

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA SECAGEM DE GRÃOS EM LEITO FIXO, COM E SEM  
ESCOAMENTO REVERSO DO AR DE SECAGEM**

**GEISA ALBINI**

**SÃO CARLOS**

**2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**GEISA ALBINI**

**ESTUDO DA SECAGEM DE GRÃOS EM LEITO FIXO, COM E SEM  
ESCOAMENTO REVERSO DO AR DE SECAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Teixeira Freire

**Coorientador:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

**SÃO CARLOS**

**2019**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE GEISA ALBINI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 25 DE MARÇO DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:



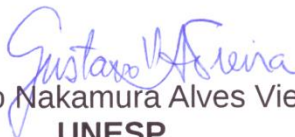
José Teixeira Freire  
**Orientador, UFSCar**



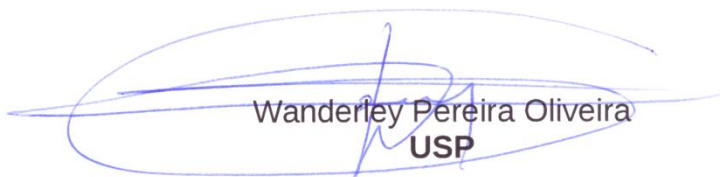
Fábio Bentes Freire  
**UFSCar**



Maria do Carmo Ferreira  
**UFSCar**



Gustavo Nakamura Alves Vieira  
**UNESP**



Wanderley Pereira Oliveira  
**USP**

*Este trabalho é dedicado aos meus pais,  
Aparecida e José, pelo carinho, apoio e incentivo.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e perseverança necessárias para superar as adversidades e seguir caminhando.

Nesta caminhada, muitas foram as pessoas que estiveram presentes, direta e indiretamente, contribuindo com sugestões, conhecimento, um gesto de apreço e amizade. Quero deixar aqui o meu agradecimento. Em especial:

- Aos meus pais, Aparecida e José, pelo amor, carinho e dedicação incondicional. Minha gratidão eterna;
- À minha avó Carmen;
- Aos meus irmãos Giuliano e Giovane;
- À Catharina, Beatriz e Théo, meus queridos sobrinhos;
- Ao querido professor José Teixeira Freire pela orientação, dedicação, ensinamentos e carinho, fundamentais para concretizar este trabalho;
- Ao Prof. Dr. Fábio Bentes Freire pelo incentivo e auxílio nas discussões;
- À Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira, pelas diversas formas de contribuições feitas no decorrer do trabalho, sempre generosa e carinhosa;
- Ao Prof. Dr. Gustavo Dias Maia pelo carinho e toda ajuda;
- Aos demais professores da Área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar, Ronaldo Guimarães Corrêa, Rodrigo Béttega e Thiago Faggió de Pádua;
- Aos membros da banca, Prof. Dr. Wanderley Pereira Oliveira (USP) e Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira (UNESP), pela disponibilidade e sugestões;
- Ao técnico Edilson Milaré pelo auxílio e disponibilidade, e pelas trocas de ideais e ensinamentos;
- Aos técnicos Oscar e Samuel pelo valioso auxílio na montagem e manutenção dos equipamentos, que foram fundamentais;
- À Cooperativa Agrária Agroindustrial pela doação dos grãos de cevada;
- Aos amigos do CS e DEQ/UFSCar, pelo companheirismo, ajuda e momentos de descontração. Em especial à Ananda e Felipe.
- Às amigas de ontem, de hoje e de sempre, que mesmo distantes, sempre se fizeram presentes: Ana Cristina, Danielle, Priscila, Cássia, Mariela, Larissa, Tatiane, Gabriela e Bruna.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSCar, a CAPES e ao CNPq (Projeto 402418/2016-6), pela oportunidade e apoio financeiro.

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas.”

