltagem.

### **3.2 Requerimentos para a maltagem da cevada**

A cevada para maltagem deve seguir estritos padrões de qualidade, e os produtores que fornecem cevada de alta qualidade recebem um *premium* pelos cuidados necessários para atingir as características necessárias. As principais propriedades a considerar incluem umidade, tamanho e formato do grão, capacidade germinativa, o teor de proteínas, o teor de  $\beta$ -glucanas e as características da casca (KUNZE, 2004; KUMAR *et al.*, 2013; PINTO, 2013).

Como discutido na seção 3.1, a cevada deve ser secada até umidade máxima de 13% imediatamente após a colheita e antes do armazenamento, para manter sua capacidade germinativa e prevenir infestações. O próprio processo de secagem deve ser realizado prezando a preservação da capacidade germinativa do grão e sua integridade física (REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2019). Temperaturas muito altas podem ser extremamente prejudiciais. A temperatura

máxima indicada para a secagem de cevada para malte é de 45°C medida na massa de grãos, que é obtida usando temperatura de 65°C para o ar de secagem (REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2019). A secagem utilizando leito fixo atinge os requisitos necessários e preserva a integridade do grão e por isso é, na atualidade, a mais utilizada (HELLEVANG; WILCKE, 2018).

Segundo KOSZELA *et al.* (2015), os grãos de cevada são classificados em três tipos de acordo com seu tamanho.

- **Tipo 1:** grãos inteiros de cevada que ficam retidos nas peneiras de 2,5 mm. Esses são os maiores grãos, que levam ao maior rendimento, portanto devem compor a maior fração.
- **Tipo 2:** grãos inteiros de cevada que passam da peneira de 2,5 mm, mas ficam retidos na peneira de 2,2 mm.
- **Tipo 3:** inclui os grãos que passam da peneira de 2,2 mm e qualquer impureza e matérias estranhas retidas em quaisquer das peneiras. Essa cevada não é própria para maltagem e é utilizada na alimentação animal.

A divisão da cevada por tamanho é crucial pois grãos de diferentes tamanhos absorvem água a taxas diferentes durante o processo de maceração, necessitando processamento separado dos grãos de tipo 1 e tipo 2 (KUNZE, 2004).

Segundo WOONTON *et al.* (2005), uma das principais características da cevada cervejeira é sua capacidade de germinar vigorosamente e de maneira síncrona. A dormência de grãos pode interferir com o processamento e levar a malte de menor qualidade, portanto o grão tem que germinar em um nível aceitável, superior ou igual a 96%.

Outro aspecto são os altos teores de proteínas que levam ao aumento do tempo de maltagem e produzem cervejas com baixa estabilidade (LIZARAZO, 2003). Um teor de proteínas muito baixo também não é vantajoso, pois resulta na falta de enzimas necessárias no processo de germinação, e também afeta o processo de fermentação devido à baixa quantidade de aminoácidos para nutrir a levedura. O teor ideal é em torno de 9 a 11,5% (KUMAR *et al.*, 2013).

As  $\beta$ -glucanas estão relacionadas com a degradação das paredes celulares durante o processo de germinação, permitindo o acesso de outras enzimas aos seus substratos dentro das células e promovendo a conversão do amido em açúcares fermentáveis. A degradação ineficiente das paredes celulares prejudica a difusão das enzimas de germinação, a mobilização de reservas do grão e reduz o extrato do malte.



$\beta$ -glucanas residuais podem também levar a um aumento na viscosidade e turbidez da cerveja (BELETI; DUARTE; GEORG-KRAEMER, 2021). Portanto, o teor ideal é inferior a 225 ppm (PINTO, 2013).

Finalmente, no que se refere a estrutura física da casca, a mesma deve ser fina e enrugada com cor amarela clara (PINTO, 2013). Quando a cevada não está totalmente madura, pode apresentar casca lisa e grossa, que contém maior teor de polifenóis e outros compostos amargos que afetam o sabor da cerveja, além de germinar de maneira lenta e errática (SUMNER *et al.*, 1987).

### 3.3 Fundamentos de secagem

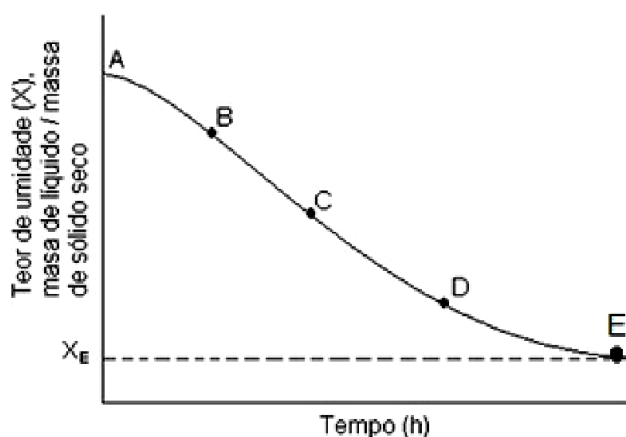
A secagem pode ser definida como a remoção de umidade de um material por aplicação de calor, e, portanto, envolve simultaneamente a transferência de calor e de massa (GEANKOPLIS, 1998). O calor geralmente é fornecido por ar aquecido e o gradiente de concentração ou de pressão de vapor formado leva à transferência de umidade do interior do material para sua superfície, que então é evaporada e carregada pelo ar de secagem (BALA, 2017).

No processo de secagem, o fornecimento de calor pode ocorrer por três diferentes mecanismos, a condução, a convecção e a radiação. Geralmente, os processos empregam uma combinação destes mecanismos com predominância da convecção, sendo uma secagem eficiente aquela que utiliza ar com baixa umidade relativa e alta velocidade (FELLOWS, 2006). Segundo Sheerwood (1929), assumindo que o mecanismo pelo qual a umidade é transportada do interior do sólido para a superfície é a difusão, três mecanismos gerais podem ser derivados.

- **Caso 1:** a evaporação da umidade ocorre na superfície do sólido, e a resistência a difusão interna de líquido é pequena comparada com a resistência à remoção de vapor da superfície.
- **Caso 2:** a evaporação da umidade ocorre na superfície do sólido, e a resistência à difusão interna de líquido é grande comparada a resistência à remoção de vapor da superfície.
- **Caso 3:** a evaporação de umidade ocorre no interior do sólido, e a resistência a difusão interna do líquido é grande comparada com a resistência total a remoção do vapor.

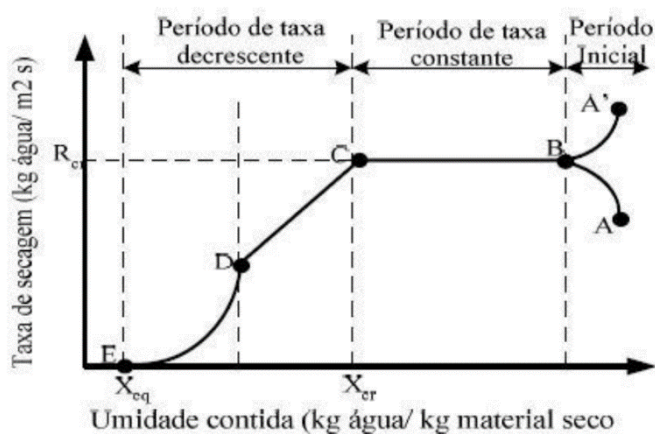
A secagem de um material em particular não é necessariamente restrita a apenas um desses mecanismos, e pode variar durante o processo. Sheerwood (1929) também classificou os períodos do processo de secagem de acordo com o teor de remoção de umidade em função do tempo ou conforme a taxa de secagem em função da umidade média, como demonstrado nas Figuras 1 e 2. Em ambas as figuras é assumido condições de processo constantes.

Figura 1: Teor de umidade em função do tempo.



Fonte: FOUST *et al.* (2008).

Figura 2: Taxa de secagem em função do teor de umidade.



Fonte: GEANKOPLIS (1998).

Nas Figuras 1 e 2, durante o período inicial o material é aquecido (A a B) ou resfriado (A' a B) até a o ponto B, onde a taxa de transferência de calor é igual a de massa (GEANKOPLIS, 1998). Durante o período de B a C, a taxa de secagem é constante e as transferências de calor e de massa são equivalentes, logo todo calor fornecido ao sistema é utilizado para evaporar a água da superfície. A temperatura do

sólido permanece constante e a taxa de secagem apresenta-se como uma reta. A água evaporada é a água na superfície do material e a secagem ocorre sem uma influência direta no sólido, sendo assim, a secagem se dá como se fosse a evaporação de uma massa de líquido. O período de taxa constante é importante somente para situações em que o potencial de secagem é muito baixo ou a umidade inicial do material é muito alta (BOTELHO *et al.*, 2011). O fim do período de taxa constante corresponde ao ponto em que a migração interna de umidade para a superfície não é mais igual à taxa de evaporação da umidade livre (CHIRIFE, 1983). O período constante continua até que o material atinja sua umidade crítica e comece o primeiro período de taxa decrescente (C). Logo, se a umidade do material for menor que a sua umidade crítica, não ocorre período de taxa constante. É bem estabelecido que a secagem de produtos agrícolas, como a cevada, ocorre durante os períodos de taxa decrescente, mas pode ocorrer período constante quando a secagem ocorre em camada espessa (BALA, 2017).

Ainda nas Figuras 1 e 2, o período de taxa decrescente é subdividido no primeiro (C a D) e segundo (D a E). Durante o primeiro período, a taxa decai devido a pequena área de superfície molhada na semente. Quando o filme superficial de umidade é inteiramente evaporado começa o segundo período, onde, geralmente, a difusão de vapor é predominante (ERBAY; ICIER, 2010). Muitos produtos alimentícios apresentam primeiro período de taxa decrescente com lento declínio seguido de um segundo período caracterizado pela queda brusca da taxa (EARLE, 2004). Estes dois períodos são, na maioria dos casos, os mais lentos do processo de secagem (ALBINI, 2019). A umidade decai até atingir o menor valor possível no ponto E, que é a umidade de equilíbrio, onde há equilíbrio nas pressões de vapor de água no material e no meio, e, portanto, a umidade de equilíbrio varia com a temperatura e umidade relativa do ar (FUMAGALLI, 2007). O material não pode perder uma quantidade maior de água que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem. Por caracterizar a umidade mínima que o material pode atingir nas condições de processo, ela é de suma importância para a análise da secagem e pode ser obtida através do estudo das isotermas de sorção (ALBINI, 2019).

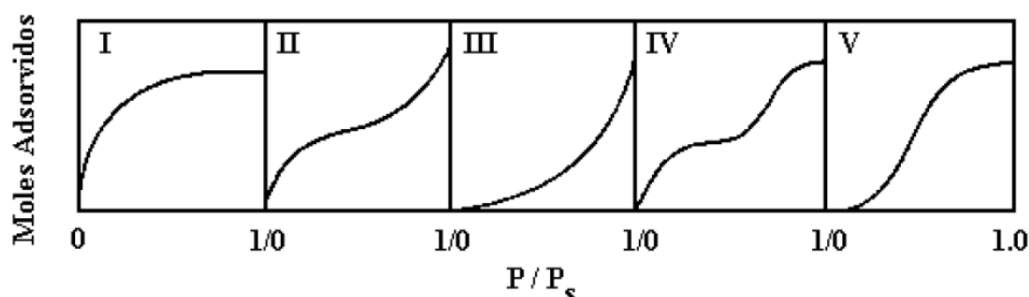
### **3.4 Isotermas de Sorção**

As curvas de umidade do sólido em função da umidade relativa do ar, sob a qual o mesmo encontra-se em equilíbrio, para temperaturas constantes, são denominadas isotermas de sorção. As isotermas são classificadas como sendo de adsorção quando o material seco é colocado em condições de umidade relativa controlada e ocorre o aumento da massa do material devido à retenção de umidade. Analogamente, as isotermas de dessorção são assim definidas quando material úmido, sob as mesmas condições de umidade relativa, perde massa ao longo do processo (ALBINI, 2019). Quando ocorrem diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção para um mesmo produto e em condições idênticas de determinação, esse fenômeno é denominado histerese (BHANDARI; ADHIKARI, 2008).