*O Pequeno Príncipe – Antoine Saint- Exupéry*

## RESUMO

Visando contribuir para o desenvolvimento do processo de secagem em leito fixo, este trabalho tem por objetivo o estudo experimental sobre a secagem de grãos de cevada em leito fixo, sem e com escoamento reverso do ar de secagem. Os experimentos de secagem consistem na obtenção de dados de umidade e temperatura em função do tempo, avaliando a influência das principais variáveis operacionais de processo, como conteúdo de umidade inicial dos grãos e temperatura do ar de secagem. O encolhimento do leito de grãos de cevada, exposto a diferentes condições de secagem, foi avaliado e quantificado para ser incorporado na modelagem matemática do processo de secagem. Os experimentos de secagem foram realizados em um secador de leito fixo, que opera com escoamento de ar ascendente e descendente, possibilitando o processo de secagem com reversões do escoamento do ar. Os experimentos para determinação da distribuição de temperatura e umidade, sem e com escoamento reverso do ar de secagem, foram realizados e os resultados mostraram a presença de gradientes de temperatura e umidade no interior do leito de grãos. Observou-se também que o encolhimento do leito de grãos durante o processo de secagem sofre forte influência do conteúdo de umidade inicial dos grãos de cevada. Constatou-se que a taxa de secagem diminui com a reversão do escoamento do ar de secagem, mas aumentou a homogeneidade do processo de secagem, reduzindo os gradientes de temperatura e umidade no leito. Para a simulação dos perfis de temperatura e umidade foi realizada uma análise físico-matemática do processo, fundamentada no modelo a duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) para leito fixo, com a incorporação do fenômeno de encolhimento e a consideração de temperatura de mistura (fluido-sólido). As equações do modelo foram resolvidas pelo método das linhas no software MatLab R2015a. Os dados preditos comparados com os valores experimentais mostraram uma boa concordância, com erros médios relativos variando de 1,0 a 13,6 %, mostrando que o modelo é promissor para a predição das variáveis do processo de secagem, mas deve ser aprimorado.

**Palavras-chave:** Cevada. Secagem em leito fixo. Transferência de calor e massa. Escoamento reverso do ar. Encolhimento.

## ABSTRACT

Attempting to contribute to the development of the drying process in fixed bed, this work has the objective of the experimental study on the drying of barley grains in fixed bed, without and with drying airflow reversal. The drying experiments consist of obtaining moisture content and temperature data as a function of time, evaluating the influence of the main process operating variables, such as initial moisture content of grain and drying air temperature. The bed's shrinkage of barley grain, exposed to different drying conditions, was evaluated and quantified to be incorporated in the mathematical modeling of the drying process. The drying experiments were performed in a fixed bed dryer, which operates with upward and downward airflow, allowing the drying process with airflow reversal. The experiments to determine the temperature and moisture content distribution, without and with airflow reversal, were performed and the results showed the presence of temperature and moisture content gradients inside the grain bed. It has also been observed that shrinkage of the grain bed during the drying process is strongly influenced by the initial moisture content of barley grains. It was found that the drying rate decreased with drying airflow reversal, but increased the homogeneity of the drying process, reducing the temperature and moisture content gradients in the bed. For the simulation of the temperature and moisture content profiles, a physical-mathematical analysis of the process was carried out, based on the two-phases model proposed by Massarani and Silva Telles (1992) for fixed bed, with incorporation of shrinkage phenomenon and temperature of mixture (fluid-solid). The equations of the model were solved by the method of lines in MatLab software R2015a. The predicted data compared to the experimental values showed good agreement, with relative average errors ranging from 1,0 to 13,6%, showing that the model is promising to predict the drying variables, but should be improved.