As curvas de umidade de equilíbrio podem ser obtidas experimentalmente por meio dos métodos dinâmico e estático. No método dinâmico, o grão é submetido a fluxos de ar sob condições controladas de temperatura e umidade relativa até que seja atingido o equilíbrio. No método estático, o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ambiente sob condições controladas, é atingido sem movimentação do ar (CORRÊA *et al.*, 2005).

As isotermas de sorção de umidade são tipicamente classificadas em cinco formatos diferentes, conforme Figura 3.

Figura 3: Classificação de isotermas pelo formato.



Fonte: SCHWANKE (2003).

Na Figura 3, o tipo I é conhecido como Langmuir e, de acordo com PORPINO (2009), essas isotermas podem ser limitadas a poucas camadas moleculares, onde os poros excedem um pouco o diâmetro molecular do sólido. A isoterma do tipo II é a mais empregada, e a teoria de adsorção em multicamadas de *Brunauer, Emmett e Teller* (BET) foi desenvolvida para esse tipo de isoterma. Essa isoterma indica o processo de sorção em multicamadas, sugerindo a presença de superfície não porosa

ou macroporosa (ANDRADE, 2014). As isotermas do tipo II e III resultam de sólidos que possuem uma gama variada na dimensão dos poros. Esta variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar (SCHWANKE, 2003). Isotermas do tipo IV são obtidas com sólidos mesoporosos. Isotermas desse tipo exibem uma proeminente região na qual a pressão relativa varia pouco e o volume sorvido aumenta bruscamente (AMGARTEN, 2006). A isoterma do tipo V resulta da pequena interação adsorvato-adsorvente e é similar a isoterma do tipo III, mas é obtida com certos adsorventes porosos, não sendo adequadas a utilização do modelo BET (REIS, 2013).

Nenhum modelo teórico já desenvolvido foi capaz de prever com precisão o teor de umidade de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar e, portanto, são utilizados modelos empíricos. Destes, existem mais de 200 na literatura (CORRÊA *et al.*, 2005). De acordo com Park *et al.*, (2008), existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas em análise de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios mais utilizados são os de segundo grau. Os modelos de isoterma mais utilizados são os modelos de Henderson, GAB, *Peleg*, BET e *Oswin*, como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1: Principais modelos de isotermas de sorção.

Modelo	Modelo	Equação
<i>Henderson</i>	$X_e = \left[ -\frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{\frac{1}{b}}$	(3.1)
GAB	$X_e = \frac{X_m C t K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$	(3.2)
<i>Peleg</i>	$X_e = k_2 a_w^{n_1} + k_3 a_w^{n_2}$	(3.3)
BET	$X_e = \left[ \frac{(X_m c e^{\frac{b}{T}} a_w) [1 - (n + 1)a_w + n a_w^{n+1}]}{(1 - a_w)[1 + (e^{\frac{b}{T}} - 1)a_w - e^{\frac{b}{T}} a_w^{n+1}]} \right]$	(3.4)
<i>Oswin</i>	$X_e = a \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$	(3.5)

Fonte: FREITAS (2016).

Nas Equações 3.1 a 3.5,  $X_e$  é a umidade de equilíbrio,  $a_w$  é atividade de água da semente,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $n$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são constantes,  $X_m$  é a umidade na monocamada do material em  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ss}}$  e  $Ct$  e  $K$  são constantes associadas às entalpias de sorção da monocamada e multicamada, respectivamente.

O modelo de Henderson é um dos modelos mais utilizados que relaciona a atividade de água com a quantidade de água que é sorvida (ANDRADE, 2011; KANAAN, 2014; FREITAS, 2016). Segundo Andrade *et al.* (2011), o modelo de GAB possui muitas vantagens em comparação aos demais modelos pois possui uma base teórica viável, sendo um refinamento das teorias de Langmuir e BET de adsorção. O modelo de Peleg é uma equação de quatro parâmetros puramente empírica e apresenta adequação igual ou superior ao modelo GAB, e foi utilizado para descrever adequadamente isotermas de pistacho, batata seca, chá verde instantâneo, entre outros alimentos (ANDRADE *et al.*, 2011). A equação de BET (*Brunauer, Emmett e Teller*) é uma das equações mais utilizadas e fornece um bom ajuste para uma variedade de materiais na região de atividade de água entre 0,05 a 0,45 (ALBINI, 2019). O aspecto mais importante desta equação é que permite calcular o conteúdo de umidade em monocamada. O conceito de conteúdo de umidade da monocamada é de interesse devido à sua relação com a estabilidade química e física de alimentos desidratados (BHANDARI; ADHIKARI, 2008). O modelo de Oswin, segundo Gomes *et al.*, (2002), é totalmente empírico e se baseia na expansão matemática para curvas

de formato sigmoidal. Apresenta vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB devido à presença de somente duas constantes de fácil linearização.

Segundo Freitas (2016), no equilíbrio, a atividade de água está relacionada com a umidade relativa ( $UR$ ) do ambiente através da Equação 3.7,

$$a_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{UR}{100} \quad (3.7)$$

onde  $P_w$  é a pressão parcial do vapor de água no ar e  $P_v$  é a pressão de vapor da água pura na condição de saturação na mesma temperatura. Já a umidade no equilíbrio é dada pela Equação 3.8,

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_{as}}{m_{as}} \quad (3.8)$$

onde  $m_{eq}$  é a massa da amostra no equilíbrio e  $m_{as}$  é a massa de sólido seco.

A atividade de água de um alimento é um parâmetro importante para a escolha de embalagem apropriadas para alimentos e determinação do tempo de vida útil de um produto alimentício (AL-MUHSTABET *et al.*, 2002). Também é muito importante para o estudo do comportamento cinético, pois sem os dados do equilíbrio não é possível prever a difusividade e velocidade do processo de secagem utilizadas nos modelos de transferência.

### 3.5 Cinética de secagem

A complexidade da secagem dificulta a sua modelagem matemática. Diversos modelos teóricos, empíricos e semiempíricos foram desenvolvidos para prever a cinética de secagem de diversos materiais (JAYAS *et al.*, 1991). O conhecimento da cinética de secagem é de suma importância pois é nela que são baseados os dimensionamentos de secadores (KANAAAN, 2014). É na análise da cinética de secagem que começam os estudos sobre a transferência de calor e massa, pois a cinética fornece uma previsão adequada das taxas de secagem, para utilização na modelagem dos fenômenos de transferência (ALBINI, 2019).

Caso as informações sobre o comportamento da cinética de secagem de um determinado material sejam escassas, o estudo em camada fina em leito fixo torna-se fundamental para obtenção do comportamento cinético, pois permite o estudo da influência das variáveis do processo (PRADO, 2000). Secagem em camada delgada implica secar uma camada de partículas ou fatias da amostra (PARY, 1985). Devido

a sua estrutura delgada, é possível assumir que a distribuição de temperatura e o gradiente de concentração é uniforme (AKPINAR, 2006).

Os modelos teóricos são geralmente baseados na lei de *Fick* de difusividade e necessitam de muitas premissas que podem levar a erros (JAYAS *et al.*, 1991). Os modelos semiempíricos podem também ser baseados na lei de *Fick*, ou na lei de *Newton* de resfriamento, e são menos complexos, necessitando de menos premissas devido ao uso de dados experimentais, mas sua aplicação é limitada as condições de processo que foram derivados (PARRY, 1985). Os modelos empíricos são similares aos semiempíricos, sendo limitados às condições de processo que foram derivados, e fornecem informações limitadas sobre o comportamento do produto durante a secagem (KEEY, 1972).

Na secagem em camada delgada a variação de umidade e temperatura da fase gasosa em todo o leito é considerada desprezível, logo apenas o balanço de massa para a água contida na fase sólida é considerado na modelagem do processo (ALBINI, 2019). Portanto, segundo a Teoria da Difusão, supondo um sistema isotérmico e convertendo a concentração de soluto difundente na umidade do sólido em base seca, a equação do balanço de massa se reduz a Equação 3.9,

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \nabla(D_{ef}\rho_s \nabla X) \quad (3.9)$$

em que  $\rho_s$  é a massa específica real,  $X$  é a umidade do grão,  $t$  é o tempo e  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva.

Assumindo que a difusividade efetiva é constante, o sólido é homogêneo e isotrópico, a umidade é uniforme, e que a célula de secagem pode ser aproximada para uma placa plana de espessura  $2L$  e área infinita, que o encolhimento do material desprezível e a transferência de massa é unidimensional, a Equação 3.9 é simplificada para a Equação 3.10,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

onde  $z$  é a direção de escoamento do fluido.

Utilizando as condições de contorno mostradas no Quadro 1, CRANK (1975) apresenta a solução analítica dada pela Equação 3.11. No Quadro 1,  $L$  é a espessura da célula de secagem.



Quadro 1: Condições de contorno para a Equação 3.10.

<b>Condição de contorno 1</b>	$X = X_0$ em $t = 0, 0 < z < L$
<b>Condição de contorno 2</b>	$\frac{\partial X}{\partial z} = 0$ em $z=0, t > 0$
<b>Condição de contorno 3</b>	$X = X_{eq}$ em $z = L, t > 0$

Fonte: Autora (2022).

Portanto, a umidade adimensional ( $MR$ ) em função do tempo é dada pela Equação 3.11,

$$MR = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t \right] \quad (3.11)$$

onde  $\bar{X}$  é a umidade média volumétrica do sólido e  $X_0$  é a umidade no tempo inicial.

Segundo ALBINI (2015), há uma dependência entre a difusividade efetiva com a temperatura e a umidade inicial de grãos, o que permite avaliar a dependência da difusividade efetiva com a temperatura através de uma correlação do tipo Arrhenius, descrita pela Equação 3.12,

$$D_{ef} = D_0 \exp \left( - \frac{E_a}{RT} \right) \quad (3.12)$$

onde  $D_0$  é o parâmetro de correlação com Arrhenius,  $E_a$  é a energia de ativação,  $R$  é a constante universal dos gases ideais e  $T$  é a temperatura.

Segundo FREITAS (2016), devido à interferência do efeito de resistência interna do material, a Teoria da Difusão não se faz adequada em alguns casos para representar o comportamento da taxa de secagem. Para contornar essa situação, alguns modelos empíricos e/ou semiempíricos podem ser adotados. A Tabela 2 apresenta alguns modelos empíricos e semiempíricos. Nas Equações 3.13 a 3.19,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $g$ ,  $k$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  e  $n$  são constantes dos modelos de secagem.

Tabela 2: Modelos empíricos e semiempíricos de secagem em leito fixo.

<b>Nome do Modelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
<i>Newton</i>	$MR = \exp(-kt)$	(3.13)
<i>Page</i>	$MR = \exp(-kt^n)$	(3.14)
<i>Henderson e Pabis</i>	$MR = a \exp(-kt)$	(3.15)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(3.16)

(continua)

Nome do Modelo	Modelo	Equação
Dois termos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(3.17)
<i>Wang e Singh</i>	$MR = 1 + at + bt^2$	(3.18)
<i>Henderson e Pabis</i> modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	(3.19)

Fonte: AKPINAR (2006), adaptado.

O modelo de *Newton*, também chamado de modelo de *Lewis*, é um equacionamento derivado da lei de *Newton* de resfriamento que assume que o gradiente de umidade interno é negligível, considerando apenas a resistência superficial (ERTEKIN; ZIYA, 2015). A maior limitação do modelo é que ele geralmente superestima os estágios iniciais de secagem e subestima os estágios finais (VIJAYARAJ *et al.*, 2007). O modelo de *Page* é uma modificação empírica do modelo de *Newton* que tenta eliminar desvantagens do modelo ao adicionar uma constante empírica adimensional para o termo do tempo. Este modelo foi utilizado com sucesso para descrever a secagem de produtos agrícolas em camada delgada (KAHVECI; CIHAN, 2008). Já o modelo de *Henderson e Pabis* é derivado da lei de *Fick*. Este modelo prevê o comportamento do começo do processo de secagem adequadamente, mas é menos eficiente nos últimos estágios do processo (DISSA *et al.*, 2008). Ao adicionar-se um termo logarítmico para o modelo de *Henderson e Pabis* obtêm-se o modelo Logarítmico, que é frequentemente utilizado para estudos de secagem em camada fina (ERTEKIN; ZIYA, 2015). Assim como o modelo de *Henderson e Pabis*, o modelo de Dois Termos também é derivado da lei de *Fick*, e assume que a difusividade é constante e requer que a temperatura do produto seja constante durante a secagem (KUMAR *et al.*, 2006). O modelo de *Wang e Singh* é um modelo empírico que utiliza uma equação quadrática. Foi inicialmente proposto para o ajuste da secagem em camada fina de arroz, mas foi adequado também para a secagem de banana (KADAM; DHINGRA, 2011), folhas de salsa (AKPINAR, 2011) e outros produtos alimentícios (ERTEKIN; ZIYA, 2015). O modelo de *Henderson e Pabis* modificado procura melhorar o ajuste adicionando um terceiro termo na solução em série da lei de *Fick*. O primeiro termo explica a última parte da secagem, o segundo termo a parte intermediária e o último o começo do processo (ERBAY; ICIER, 2009).

Por serem baseados principalmente em constantes empíricas, os modelos empíricos e semiempíricos não permitem a análise de parâmetros necessários para o

*design* e aprimoramento de equipamentos de secagem como, por exemplo, os coeficientes de transferência de calor e massa, e são geralmente restritos para as condições de processo em que foram derivados. Portanto, para uma análise mais profunda do processo é necessário empregar modelos teóricos cuja modelagem é mais complexa, como os modelos teóricos discutidos na seção 3.6.

### **3.6 Modelagem matemática da secagem em leito fixo e camada delgada**

Segundo Parti (1993), existem três grupos principais de modelos de secagem em leito fixo e camada delgada. São eles, os modelos de parâmetros distribuídos, modelos de parâmetros concentrados e equações de secagem em camada fina empíricas, sendo essas últimas já discutidas no item anterior. Para o desenvolvimento, análise e otimização do *design* de novos secadores, os modelos de parâmetros distribuídos são preferíveis, por que permitem estimar influências de diferentes parâmetros no processo de transferência de calor e massa. Os principais modelos de parâmetros distribuídos difusivos são resumidos no Quadro 2.

Quadro 2: Resumo dos principais modelos de parâmetros distribuídos difusivos para secagem em camada delgada.

<b>Modelo</b>	<b>Caracterização</b>	<b>Aplicação</b>
Young (1969)	Modelo diferencial difusivo	Descrever a transferência de umidade dentro de um grão (JAYAS <i>et al.</i> , 1991)
Marchant (1976)	Modelo diferencial de difusão líquida	Prever a umidade média instantânea de grãos (BRUCE, 1985)
Bruce e Sokhansanj (1987)	Modelo diferencial de difusão líquida e condução	Prever temperaturas superficiais de grãos em camada fina (BRUCE; SOKHANSANJ, 1987)
Passa <i>et al.</i> (2003)	Modelo difusivo global	Prever a variação de umidade ao longo do processo (PASSA <i>et al.</i> , 2003)

Fonte: Autora (2022).

O modelo de Young (1969) assume que o grão é esférico e composto de umidade, sólidos secos e uma fração de vácuo de ar. O valor da fração de vácuo em um grão inteiro é difícil de estimar, tornando a utilização do modelo limitada (JAYAS *et al.*, 1991). Marchant (1976) derivou um modelo de difusão líquida onde o coeficiente de difusão é função do conteúdo de umidade. Segundo BRUCE (1985), este modelo previu adequadamente a umidade média instantânea de grãos de cevada secos em camada delgada a temperaturas de 50 a 150°C. Ambos modelos consideram a temperatura do grão uniforme, desconsiderando assim a influência da condução na secagem de grãos. Segundo Jayas *et al.* (1991), pesquisadores utilizam o trabalho de PABIS e HENDERSON (1962) como base para negligenciar a natureza distributiva da transferência de calor em um grão. PABIS e HENDERSON (1962), em experimentos realizados em grãos de milho, concluíram que as diferenças entre o centro e a superfície de um grão só é significativa nos primeiros 3 a 4 min e, portanto, para aplicações práticas, a temperatura no grão pode ser considerada uniforme. Segundo Jayas *et al.* (1991), porém, erros experimentais significantes podem ocorrer durante a

medição da temperatura no centro do grão. De acordo com Cleve e Hoffman (1952), o coeficiente de transferência de calor superficial tem grande efeito no gradiente de temperatura dentro de um grão, enfatizando a importância de modelos condutivos. Bruce e Sokhansanj (1987) desenvolveram um modelo condutivo que assume grãos esféricos, que o movimento da umidade é por difusão líquida, e que a evaporação de líquido ocorre somente na superfície. Esse modelo foi capaz de prever adequadamente a temperatura superficial de trigo e cevada durante a secagem. O modelo condutivo pode ser ainda simplificado ao assumir que a esfera possui raio constante e que a temperatura e umidade inicial são uniformes dentro desta, hipóteses frequentemente adequadas para a secagem de grãos (BABBITT, 1949).

Os modelos previamente discutidos são diferenciais, oferecendo uma análise individual do grão. Esses modelos, principalmente o modelo condutivo, são vantajosos na secagem de cevada pois o controle da temperatura do grão é crucial para manter sua capacidade germinativa. Em contraste, o modelo de secagem proposto por Passa *et al.* (2003) é um modelo global, que analisa todo o leito de secagem. Este modelo é obtido ao realizar um balanço de massa do soluto e um balanço de energia em ambas as fases, podendo ser usado para leitos fixos ou fluidizados. A grande vantagem dos modelos globais é a facilidade de implementação, além disso podem ser utilizados para obter a temperatura do sólido e os coeficientes de transferência de calor e massa do processo. Já os modelos diferenciais são de difícil implementação, requerendo variáveis cuja determinação é complexa, e frequentemente necessitam da introdução de mais hipóteses simplificadoras que os modelos globais, que pode levar a erros adicionais na análise.

## 4 ARTIGO CIENTÍFICO

### **AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA SECAGEM DE CEVADA (*Hordeum vulgare* L.) EM LEITO FIXO DE CAMADA DELGADA**

Luiza Nunes Portinho\*  
André Ricardo Felkl de Almeida\*\*

#### **RESUMO**

O objetivo desse estudo foi analisar a viabilidade de utilização de um modelo global de secagem em leito fixo de camada delgada para prever o coeficiente global de transferência de massa na secagem da cevada (*Hordeum vulgare* L.). Como variáveis de processo avaliou-se a temperatura e velocidade do ar de secagem em 40°C a 60°C e 1 m/s a 2 m/s, respectivamente. Os principais resultados demonstraram que o aumento dessas variáveis ocasiona uma diminuição na umidade final das sementes e um aumento no coeficiente global de transferência de massa ( $K_p$ ), além disso a germinação está em nível aceitável indicando que a temperatura utilizada não danificou as sementes. Também se verificou que o modelo utilizado apresentou bom ajuste para todas as condições estudadas e com valor do  $K_p$  de  $2,8 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $6,7 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para os ensaios de 60°C e  $9,0 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $2,4 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para os ensaios de 40°C, sendo esses valores para velocidades de 1 e 2 m/s, respectivamente.

#### **1. INTRODUÇÃO**

A cevada ocupa a quinta posição em importância econômica no mundo (MINELLA *et al.*, 1999). No Brasil, a produção é concentrada na região sul, sendo Paraná o principal produtor do país e é voltada ao mercado cervejeiro (GUILMANN; SANTOS, 2016). A produção de cevada em 2019 foi de 409.099 toneladas e vem aumentando nos últimos anos (FOOD AND AGRICULTURE ADMINISTRATION, 2019).

A umidade da cevada pós colheita é em média de 14 a 15%, podendo chegar à 20% dependendo das condições de colheita e genética (KUNZE, 2004). A cevada se armazenada úmida perde sua capacidade de germinar rapidamente e produz um malte de baixa qualidade, além de ficar vulnerável a ataques por fungos, bactérias e

insetos (SWEETS, 2018). Portanto, um processo de secagem que preserva as características da cevada após a colheita é de suma importância (SILVA, 2005).

A secagem é basicamente fundamentada na remoção da umidade de um material e implica na ocorrência simultânea da transferência de calor e de massa (BALA, 2017). Secagem em camada delgada implica secar uma camada de partículas ou fatias da amostra (PARY, 1985). Devido a sua estrutura delgada é possível assumir que a distribuição de temperatura e o gradiente de concentração é uniforme (AKPINAR, 2006). O estudo em camada delgada em leito fixo torna-se fundamental para obtenção do comportamento cinético, pois permite avaliar a influência das variáveis do processo (PRADO, 2000).

Outro aspecto importante no estudo do comportamento de processos de secagem é a utilização de modelos matemáticos, onde torna-se possível realizar a análise de parâmetros como o coeficiente de transferência de massa que são necessários para o *design* e aprimoramento de equipamentos (PARTI, 1993). Esses modelos de secagem se dividem em mecanísticos ou físicos e empíricos. Por serem baseados principalmente em constantes empíricas, os modelos empíricos e semiempíricos são geralmente restritos para as condições de processo em que foram derivados (PARRY, 1985). Portanto, para uma análise mais profunda do processo é necessário empregar modelos mecanísticos ou físicos que são divididos em modelos globais, quando consideram o leito de grãos como um todo, e modelos diferenciais, quando consideram apenas os fenômenos dentro de um grão ou do leito constituído pelos grãos.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um modelo global de secagem de cevada (*Hordeum vulgare* L.) em leito fixo em camada delgada para prever a influência na modificação da temperatura e velocidade do ar sobre a umidade final, germinação e coeficiente global de transferência de massa.