**Keywords:** Barley. Fixed bed drying. Heat and mass transfer. Airflow reversal. Shrinkage.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Grãos de cevada. ....	20
Figura 2. 2: Grão de cevada em corte transversal longitudinal: (1) caule rudimentar; (2) embrião rudimentar; (3) raiz rudimentar (radícula); (4) escutelo; (5) camada de epitélio; (6) endosperma; (7) células vazias; (8) camada de aleurona; (9) testa; (10) pericarpo; (11) casca. ....	21
Figura 3. 1: Grãos de cevada ( <i>Hordeum vulgare</i> ). ....	49
Figura 3. 2: Esquema da unidade experimental para estudo de secagem em leito fixo. ....	51
Figura 3. 3: Esquema da célula de secagem para a medida de encolhimento do leito de grãos de cevada. ....	53
Figura 3. 4: Células utilizadas para obtenção da distribuição de temperatura do leito. ....	55
Figura 3. 5: Células utilizadas para obtenção da distribuição de umidade no leito. ....	56
Figura 4. 1: Leito empacotado, antes e após a secagem. ....	69
Figura 4. 2: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X1 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio sem reversão do ar de secagem. ....	71
Figura 4. 3: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X1 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio com reversão do ar de secagem. ....	71
Figura 4. 4: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X2 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio sem reversão do ar de secagem. ....	72
Figura 4. 5: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X2 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio com reversão do ar de secagem. ....	72
Figura 4. 6: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X3 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio sem reversão do ar de secagem. ....	73
Figura 4. 7: Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X3 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaio com reversão do ar de secagem. ....	73
Figura 4. 8: Razão do encolhimento volumétrico em função da umidade adimensional média do leito. ....	75

Figura 4. 9: Razão de encolhimento volumétrico em função da razão do conteúdo de umidade, na secagem de grãos de cevada em leito espesso, sem e com reversão do escoamento do ar de secagem. ....	75
Figura 4. 10: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a $v = 4,0$ m/s e $T = 40$ °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	77
Figura 4. 11: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a $v = 4,0$ m/s e $T = 45$ °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	78
Figura 4. 12: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a $v = 4,0$ m/s e $T = 50$ °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	79
Figura 4. 13: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a $v = 4,0$ m/s e $T = 40$ °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	80
Figura 4. 14: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a $v = 4,0$ m/s e $T = 45$ °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	81
Figura 4. 15: Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a $v = 4,0$ m/s e $T = 50$ °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	82
Figura 4. 16: Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, sem reversão do escoamento de ar de secagem, para $T = 40$ °C e umidade inicial: (a)X1, (b) X2 e (c) X3. ....	84
Figura 4. 17: Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, sem reversão do escoamento de ar de secagem, para $T = 50$ °C e umidade inicial: (a)X1, (b) X2 e (c) X3. ....	84
Figura 4. 18: Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, com reversão do escoamento de ar de secagem, para $T = 40$ °C e umidade inicial: (a)X1, (b) X2 e (c) X3. ....	86
Figura 4. 19: Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, com reversão do escoamento de ar de secagem, para $T = 50$ °C e umidade inicial: (a)X1, (b) X2 e (c) X3. ....	86
Figura 4. 20: Comparando os valores dos experimentos com e sem reversão do escoamento para umidade inicial X1, nas temperaturas: (a) $T = 40$ °C e (b) $T = 50$ °C.....	87