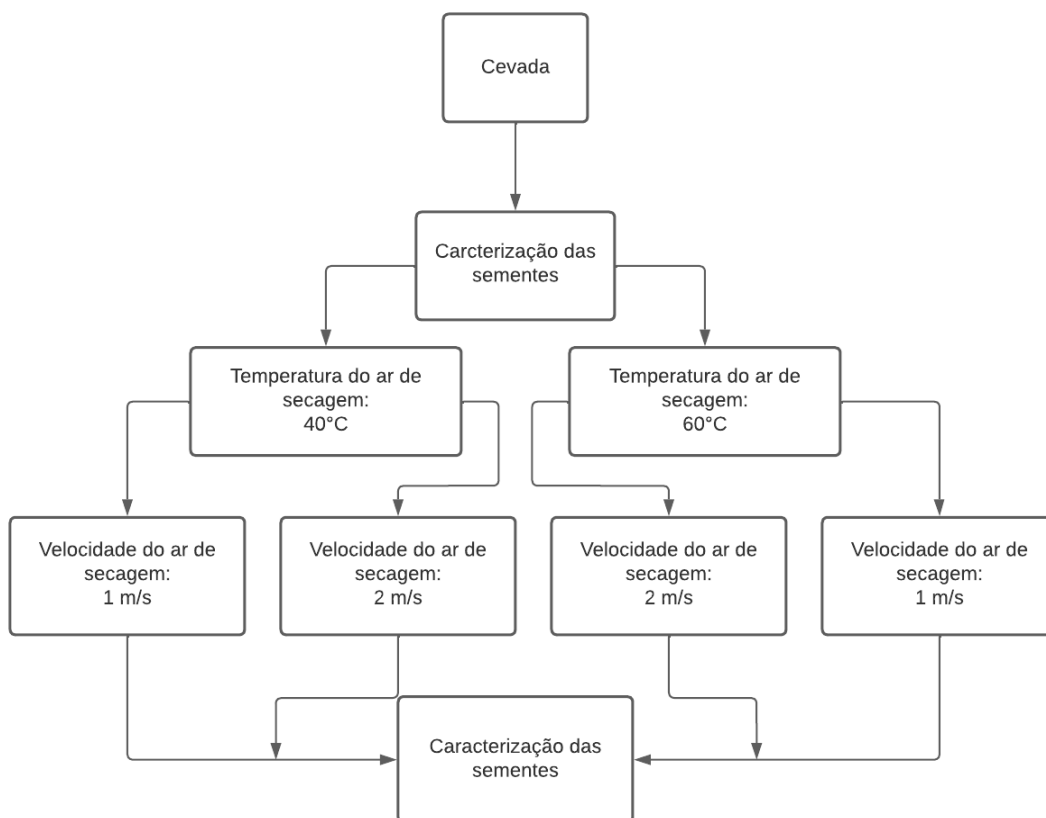
## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Dados de entrada**

Os dados de secagem da cevada em leito fixo em camada delgada utilizados foram obtidos por Borba *et al.* (2018), Dos Santos *et al.* (2018) e Borba *et al.* (2020) e consistem de quatro secagens onde foram modificadas as variáveis de temperatura e

velocidade do ar, de dados de caracterização das sementes e germinação. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado dos dados utilizados neste trabalho.

Figura 1: Fluxograma dos dados utilizados neste trabalho.



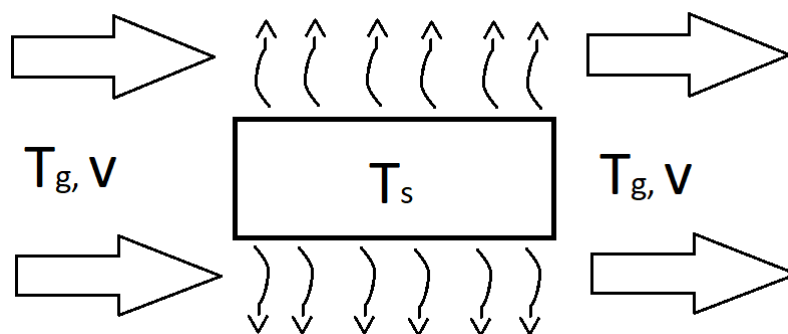
Fonte: Autora (2022).

### **Modelo de secagem em leito fixo de camada fina para grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.)**

O modelo utilizado foi embasado em uma perspectiva global convectiva que considera a bandeja de secagem e os grãos como um único sólido consolidado que é homogêneo e isotrópico, não há encolhimento e que a quantidade de ar está em excesso de tal modo que não ocorre variação na sua temperatura, umidade relativa e umidade absoluta. A Figura 2 representa uma esquematização do volume de controle do modelo desenvolvido.



Figura 2: Esquemática do modelo de secagem de cevada em leito fixo e camada fina.



Fonte: Autora (2022).

Com base nessas hipóteses, a variação de umidade na fase sólida foi obtida pelo balanço global de conservação da massa, conforme Equação 1,

$$\frac{dY_s}{dt} = -\frac{K_p a_r}{\rho_s} (Y_s - Y_{s,eq}) \quad (1)$$

onde  $Y_s$  é a umidade dos sólidos,  $K_p$  é o coeficiente global de transferência de massa,  $\rho_s$  é a massa específica do sólido,  $Y_{s,eq}$  é a umidade dos sólidos no equilíbrio e  $a_r$  é a área específica do meio de sólidos.

A variação de temperatura do sólido no tempo foi obtida através de um balanço global de conservação de energia para a fase sólida, conforme a Equação 2,

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{h a_r}{\rho_s C p_s} (T_g - T_s) - \frac{\lambda K_p a_r}{\rho_s C p_s} (Y_s - Y_{s,eq}) \quad (2)$$

onde  $h$  é o coeficiente global de transferência de calor,  $C p_s$  é o calor específico dos sólidos,  $T_g$  é a temperatura do ar de secagem,  $T_s$  é a temperatura do sólido e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização. A área específica do meio de sólidos é dada pela Equação 3,

$$a_r = \frac{2\pi r^2 \rho_s}{m_s} \quad (3)$$

onde  $r$  é o raio da bandeja de secagem e  $m_s$  é a massa do leito de sólidos. A fração mássica de água no equilíbrio é dada pela Equação 4.

$$Y_{s,eq} = \frac{X_e}{1 + X_e} \quad (4)$$

A pressão de vapor é obtida através da Equação 5, de acordo com *Wilheim* (1976),

$$P_v = \frac{UA P_{atm}}{0,62198 + UA} \quad (5)$$

onde  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica e  $UA$  é a umidade absoluta do gás. A pressão de vapor na saturação é dada pela Equação 6, segundo *Wilheim* (1976).

$$P_{vs} = \exp\left(\frac{-7511,52}{T_g} + 89,63121 + 0,02399897T_g - 1,1654551 \cdot 10^{-5}T_g^2 - 1,2810336 \cdot 10^{-8}T_g^3 + 2,0998405 \cdot 10^{-11}T_g^4 - 12,150799 \ln(T_g)\right) \quad (6)$$

O coeficiente global de transferência de calor é dado pela Equação 7,

$$h = \frac{Nu_L K_g}{2r} \quad (7)$$

onde  $K_g$  é condutividade térmica do gás a 0°C e  $Nu_L$  é o número de *Nusselt* local, que, segundo *Incropera e Dewitt* (2014), para uma placa com escoamento turbulento e  $0,6 \leq Pr \leq 60$ , é dado pela Equação 8,

$$Nu_L = (0,037Re_L^{\frac{4}{5}})Pr^{1/3} \quad (8)$$

onde  $Re_L$  é o número de *Reynolds* local e  $Pr$  é o número de *Prandtl*, que é dado pela Equação 9,

$$Pr = \frac{\mu_g C_{p_{ar}}}{K_g} \quad (9)$$

onde  $\mu_g$  é a viscosidade do gás a 0°C e  $C_{p_{ar}}$  é o calor específico do ar seco. Segundo *Himmelblau* (2006),  $C_{p_{ar}}$  é dado pela Equação 10,

$$C_{p_{ar}} = \left[ \frac{28,94 + 0,4147 \cdot 10^{-2}(T_g - 273,15) + 0,31191 \cdot 10^{-5}(T_g - 273,15)^2 \dots - 1,965 \cdot 10^{-9}(T_g - 273,15)^3}{PM_{ar}} \right] \quad (10)$$

onde  $PM_{ar}$  é o peso molecular do ar. O número de *Reynolds* local é dado pela Equação 11,

$$Re_L = \frac{v_g C_{p_{ar}}}{K_g} \quad (11)$$

onde  $v_g$  é a velocidade do gás. A massa específica do gás com base na sua temperatura é dada pela Equação 12.

$$\rho_g = 1,293047 \left( \frac{273,15}{T_g} \right) \quad (12)$$

A umidade dos sólidos em base seca é dada pela Equação 13 e a umidade dos sólidos em base úmida é dada pela Equação 14.

$$UB_s = \frac{Y_s}{1 - Y_s} \quad (13)$$

$$UB_U = 100 \frac{UB_s}{1 + UB_s} \quad (14)$$

A fração mássica de água nos sólidos no tempo zero é dada pela Equação 15.

$$Y_{s,0} = \frac{UB_s}{1 + UB_s} \quad (15)$$

Segundo *Himmelblau* (2006), o calor específico da água líquida é dado pela Equação 16.

$$Cp_{h20} = \frac{79,4}{PM_{h20}} \left( \frac{1}{0,001} \right) \quad (16)$$

O calor específico dos sólidos é dado pela Equação 17,

$$Cp_s = Y_s Cp_{h20} + (1 - Y_s) Cp_{ss} \quad (17)$$

onde  $Cp_{ss}$  é o calor específico dos sólidos secos.

Todas essas equações foram compiladas e a solução do modelo foi obtida através de simulação através do *software* MATLAB. A única incógnita do modelo foi o  $K_p$ , cujo valor foi determinado pelo melhor ajuste aos dados experimentais.

### **Análise de sensibilidade paramétrica**

Uma análise de sensibilidade paramétrica dos parâmetros  $K_p$  e  $Cp_s$  foi realizada na condição de 60°C e velocidade do ar de secagem de 2 m/s usando as faixas de  $9,9 \times 10^{-4}$  a  $3,5 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para o  $K_p$  e 3600 a 1200 J/kgK para o  $Cp_s$ , com 5 valores para cada.

Durante a análise tanto o valor do  $K_p$ , quanto o  $Cp_s$  foram avaliados individualmente, ou seja, cada parâmetro se manteve constante conforme a variação do outro.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Na Tabela 1 são apresentados os valores da umidade inicial e final em base úmida ( $UB_U$ ) e germinação ( $G$ ) obtidos por Borba *et al.* (2018), Dos Santos *et al.* (2018) e Borba *et al.* (2020), além dos valores do coeficiente global de transferência de massa ( $K_p$ ) obtidos pelo ajuste do modelo simulado.

Tabela 1: Dados relacionados aos ensaios de secagem de sementes de cevada e coeficiente global de transferência de massa.

Ensaio	$UB_U$ (%) inicial	$UB_U$ (%) final	$G$ (%)	$K_p$ (kg/m <sup>2</sup> s)
T= 60°C, v=2 m/s	15,95±9,00	7,46±5,00	88,67±0,58	6,7x10 <sup>-4</sup>
T= 60°C, v=1 m/s	14,29±3,73	7,58±8,38	84,67±2,08	2,8x10 <sup>-4</sup>
T= 40°C, v=2 m/s	13,90±7,70	9,83±1,40	84,67±1,52	2,4x10 <sup>-4</sup>
T= 40°C, v=1 m/s	14,29±3,73	10,51±3,41	52,00±1,73	9,0x10 <sup>-5</sup>

Fonte: Autora (2022).

Observa-se na Tabela 1 que ao aumentar a temperatura e velocidade do ar de secagem ocorre a diminuição da umidade em base úmida final. Durante a operação de secagem, a remoção de umidade ocorre por conta da busca pelo equilíbrio termodinâmico entre o ar circundante e o material sólido (FUMAGALLI, 2007). Como em temperaturas mais elevadas a atividade de água é menor, o valor da umidade final do grão é inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas. A velocidade do ar teve maior influência na umidade em base úmida final em temperaturas menores, visto que nos ensaios de 40°C houve uma diminuição de 6,5% na umidade final no ensaio de 2 m/s comparado ao de 1 m/s na mesma temperatura, enquanto nos ensaios de 60°C a redução foi de apenas 1,6%, mas a maior influência é pelo aumento de temperatura, visto que a umidade final diminuiu 24,1% comparando os ensaios de 40°C e 2 m/s e 60°C e 2 m/s.

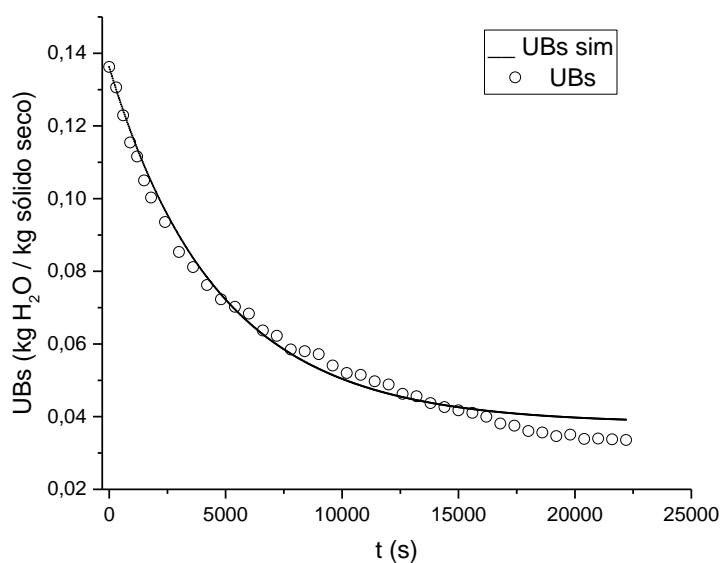
Em termos de germinação, o comportamento esperado é uma redução da germinação com o aumento da temperatura do ar de secagem, visto que altas temperaturas podem danificar a integridade da semente (SOARES, 2016). Porém a germinação nos três primeiros ensaios está na faixa de 88 a 84%, indicando que a temperatura de 60°C não é alta o suficiente para danificar a semente, enquanto a baixa germinação obtida no quarto ensaio pode indicar danos na semente presentes antes da secagem.

Analisando a Tabela 1 pode-se observar que tanto o aumento da velocidade do ar quanto o aumento da temperatura de secagem levam a aumentos significativos do  $K_p$  sem diminuir a germinação da semente. Considerando os ensaios de 40°C, o aumento da velocidade do gás levou a um aumento de 166% no valor do  $K_p$ , enquanto nos ensaios de 60°C o aumento foi de 139%. Já fixando a velocidade do ar de secagem em 1 m/s, o aumento do  $K_p$  ao aumentar a temperatura de 40 a 60°C é de 211%, indicando que, para o modelo utilizado, o aumento da temperatura possui maior

influência na variação do  $K_p$  e que o aumento da velocidade do ar possui maior influência em temperaturas mais baixas.

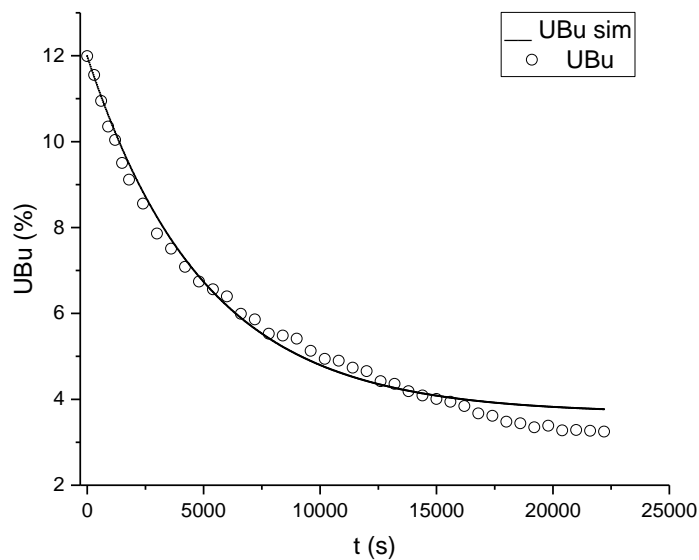
As Figuras 3 a 5 apresentam os ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação à umidade em base seca ( $UB_s$ ), umidade em base úmida ( $UB_u$ ) e temperatura do sólido ( $T_s$ ) em função do tempo de secagem nas diferentes condições de secagem. Essas figuras são referentes aos experimentos com temperatura de ar de secagem  $60^\circ\text{C}$  e velocidade de ar de secagem de  $2\text{m/s}$ . Ressalva-se que aqui só está apresentada essa condição visto que o comportamento das demais foi semelhante as apresentadas aqui.

Figura 3: Ajuste do modelo em relação aos dados experimentais na condição de  $60^\circ\text{C}$  e  $2\text{ m/s}$  para a umidade em base seca.



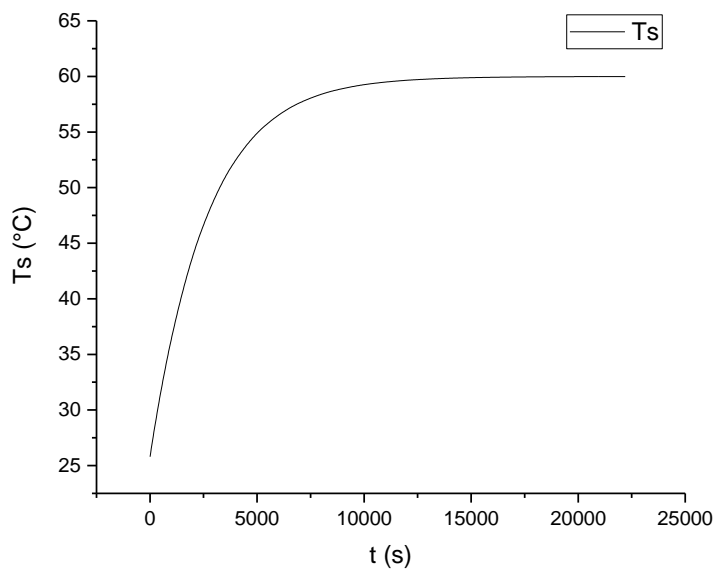
Fonte: Autora (2022).

Figura 4: Ajuste do modelo em relação aos dados experimentais na condição de 60°C e 2 m/s para a umidade em base úmida.



Fonte: Autora (2022).

Figura 5: Temperatura dos grãos de cevada durante o processo de secagem para a condição de 60°C e 2 m/s.



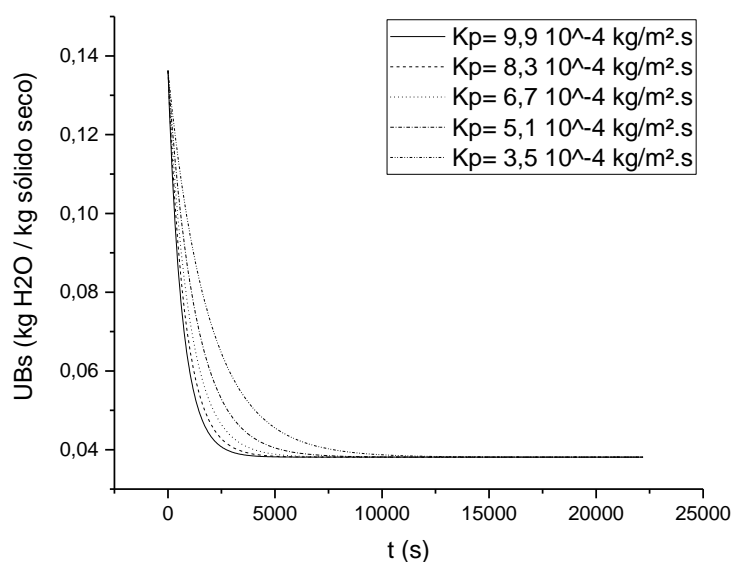
Fonte: Autora (2022).

Analisando as Figuras 3 e 4, observa-se que a taxa de transferência de energia ocasionada pela diferença de temperatura entre a semente e o ar de secagem diminui com o tempo. Consequentemente, a taxa de secagem e retirada de água do material diminui, tendendo ao equilíbrio se o processo fosse executado até o final, isto é, com o tempo tendendo ao infinito. Esse comportamento é o esperado para a curva de secagem em leito fixo.

Devido à dificuldade de obtenção da temperatura do sólido experimentalmente, não foi possível obter o perfil de temperatura das sementes durante o processo de secagem, apenas através do modelo proposto como apresentado na Figura 4. Analisando a Figura 5, devido a diferença de temperatura entre o ar de secagem e as sementes, ocorre transferência de calor, o que leva ao aumento da temperatura das sementes até que ambas atinjam o equilíbrio.

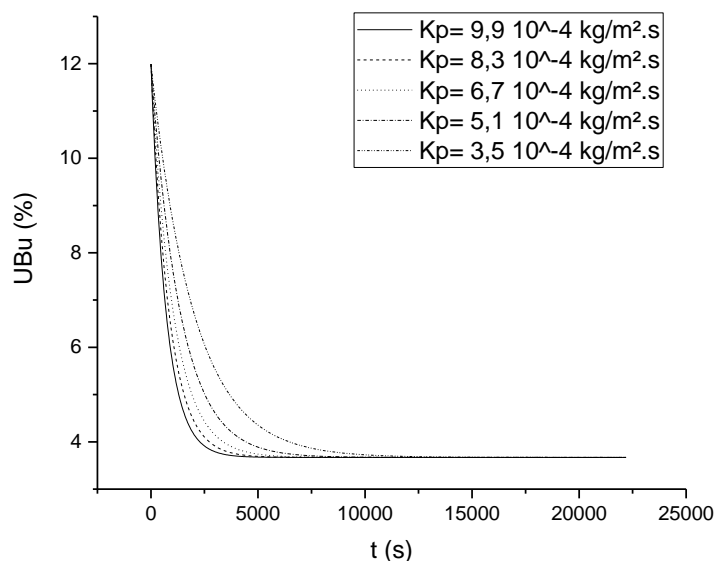
As Figuras 6 a 8 apresentam os resultados da análise de sensibilidade paramétrica para o  $K_p$ .

Figura 6: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $K_p$  em relação a  $UB_s$ .