Figura 4. 21: Conteúdo de umidade adimensional versus tempo de secagem para grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo (1, 5 e 10 cm) para os experimentos 37 e 38. ....	88
Figura 4. 22: Conteúdo de umidade adimensional médio versus tempo de secagem para grãos de cevada nos Experimentos 37 e 38. ....	89
Figura 4. 23: Conteúdo de umidade adimensional versus tempo de secagem para grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo (1, 5 e 10 cm). ....	91
Figura 4. 24: Eficiência energética e de secagem em função do tempo de secagem. ....	93
Figura 4. 25: Perfis de umidade dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 40 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	97
Figura 4. 26: Perfis de umidade dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	97
Figura 4. 27: Perfis de temperatura dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial : (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	99
Figura 4. 28: Perfis de temperatura dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1: Composição do grão de cevada seco. ....	21
Tabela 2. 2: Equações de isotermas de equilíbrio. ....	37
Tabela 2. 3: Equações de cinética de secagem. ....	42
Tabela 3. 1: Condições operacionais para determinação do encolhimento do leito. ....	54
Tabela 3. 2: Condições operacionais para determinação da distribuição de temperatura no leito. ....	55
Tabela 3. 3: Condições operacionais para determinação da distribuição de umidade no leito. ....	57
Tabela 3. 4: Coeficientes do modelo GAB para isotermas de cevada. ....	61
Tabela 3. 5: Valores do parâmetro $n$ da equação de Page. ....	62
Tabela 3. 6: Dados de calor específico e calor latente. ....	64
Tabela 3. 7: Dimensões do leito de grãos de cevada. ....	64
Tabela 4. 1: Dados do conteúdo de umidade inicial. ....	68
Tabela 4. 2: Propriedades físicas dos grãos de cevada. ....	69
Tabela 4. 3: Percentual de encolhimento do leito. ....	74
Tabela 4. 4: Encolhimento do leito, em porcentagem. ....	74
Tabela 4. 5: Taxa de secagem dos grãos de cevada para diferentes posições axiais do leito fixo após 60 minutos. ....	89
Tabela 4. 6: Taxa de secagem dos grãos de cevada para diferentes posições axiais do leito fixo, com reversão do ar de secagem a cada 10 minutos, após 60 minutos. ....	90
Tabela 4. 7: Conteúdo de umidade (% , b.u.) dos grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo após secagem por 90 minutos. ....	91
Tabela 4. 8: Eficiência de secagem estimada para conteúdo de umidade final pré-estabelecido. ....	94
Tabela 4. 9: Eficiência energética e consumo energético específico estimado em diferentes condições de operação. ....	95
Tabela 4. 10: Erro médio relativo (EMR) entre os dados experimentais e preditos para os dados de umidade dos grãos de cevada. ....	96
Tabela 4. 11: Erro médio relativo (EMR) entre os dados experimentais e preditos para a temperatura. ....	98

## NOMENCLATURA

$a'$	- parâmetro da equação de Henderson e Pabis	[ - ]
$a$	- área superficial do sólido por unidade de volume do meio poroso	
$B$	- diâmetro da parte esférica	[ mm ]
$c_p$	- calor específico do ar	[kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$c_{p,b}$	- calor específico do grão de cevada	[kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_p$	- calor específico	[cal g <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
$dp$	- diâmetro da esfera equivalente de igual volume que a partícula	[m]
$\bar{D}$	- diâmetro médio de Sauter	[ mm ]
$D_{ef}$	- difusividade efetiva	[m <sup>2</sup> /s]
$D_0$	- parâmetro da correlação de Arrhenius	[m <sup>2</sup> /s]
$DE$	- eficiência de secagem,	[-]
$EE$	- eficiência energética	[-]
$Ea$	- energia de ativação	[ Jmol <sup>-1</sup> ]
$E_{ter}$	- energia térmica	[kJ s <sup>-1</sup> ]
$G$	- vazão mássica	[Kg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$h$	- coeficiente de transferência de calor	
$K_0$	- parâmetro da correlação de Arrhenius	[ s <sup>-1</sup> ]
$K_L$	- constante cinética do modelo de Lewis	[ s <sup>-1</sup> ]
$K_P$	- constante cinética do modelo de Page	[ s <sup>-n_P</sup> ]
$K_{HP}$	- constante cinética do modelo de Henderson e Pabis	[ s <sup>-1</sup> ]
$K_O$	- constante cinética do modelo de Overhults	[ s <sup>-1</sup> ]
$L$	- espessura da célula de secagem [m]	[m]
$L'$	- comprimento	[ mm ]
$m$	- massa	[kg]
$\dot{m}$	- vazão mássica do ar	[kg s <sup>-1</sup> ]
$M$	- umidade em base seca	
$MR$	- umidade adimensional, $MR = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$	[ - ]
$n_p$	- constante cinética da equação de Page	[ - ]

$n_o$	- constante cinética da equação de Overhults	[ - ]
$N$	- número de grãos	[-]
$Q_m$	- energia para aquecimento do grão	[kJ]
$Q_w$	- energia para evaporação	[kJ]
$R$	- constante universal dos gases ideais	[Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$S$	- área superficial	[ mm <sup>2</sup> ]
$S_b$	- razão de encolhimento volumétrico do leito	[-]
SEC	- consumo energético específico	[-]
$t$	- tempo	[min]
$T$	- temperatura	[ °C ] ou [K]
$\bar{T}$	- temperatura	[K]
$T'$	- espessura	[ mm ]
$V$	- volume	[ mm <sup>3</sup> ]
$z$	- direção de escoamento do fluido	
$W'$	- largura	[ mm ]
$W$	- vazão de umidade do ar	
$X$	- umidade do grão	[ - ]
$X_{eq}$	- umidade de equilíbrio	[ - ]
$\bar{X}$	- umidade média volumétrica do sólido	[ - ]