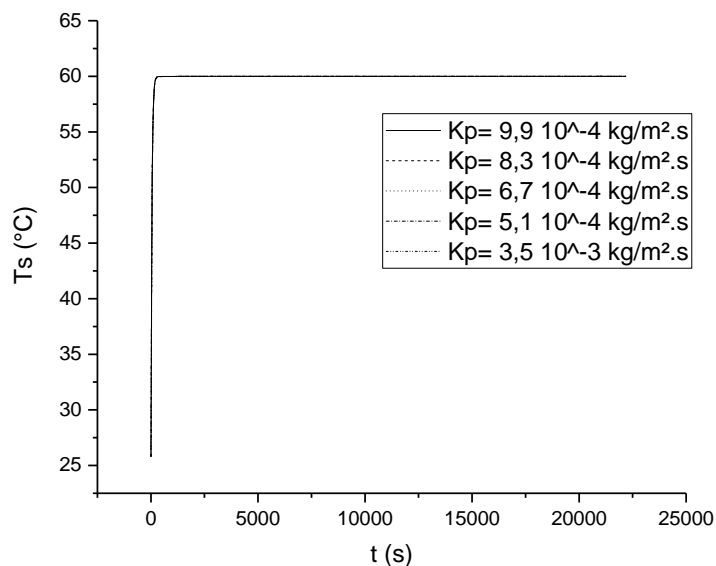
Fonte: Autora (2022).

Figura 7: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $K_p$  em relação a  $UB_u$ .



Fonte: Autora (2022).

Figura 8: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $K_p$  em relação a  $T_s$ .



Fonte: Autora (2022).

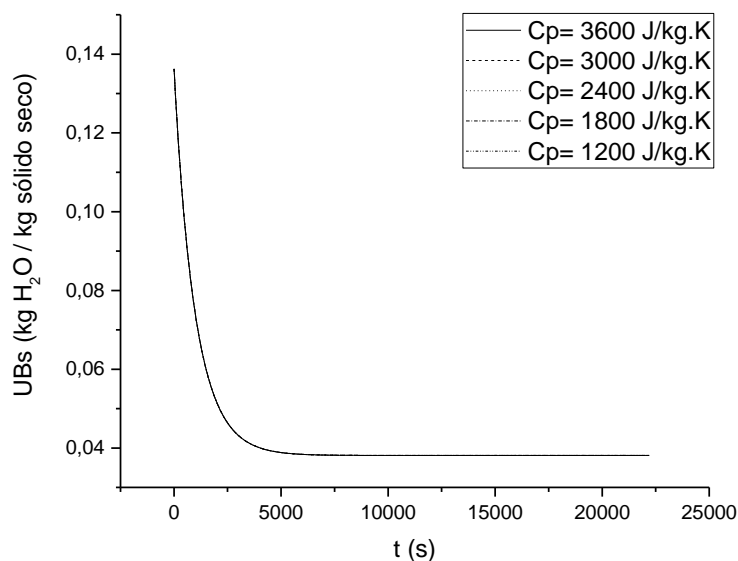
Através das Figuras 6 e 7 é possível observar que o aumento do  $K_p$  leva a amostra a atingir a umidade de equilíbrio mais rapidamente, isso ocorre pois por definição o  $K_p$  representa a parcela de umidade que migra do sólido por unidade de área a cada segundo.



Analisando a Figura 8, o aumento ou diminuição do  $K_p$  não teve efeito na temperatura do sólido, o que é esperado visto que o  $K_p$  não influencia a transferência de calor entre as sementes e o ar de secagem.

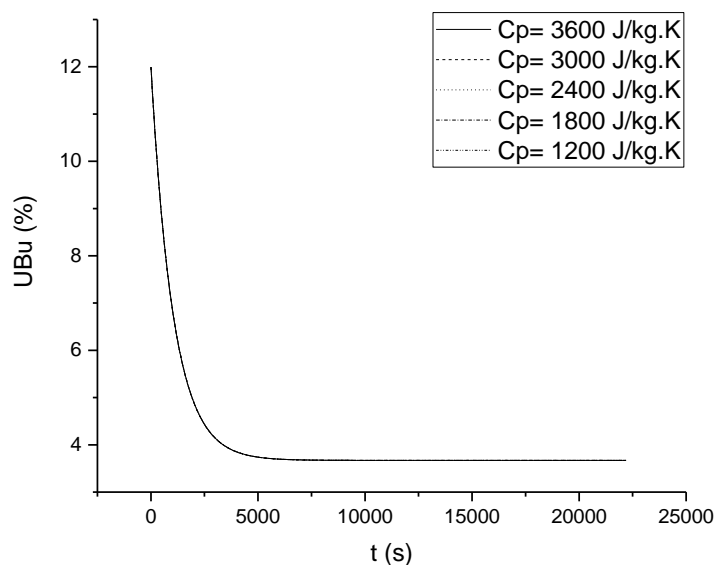
As Figuras 9 a 11 apresentam os resultados da análise de sensibilidade paramétrica para o  $C_{p_s}$ .

Figura 9: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $C_{p_s}$  em relação a  $UB_s$ .

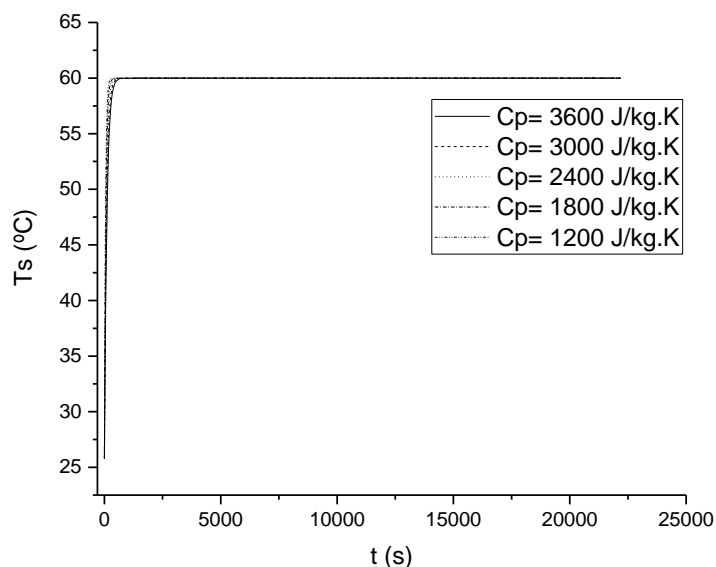


Fonte: Autora (2022).

Figura 10: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $C_{p_s}$  em relação a  $UB_u$ .



Fonte: Autora (2022).

Figura 11: Análise de sensibilidade paramétrica para o  $Cp_s$  em relação a  $T_s$ .

Fonte: Autora (2022).

Analisando as Figuras 9 e 10 demonstram que não há variação nas umidades em base seca e úmida ao variar o  $Cp_s$ . Os desvios sofridos pelo modelo com a variação do  $Cp_s$  não são significativos, classificando o valor utilizado pelo  $Cp_s$  como válido para o modelo. Já na Figura 11 é possível observar que a diminuição do calor específico do sólido ( $Cp_s$ ) acarreta em leve variação na temperatura dos sólidos e isso ocorre porque fisicamente ela depende diretamente do  $Cp_s$ .

#### 4. CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados pode-se concluir que ao aumentar a temperatura e velocidade do ar de secagem a umidade final das sementes diminui e o efeito do aumento da velocidade do ar foi mais pronunciado em temperaturas menores, levando a uma redução de 6,5% na umidade em base úmida final comparando os ensaios de 1 m/s e 2 m/s para a temperatura de 40 °C, enquanto para os ensaios de 60°C a redução é de 1,6%.

O aumento da temperatura do ar de secagem de 40°C para 60°C não acarretou a diminuição de capacidade germinativa, indicando que esta temperatura não ocasionou danos na semente.

No modelo de secagem descrito neste trabalho, o aumento da temperatura do ar de secagem leva a maior influência no coeficiente global de transferência de massa ( $K_p$ ), porém o efeito do aumento da velocidade do ar também é pronunciado. Para os ensaios de 60°C, os valores são de  $2,8 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $6,7 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para as velocidades de 1 m/s e 2 m/s respectivamente. Para os ensaios de 40°C os valores são de  $9,0 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $2,4 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para as velocidades de 1 m/s e 2 m/s respectivamente.

Através da análise de sensibilidade paramétrica é possível observar que o aumento do  $K_p$  leva a amostra a atingir a umidade de equilíbrio mais rapidamente, mas não tem efeito na temperatura do sólido. Já o aumento do  $Cp_s$  leva a leve alteração na temperatura do sólido, mas não acarreta alteração na umidade. Os resultados obtidos demonstram que o valor de  $Cp_s$  utilizado é apropriado.

## REFERÊNCIAS

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, [S.l.], v. 73, n. 1, p. 75-84, mar. 2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877405000415>. Acesso em: 13 abr. 2021.

BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains**. 2. ed., [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltda., 2017

BORBA, L. B. *et al.* REUMIDIFICAÇÃO E ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADA (*Hordeum vulgare L.*) EM LEITO FIXO. *Em*: CONGRESSO REGIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA QUÍMICA, 23., 2018, Bagé, RS. **Mostra De Iniciação Científica** [...]. Bagé, RS: [s. n.], 2018.

BORBA, L. *et al.* ESTUDO COMPARATIVO DE SECAGEM DE CEVADA (HORDEUM VULGARE L.). **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 10, n. 2, 3 mar. 2020.

DOS SANTOS, V. D. *et al.* ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM EM LEITOS DE JORRO E FLUIDIZADO DE SEMENTES DE CEVADA (*Hordeum vulgare L.*). **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa**, Bagé, RS, ano 2018, v. 15, n. 15, p. 168-178, 5 out. 2018. Disponível em: <http://revista.urcamp.tche.br/index.php/rcjppg/article/view/2812>. Acesso em: 5 dez. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Sistema FAOSTAT. **Statistical databases**. Roma: FAO, 2019. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 06 mar. 2021.

FUMAGALLI, F.; **Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de *brachiária brizantha***. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos (Doutorado), 2007.

GUILMANN, A. P. E.; SANTOS, C. V. O complexo agroindustrial da cevada no Brasil: caracterização, aspectos econômicos e distribuição espacial. *In*: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 25., 2016, Ponta Grossa. **Anais** [...]. Ponta Grossa: UEPG, 2016. Disponível em: [http://apps.uepg.br/propesp/pesquisa/eaic/public/storage/uploads/2016/08023110918/2016-09-11\\_14-53-30.pdf](http://apps.uepg.br/propesp/pesquisa/eaic/public/storage/uploads/2016/08023110918/2016-09-11_14-53-30.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.

HIMMELBLAU, D. M.; J. B., **Engenharia Química –Princípios e Cálculos**, 7ªed., Rio de Janeiro, LTC, 2006.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

KUNZE, W. **Technology brewing and malting**. Berlin: Versuchs und Lehranstalt für Brauerei, 2004.

MINELLA, E. *et al.* Cultivar BR-2: cultivar de cevada cervejeira resistente à mancha-reticular causada por *Pyrenophora teres*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2163-2168, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001100025>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X1999001100025&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X1999001100025&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 22 mar. 2021.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 1-29, jun. 1985. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0021863485901167>. Acesso em: 13 abr. 2021.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 54, p. 339-352, 1993.

PRADO, M. M. **Secagem de sementes de mamão papaya**. 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2000.

SILVA, L. C. **Fungos e micotoxinas em grãos armazenados**. Viçosa: AGAIS, 2005. Disponível em: <http://www.agais.com/fungos.htm#DEB>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SOARES, M. A. B *et al.* Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. **Food Science and Technology** (Campinas) [online]. 2016, v. 36, n. 4, pp. 638-645. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.11916>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/yxKV7pjcT43vnPKBbHnjMHt/?lang=en#>. Acesso em: 12 de out. 2021.

SWEETS, L. **Stored grain fungi**. Starkville: Mississippi Soybean Promotion Board, 2018. Disponível em: <https://www.mssoy.org/uploads/files/stored-grain-fungi-mu.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2021.

WILHELM, L.R. Numerical Calculation of Psychrometric Properties in SI Units. **Transactions of the ASAE** 19, 318-321, 1976. National Agricultural Library Catalog (AGRICOLA), Beltsville.

## 5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões do trabalho com base aos objetivos propostos.

Para os dados analisados a umidade inicial em base úmida das sementes ficou entre  $13,90 \pm 7,70$  a  $15,95 \pm 9,00$  %, condizente com o esperado para cevada *in natura*. As umidades em base úmida após a secagem são de  $10,51 \pm 3,41 \times 10^{-2}$  e  $9,83 \pm 1,40 \times 10^{-4}$  % para a temperatura do ar de secagem de  $40^\circ\text{C}$  e velocidade do ar de 1 e 2 m/s, respectivamente, e  $7,58 \pm 8,38 \times 10^{-2}$  e  $7,46 \pm 5,00 \times 10^{-4}$  % para  $60^\circ\text{C}$  e 1 e 2 m/s, respectivamente. Fixando a velocidade do ar em 1 m/s, ao aumentar a temperatura do ar de secagem de  $40^\circ\text{C}$  para  $60^\circ\text{C}$  observa-se uma redução de 20,1% na umidade final. O aumento da velocidade do ar de secagem é mais efetivo em temperaturas mais baixas, com redução de umidade de 6,5% com aumento de 1 para 2 m/s na velocidade do ar em  $40^\circ\text{C}$  e de apenas 1,6% nas mesmas circunstâncias na temperatura de  $60^\circ\text{C}$ .

Para o estudo relacionado às curvas da cinética de secagem das sementes de cevada conclui-se que as mesmas tiveram um comportamento típico de secagem. Na avaliação das curvas de umidade em função do tempo conclui-se que o aumento na temperatura e na velocidade do ar de secagem acarretam um aumento na força motriz de secagem, e conseqüentemente diminuem a umidade das sementes. O modelo global de secagem proposto obteve bom ajuste aos dados e permite a análise do coeficiente global de transferência de massa ( $K_p$ ) nas condições estudadas.

Os valores de  $K_p$  obtidos para os ensaios de  $60^\circ\text{C}$ , os valores são de  $2,8 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $6,7 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para as velocidades de 1 m/s e 2 m/s respectivamente. Para os ensaios de  $40^\circ\text{C}$  os valores são de  $9,0 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>s e  $2,4 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s para as velocidades de 1 m/s e 2 m/s respectivamente. Tanto o aumento da velocidade do ar quanto o aumento da temperatura de secagem levam a aumentos significativos do  $K_p$ . Considerando os ensaios de  $40^\circ\text{C}$ , o aumento da velocidade do gás levou a um aumento de 166% no valor do  $K_p$ , enquanto nos ensaios de  $60^\circ\text{C}$  o aumento foi de 139%. Já fixando a velocidade do ar de secagem em 1 m/s, o aumento do  $K_p$  ao aumentar a temperatura de 40 a  $60^\circ\text{C}$  é de 211%, indicando que, para o modelo utilizado, o aumento da temperatura possui maior influência na variação do  $K_p$  e que o aumento da velocidade do ar possui maior influência em temperaturas mais baixas.

Os valores de germinação obtidos são de  $52 \pm 1,73$  e  $84,67 \pm 1,53\%$  para as condições de  $40^\circ\text{C}$  e velocidades do ar de 1 e 2 m/s, respectivamente, e de  $84,67 \pm 2,08$  e  $88,67 \pm 0,58\%$  para as condições de  $60^\circ\text{C}$  e 1 e 2 m/s, respectivamente. Portanto, a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  não ocasionou danos as sementes, e o aumento do  $K_p$  não alterou significativamente a germinação. A baixa germinação no ensaio de  $40^\circ\text{C}$  e 1 m/s pode ser explicado por danos presentes na amostra antes da secagem.

Por fim, no estudo comparativo dos valores do coeficiente global de transferência de massa e do calor específico de sólido seco para as sementes de cevada, com suas variações na análise de sensibilidade paramétrica do modelo, conclui-se que os  $K_p$  encontrados são o melhor ajuste possível para previsão da operação de secagem de sementes de cevada em leito fixo, e que o valor de  $C_{p_s}$  utilizado não influenciou significativamente na simulação da operação.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados apresentados no presente trabalho, pode-se sugerir como complementação do estudo:

- a) utilizar outras técnicas de secagem como o secador de leite fluidizado, bem como outras faixas de temperatura para um melhor entendimento da influência da secagem sobre as alterações das propriedades estudadas no presente trabalho e,
- b) o estudo da simulação de outros modelos de secagem como os modelos difusivos discutidos neste trabalho e,
- c) o estudo de qual condições de secagem são mais apropriadas para atingir a umidade apropriada para armazenamento de 12% ou menos de maneira mais rápida e eficiente.



## REFERÊNCIAS

ALBINI, G. **Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leite fixo**. 2015. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4156>. Acesso em: 20 abr. 2021.

ALBINI, G. **Estudo da secagem de grãos em leite fixo, com e sem escoamento reverso do ar de secagem**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11384>. Acesso em: 20 abr. 2021.

AL-MUHTASEB, A. H. *et al.* Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. **Food and Bioproducts Processing**, [S.l.], v. 80, n. 2, jun. 2002. parte C, p. 118-128. DOI <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308502703052>. Acesso em: 13 abr. 2021.

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, [S.l.], v. 73, n. 1, p. 75-84, mar. 2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877405000415>. Acesso em: 13 abr. 2021.

AKPINAR, E. K. Drying of parsley leaves in a solar dryer and under open sun: Modeling, energy and exergy aspects. **Journal of Food Process Engineering**, [S.l.], v. 34, n. 1, p. 27-48, 26 jan. 2011. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00335.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2008.00335.x>. Acesso em: 13 abr. 2021.

AMGARTEN, Dione Rodrigues. **Determinação do volume específico de poros de sílicas cromatográficas por dessorção de líquidos em excesso**. 2006. 66f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/250692>. Acesso em: 7 abr. 2021.

ANDRADE, R. D. *et al.* Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. **Vitae**, Medellín, v. 18, n. 3, p. 325-334, set. 2011. Disponível em: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-40042011000300012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-40042011000300012&lng=en&nrm=iso). Acesso em 25 Apr. 2021.

ANDRADE, R. C. **Preparação e caracterização de carvão ativado a partir de material alternativo lignocelulósico**. Orientador: Dr. Cláudio Teodoro de Carvalho. 2014. 65 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Grande Dourados Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2014. Disponível em: <https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-QUIMICA/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Robson.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2021.

BABBITT, J. D. Observations on the adsorption of water vapour by wheat. **Canadian Journal of Research**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 55-72, fev. 1949. DOI <https://doi.org/10.1139/cjr49f-007>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237168546\\_Observations\\_on\\_the\\_adsorption\\_of\\_water\\_vapour\\_by\\_wheat](https://www.researchgate.net/publication/237168546_Observations_on_the_adsorption_of_water_vapour_by_wheat). Acesso em: 13 abr. 2021.

BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains**. 2. ed., [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltda., 2017.

BELETI, M. A.; DUARTE, F.; GEORG-KRAEMER, J. E. Temperature on the development activity of (1-3, 1-4)- $\beta$ -glucanases enzyme and degradation of  $\beta$ -glucans during malting. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 3, p. 467-473, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cr/v42n3/a9012cr5341.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.

BHANDARI, B. R.; ADHIKARI, B. P. Water activity in food processing and preservation. In: **DRYING Technologies in Food Processing**. 1. ed. West Sussex, Reino Unido: Blackwell Publishing Ltd, 2008. p. 55-89.

BORBA, L. B. *et al.* REUMIDIFICAÇÃO E ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADA (*Hordeum vulgare L.*) EM LEITO FIXO. *Em: CONGRESSO REGIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA QUÍMICA*, 23., 2018, Bagé, RS. **Mostra De Iniciação Científica** [...]. Bagé, RS: [s. n.], 2018.

BORBA, L. *et al.* ESTUDO COMPARATIVO DE SECAGEM DE CEVADA (HORDEUM VULGARE L.). **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 10, n. 2, 3 mar. 2020.

BOTELHO, Fernando M. *et al.* Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 845-852, Aug. 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662011000800012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000800012&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 25 Apr. 2021. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800012>.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S. l.], v. 32, n. 4, p. 337-348, dez. 1985. DOI [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90098-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0021863485900988>. Acesso em: 13 abr. 2021.

BRUCE, D. M.; SOKHANSANJ, S. A conduction model to predict grain temperatures in grain drying simulation. **Transactions of the ASAE**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 1181-1184, 1987. DOI [10.13031/2013.30541](https://doi.org/10.13031/2013.30541). Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30541>. Acesso em: 13 abr. 2021.

CARPENTIERI-PIPOLO, V.; KIIHL, T. A. M. A conservação *ex situ* de cevada: um interesse público. Possibilidades de integração global em pesquisa de desenvolvimento de cultivares para a expansão do cultivo no Brasil. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 32., 2019, Passo Fundo. **Anais** [...]. Brasília,

DF: Embrapa, 2019. p. 67-71. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205324/1/ID44774-2019RNPC32anaisp67.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2021.

CHIRIFE, J. Fundamentals on the drying mechanism during air dehydration of food. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in Drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 1983, p. 73 – 102.

CLEVE, H.; HOFFMAN, H. J. Temperaturmessung im Getreidekom. **Mullerei**, [S. l.], v. 5, n. 29, p. 56-62, 1952.

CORRÊA, P. C. *et al.* Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e Modelagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, [S. l.], v. 4, n. 01, p. 126-134, jan. 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v4n1p126-134>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/242166060\\_Isotermas\\_de\\_Sorcao\\_das\\_Espigas\\_de\\_Milho\\_Obtencao\\_e\\_Modelagem](https://www.researchgate.net/publication/242166060_Isotermas_de_Sorcao_das_Espigas_de_Milho_Obtencao_e_Modelagem). Acesso em: 13 abr. 2021.

DE MORI, C.; MINELLA, E. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. Disponível em: [http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do139.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do139.htm). Acesso em: 06 mar. 2021.

DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES AND REGIONAL DEVELOPMENT. Government of Western Australia. **Grain storage**: maintaining grain quality. South Perth: DPIRD, 2019. Disponível em: <https://www.agric.wa.gov.au/barley/grain-storage-maintaining-grain-quality>. Acesso em: 22 mar. 2021.

DOS SANTOS, V. D. *et al.* ESTUDO COMPARATIVO DA SECAGEM EM LEITOS DE JORRO E FLUIDIZADO DE SEMENTES DE CEVADA (*Hordeum vulgare* L.). **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa**, Bagé, RS, ano 2018, v. 15, n. 15, p. 168-178, 5 out. 2018. Disponível em: <http://revista.urcamp.tche.br/index.php/rcjgpp/article/view/2812>. Acesso em: 5 dez. 2021.

PASSA, B. C. *et al.* Modelagem matemática e simulação computacional de secadores de erva-mate em leito fixo. **TEMA**, São Carlos, v. 4, n. 1, p. 99-108, 1 mar. 2003. DOI <http://dx.doi.org/10.5540/tema.2003.04.01.0099>. Disponível em: <https://tema.sbmac.org.br/tema/article/view/390/326>. Acesso em: 13 abr. 2021.

DISSA, A. O. *et al.* Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 88, p. 429-437, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877408001362>. Acesso em: 12 mar. 2021.