### Subscritos

amb	- ambiente
F	- fluido
G	- gás
s	- sólido
f	- fluido
bs	- base seca
bu	- base úmida
$b$	- grãos de cevada
$f$	- final

$g$	- gás (ar)
$i$	- inicial
$t$	- tempo
$v$	- vapor

### Símbolos Gregos

$\Delta H_{v,b}$	- calor latente de vaporização	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_b$	- porosidade bulk	[ - ]
$\varepsilon_p$	- porosidade da partícula	[ - ]
$\varepsilon_t$	- porosidade total	[ - ]
$\rho_s$	- massa específica real	[ g cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_p$	- massa específica aparente	[ g cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_b$	- densidade do leito (bulk)	[ g cm <sup>-3</sup> ]
$\phi$	- esfericidade	[ - ]
$\vartheta$	- circularidade	[-]

### Abreviatura

b.s. ou d.b.	- base seca
b.u. ou w.b.	- base úmida
C.C.	- condição de contorno
C.I.	- condição inicial (t = 0)
EMR	- erro médio relativo
exp	- experimental
pred	- predito
R <sup>2</sup>	- coeficiente de determinação

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Cevada .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 Constituição Morfológica .....	19
2.1.2 Composição e propriedades .....	21
<b>2.2 Secagem de Grãos de Cevada .....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Aspectos tecnológicos .....	24
2.2.2 Secador de leito fixo .....	25
2.2.3 Secador de leito fixo com escoamento reverso do ar de secagem.....	26
<b>2.3 Fundamentos de Secagem .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 Transferência simultânea de calor e massa.....</b>	<b>29</b>
2.4.1 Caracterização do material .....	29
2.4.1.1 Umidade .....	30
2.4.1.2 Dimensões características.....	31
2.4.1.3 Massa específica e porosidade.....	33
2.4.1.4 Caracterização dos grãos de cevada .....	35
2.4.2 Umidade de equilíbrio .....	36
2.4.3 Cinética de Secagem.....	38
2.4.4 Encolhimento.....	42
<b>2.5 Modelagem Matemática da Transferência Simultânea de Calor e Massa.....</b>	<b>44</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 Reumidificação dos grãos de cevada.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2 Unidade experimental .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 Ensaio preliminares .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4 Ensaio em camada espessa .....</b>	<b>52</b>
<b>3.5 Modelagem matemática da transferência de calor e massa de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa.....</b>	<b>57</b>
<b>3.6 Estimativa dos parâmetros de transferência de calor e massa.....</b>	<b>61</b>
3.6.1 Umidade de equilíbrio .....	61
3.6.2 Taxa de secagem.....	61
3.6.3 Propriedades físicas .....	62



3.6.4 Equações e parâmetros complementares .....	63
<b>3.7 Forma de análise dos resultados .....</b>	<b>65</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1 Reumidificação dos grãos de cevada.....</b>	<b>68</b>
<b>4.2 Encolhimento .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3 Determinação da distribuição da temperatura.....</b>	<b>76</b>
4.3.1 Determinação da distribuição da temperatura sem reversão do ar de secagem.....	76
4.3.2 Determinação da distribuição da temperatura com reversão do ar de secagem .....	79
<b>4.4 Determinação da distribuição de umidade.....</b>	<b>83</b>
4.4.1 Determinação da distribuição de umidade sem reversão do ar de secagem.....	83
4.4.2 Determinação da distribuição de umidade com reversão do ar de secagem .....	85
<b>4.5 Heterogeneidade no processo de secagem em camada espessa .....</b>	<b>87</b>
4.5.1 Eficiência energética e de secagem .....	92
4.5.2 Consumo específico de energia .....	95
<b>4.6 Simulação numérica da transferência de calor e massa da secagem convencional de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa.....</b>	<b>96</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>113</b>
<b>PROGRAMA EM MATLAB .....</b>	<b>113</b>