EARLE, R. L. **Unit Operations in Food Processing**. Ed. Web. Palmerston North, Nova Zelândia: The New Zealand Institute of Food Science & Technology (Inc.), 2004.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [S. l.], v. 50,

n. 5, p. 441-464, 5 abr. 2010. DOI <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408390802437063?journalCode=bfsn20>. Acesso em: 13 abr. 2021.

ERTEKIN, C.; ZIYA, F. M. A comprehensive review of thin layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [S. l.], v. 57, n. 5, p. 37-41, mai. 2015. DOI: 10.1080/10408398.2014.910493. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273323398\\_A\\_Comprehensive\\_Review\\_of\\_Thin\\_Layer\\_Drying\\_Models\\_Used\\_in\\_Agricultural\\_Products](https://www.researchgate.net/publication/273323398_A_Comprehensive_Review_of_Thin_Layer_Drying_Models_Used_in_Agricultural_Products). Acesso em: 12 abr. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Sistema FAOSTAT. **Statistical databases**. Roma: FAO, 2019. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 06 mar. 2021.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas**. 2.ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.

FOUST, A. S.; *et al.* **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro, LTC, 2008.

FREITAS, R. P. **Estudo experimental e da simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leite fluidizado**. 127 p. 2016. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2016. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/rii/2432>. Acesso em: 12 abr. 2021.

FUMAGALLI, F.; **Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de *brachiária brizantha***. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos (Doutorado), 2007.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3º Edição, México, CECSA, 1998.

GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Caracterização e isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [S. l.], v.4, n. 2, p.157-165, 2002. DOI: 10.15871/1517-8595/rbpa.v4n2p157-165. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276458950\\_CHARACTERIZACAO\\_E\\_ISOTERMAS\\_DE\\_ADSORCAO\\_DE\\_UMIDADE\\_DA\\_POLPA\\_DE\\_ACEROLA\\_EM\\_PO](https://www.researchgate.net/publication/276458950_CHARACTERIZACAO_E_ISOTERMAS_DE_ADSORCAO_DE_UMIDADE_DA_POLPA_DE_ACEROLA_EM_PO). Acesso em: 13 abr. 2021.

GUILMANN, A. P. E.; SANTOS, C. V. O complexo agroindustrial da cevada no Brasil: caracterização, aspectos econômicos e distribuição espacial. *In*: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 25., 2016, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: UEPG, 2016. Disponível em: [http://apps.uepg.br/proresp/pesquisa/eaic/public/storage/uploads/2016/08023110918/2016-09-11\\_14-53-30.pdf](http://apps.uepg.br/proresp/pesquisa/eaic/public/storage/uploads/2016/08023110918/2016-09-11_14-53-30.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.

HELLEVANG, K. J; WILCKE, W. **Drying wheat and barley**. 2018. Disponível em: <https://extension.umn.edu/small-grains-harvest-and-storage/drying-wheat-and-barley#process%3A-how-it-works-1407760>. Acesso em: 5 de mar. de 2021.

HIMMELBLAU, D. M.; J. B., **Engenharia Química –Princípios e Cálculos**, 7ªed., Rio de Janeiro, LTC, 2006.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JAYAS, D. S., *et al.* Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v. 9, n. 3, p. 551 – 558, 1991. DOI: 10.1080/07373939108916697. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/233125358\\_Review\\_of\\_Thin-Layer\\_Drying\\_and\\_Wetting\\_Equations](https://www.researchgate.net/publication/233125358_Review_of_Thin-Layer_Drying_and_Wetting_Equations). Acesso em: 13 abr. 2021.

KANAAN, A. F. **Análise da secagem de cornichão (*Lotus Corniculatus L.*) em leito fixo com escoamento de ar paralelo**. Dissertação de mestrado, Unipampa, 2014. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/1238>. Acesso em: 13 abr. 2021.

KADAM, D.M.; DHINGRA, D. Mass transfer kinetics of banana slices during osmo-convective drying. **Journal of Food Process Engineering**, [S. l.], v. 34, p. 511-532, 29 mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2009.00373.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2009.00373.x>. Acesso em: 13 abr. 2021.

KAHVECI, K.; CIHAN, A. **Drying of Food Materials: Transport Phenomena**. [S. l.]: Nova Science Publishers Inc., 2008. 176 p. ISBN 978-1-60456-231-6.

KHATCHATOURIAN, O. A. Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. **Biosystems Engineering**, [S. l.], v. 113, n. 1, p. 54-64, set. 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.06.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511012001018>. Acesso em: 22 abr. 2021.

KEEY, R. B. Introduction. *In*: KEEY, R. B. **Drying: Principles and Practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972. cap. 1, p. 1-18. ISBN 978-0-08-016903-3.

KOSZELA, K. *et al.* Computer image analysis in caryopses quality evaluation as exemplified by malting barley. *In*: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL IMAGE PROCESSING, 7., 2015, Los Angeles. **Proceedings** [...]. Los Angeles: [s. n.], 2015. DOI <https://doi.org/10.1117/12.2197032>. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9631/96310V/Computer-image-analysis-in-caryopses-quality-evaluation-as-exemplified-by/10.1117/12.2197032.short?SSO=1>. Acesso em: 13 abr. 2021.

KUMAR, D. P. *et al.* Suitability of thin layer models for infrared–hot air-drying of onion slices. **LWT - Food Science and Technology**, [S. l.], v. 39, n. 6, p. 700-705, ago.

2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643805000897>. Acesso em: 13 abr. 2021.

KUMAR, D. *et al.* Quality parameter requirement and standards for malt barley-A review. **Agricultural Reviews**, Karnal, v. 34, n. 4, p. 313, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/271352662\\_Quality\\_parameter\\_requirement\\_and\\_standards\\_for\\_malt\\_barley-A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/271352662_Quality_parameter_requirement_and_standards_for_malt_barley-A_review). Acesso em: 22 mar. 2021.

KUNZE, W. **Technology brewing and malting**. Berlin: Versuchs und Lehranstalt für Brauerei, 2004.

LIZARAZO, D. X. C. **Parâmetros físico-químicos, germinativos e microestruturais de qualidade em cultivares brasileiros de cevada cervejeira**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Agrárias, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86505/191732.pdf?sequence=1#:~:text=Para%20que%20a%20maltagem%20seja,et%20al.%2C%201997>). Acesso em: 30 mar. 2021.

MARCHANT, J. A. Numerical Solution of the Diffusion Equation in a Sphere with a Concentration Dependent Diffusivity. **NIAE**, Silsoe, v. 718, 1976.

MINELLA, E. *et al.* Cultivar BR-2: cultivar de cevada cervejeira resistente à mancha-reticular causada por *Pyrenophora teres*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2163-2168, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001100025>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X1999001100025&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X1999001100025&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 22 mar. 2021.

PARK, K. J. B. *et al.* Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [S. l.], v.10, n. 1, p.83-94, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v10n1p83-94>. Disponível em: <http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1413-rbpa/v10n01/15133-consideracoes-temodinamicas-das-isotermas.html>. Acesso em: 13 abr. 2021.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 1-29, jun. 1985. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0021863485901167>. Acesso em: 13 abr. 2021.

PABIS, S.; HENDERSON, S. M. Grain Drying Theory. III The Air Grain Temperature Relationship. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S. l.], v. 7, p. 21-28, 1962.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 54, p. 339-352, 1993.

PINHEIRO, L. G. S. **Caracterização e processamento de cevada cultivada no Cerrado brasileiro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química e Biológica) – Universidade de Brasília. Programa de Pós-graduação em Tecnologia Química e Biológica, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/21655>. Acesso em: 22 mar. 2021.

PINTO, A. R. M. **Avaliação do processo de secagem no fabrico de malte**: caso de estudo da sociedade central de cervejas e bebidas, SA. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Alimentar - Processamento de Alimentos) – Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/5678/1/Ana%20Rita%20Pinto%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%202013.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2021.

PORPINO, K. K. P. **Biossorção de ferro (ii) por casca de caranguejocidescordatus**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2009.

PRADO, M. M. **Secagem de sementes de mamão papaya**. 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2000.

REIS, D. C. N. S. P. **Importância do Estudo da Área Superficial Específica e Porosidade do Estearato de Magnésio Para o Setor Farmacêutico**. Orientador: Rafael Cardoso Seiceira. 2013. 71 p. Monografia (Especialista em Tecnologias Industriais Farmacêuticas) - Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/7720/2/25.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2021.

REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA. Indicações técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2017 e 2018. REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 31., 2017, Guarapuava. **Anais [...]**. Guarapuava: Embrapa Trigo, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172363/1/ID44294-2017SP9IndicacoesCevada2017-2018.pdf>. Acesso em: 22 de mar de 2021.

REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA. Indicações técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2019 e 2020. REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 32., 2019, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205744/1/ID44787-2019SP10RNPC32indicacoes.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SCHWANKE, R. O. **Determinação da difusividade de hidrocarbonetos aromáticos em zeólitas y por métodos cromatográficos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/85895>. Acesso em: 13 abr. 2021.

SHERWOOD, T.K., The Drying of Solids, **Ind. Ing. Chem.**, 21, 1, pp. 12-16 (1929).

SILVA, L. C. **Fungos e micotoxinas em grãos armazenados**. Viçosa: AGAIS, 2005. Disponível em: <http://www.agais.com/fungos.htm#DEB>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SOARES, M. A. B *et al.* Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. **Food Science and Technology** (Campinas) [online]. 2016, v. 36, n. 4, pp. 638-645. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.11916>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/yxKV7pjcT43vnPKBbHnjMHt/?lang=en#>. Acesso em: 12 de out. 2021.

SUMNER, A. K., *et al.* The effect of immaturity and harvesting method on the properties and quality of barley. **Canadian journal of plant Science**, [S. l.], v. 67, n. 4, p. 953-963, 1987. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps87-133>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjps87-133>. Acesso em: 13 abr. 2021.

SWEETS, L. **Stored grain fungi**. Starkville: Mississippi Soybean Promotion Board, 2018. Disponível em: <https://www.mssoy.org/uploads/files/stored-grain-fungi-mu.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2021.

VIJAYARAJ, B. Studies on thin layer drying of bagasse. **International Journal of Energy Research**, [S. l.], v. 31, p. 422-437, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.1237>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1237>. Acesso em: 13 abr. 2021.

WILHELM, L.R. Numerical Calculation of Psychrometric Properties in SI Units. **Transactions of the ASAE** 19, 318-321, 1976. National Agricultural Library Catalog (AGRICOLA), Beltsville.

WOONTON, B. W., *et al.* Changes in germination and malting quality during storage of barley. **Journal of the Institute of Brewing**, [S. l.], v. 111, no. 1, p. 33-41, 2005. DOI: [10.1002/j.2050-0416.2005.tb00646.x](https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2005.tb00646.x). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228348278\\_Changes\\_in\\_Germination\\_and\\_Malting\\_Quality\\_During\\_Storage\\_of\\_Barley](https://www.researchgate.net/publication/228348278_Changes_in_Germination_and_Malting_Quality_During_Storage_of_Barley). Acesso em: 13 abr. 2021.

YOUNG, J. H. Simultaneous heat and mass transfer in porous hygroscopic solid. **Transactions of the ASAE**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 720-725, 1969. DOI: [10.13031/2013.38936](https://doi.org/10.13031/2013.38936). Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38936&t=3&redir=&redirType=>. Acesso em: 13 abr. 2021.