---

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem de grãos é realizada com o intuito de reduzir a umidade do material, para que os grãos não sofram contaminações por microrganismos, preservar a aparência e qualidades nutritivas, tendo mais durabilidade após a colheita. A secagem é uma das operações unitárias mais onerosas no processamento de alimentos. Os estudos sobre os fenômenos de transporte que ocorrem durante a secagem são de grande interesse tecnológico para as indústrias químicas, alimentícias e farmacêuticas, e de interesse técnico-científico pela complexidade que o processo apresenta.

Como os grãos são biologicamente ativos, o estudo de seu processo de secagem é complexo e envolve a análise de diversos fatores que se relacionam direta ou indiretamente no processo.

A seleção de um equipamento e condições operacionais adequadas é de fundamental importância para se obter informações das interações entre os grãos e o ar de secagem, e para preservação das qualidades físicas e fisiológicas dos grãos. Dentre os vários tipos de secadores, o secador de leito fixo fornece o suporte adequado para compreender os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa que ocorrem dentro de cada material no leito e também os fenômenos de transferência entre as fases sólidas e fluidas do leito empacotado.

O secador de leito fixo, por exemplo, minimiza impactos mecânicos, proporciona controle do processo, tem a vantagem de requerer um baixo investimento inicial e a secagem e armazenamento podem ser realizadas no mesmo silo. Ao final do processo de secagem, o material tem maior valor agregado, pois se tem um produto com qualidade adequada para distribuição ou processamento. Porém, apresenta a desvantagem de apresentar altos gradientes de umidade e temperatura no interior do leito. Com o intuito de minimizar os gradientes de umidade e temperatura pode-se utilizar escoamento reverso do ar de secagem.

O secador de leito fixo com reversão do escoamento de ar opera de maneira similar ao secador de leito fixo convencional, mas em intervalos pré-determinados, inverte-se a direção do escoamento do ar, objetivando diminuir os gradientes de umidade e temperatura. O intervalo de tempo entre as reversões é um parâmetro ajustável para obter condições mais favoráveis para o processo de secagem. Esta configuração para os secadores de leito fixo existe, mas deve ser aprimorada. Uma maneira de verificar a eficiência e otimização é o uso de modelos matemáticos que sejam capazes de reproduzirem os processos de secagem.

A modelagem e simulação dos perfis de umidade e temperatura no secador permite a análise das condições operacionais sobre o processo, além de uma maior compreensão da transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido e contribuem para o projeto e controle de novos secadores e otimização de secadores já existentes. Para isso, os dados experimentais são de fundamental importância, pois proporcionam a compreensão física do meio poroso e permitem validar e creditar as simulações.

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi realizar o estudo do processo de secagem de grãos de cevada em secador de leito fixo, sem e com reversões do ar de secagem, via experimentação, modelagem matemática e simulação.

Para isso, é necessário o conhecimento do comportamento do material no processo de secagem, obtido com a caracterização do material, isotermas de equilíbrio e cinética de secagem, conhecimento operacional do equipamento e realização de ensaios em camada espessa, para determinação da distribuição de umidade e temperatura no leito, sem e com reversões do escoamento do ar de secagem.

Assim, para a análise e compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa, são realizados estudos da modelagem em camada espessa, que são mais realísticos, utilizando o modelo a duas fases, que é baseado nas leis de transferência de calor e massa, o que permite a simulação numérica para obtenção dos perfis de umidade e temperatura e comparação com os dados experimentais.

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cevada

A cevada (*Hordeum vulgare* sp *vulgare*) é um cereal de inverno, ocupa a quinta posição em importância econômica no mundo. O grão após maltagem é utilizado na produção de bebidas, como cerveja e destilados, os grãos torrados e moídos são usados na fabricação de uma bebida sem cafeína de aspecto semelhante ao do café e a farinha de cevada é utilizada na panificação, na produção de medicamentos e nas fórmulas de produtos dietéticos. Além da alimentação humana, é também empregada na alimentação animal, como forragem verde e na fabricação de ração (BRASIL, 2013).

No Brasil, a produção de cevada é para o consumo na indústria cervejeira, por ser uma cultura de inverno, o cultivo sempre esteve restrito à região temperada nos planaltos do Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e no Paraná, onde o clima favorece a produção de cevada com qualidade para fazer cerveja. O cultivo da cevada para a produção do malte cervejeiro exige cuidados especiais na obtenção do padrão de qualidade cervejeira (BRASIL, 2005).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015b), a estimativa de área cultivada com cevada no Brasil em 2015 foi menor do que na safra de 2014, mas como a cevada é uma cultura que recebe incentivos das indústrias cervejeiras interessadas em adquirir o produto, ocorreu um incremento na produtividade e a produção total foi de 9,6% maior do que a safra de 2014, alcançando 334,7 mil toneladas. Para safra de 2017 a estimativa de variação em relação a safra de 2016 foi de 0,4 %, totalizando 373,3 mil toneladas (CONAB, 2017b).

#### 2.1.1 Constituição Morfológica

O grão de cevada apresenta uma forma alongada, como mostra a Figura 2.1, e é constituído de três partes principais: casca, endosperma e embrião. A maior parte do grão é ocupada pelo endosperma, onde estão as substâncias de reserva da planta, fundamentais para a posterior formação do extrato solúvel na elaboração do mosto. Uma pequena parte é ocupado pelo embrião, onde residem as funções vitais e que, em condições adequadas, germina e forma folículo e raiz, iniciando o processo de transformação no endosperma e ativando

enzimas. A casca, uma camada exterior resistente, que protege o grão contra influências atmosféricas danosas e possibilita a formação de uma camada filtrante durante a clarificação do mosto, é seguida de três camadas subsequentes, o pericarpo, a testa e a camada de aleurona (BRIGGS, 2002; OETTERER e ALCARDE, 2006; PINTO, 2013).

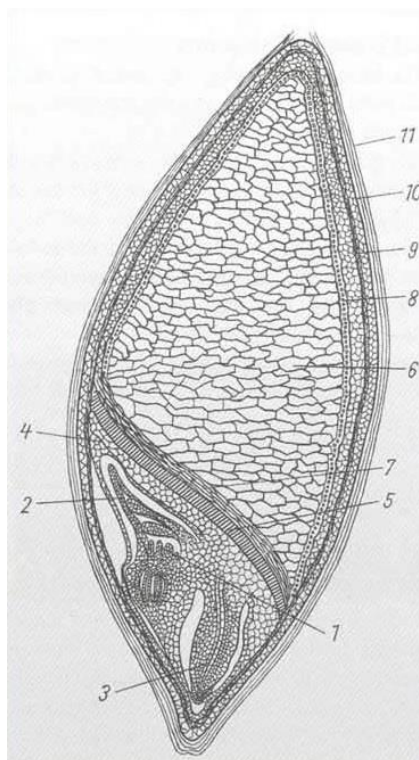
**Figura 2. 1:** Grãos de cevada.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 2.2 temos um corte transversal longitudinal do grão de cevada e podemos observar as três partes principais: a região germinativa, o endosperma e as coberturas do grão. A região germinativa contém o caule (1) com os nós de crescimento para o embrião (2) e a radícula (3), é separada do endosperma por uma fina camada de tecido, o escutelo (4) e o epitélio (5), uma fina camada de células tipo paliçada com paredes muito finas (KUNZE, 2004). O endosperma (6) consta de células estáveis que contêm os grânulos de amido. Nele reside a fonte de açúcares uma vez que este amido será degradado em estruturas mais simples (PINTO, 2013). A camada de aleurona (8) reveste o endosperma, consistindo em células ricas em proteínas. Esta camada é o ponto mais importante para a produção de enzimas durante a maltagem (BRIGGS, 2002; KUNZE, 2004; PINTO, 2013). Os revestimentos dos grãos consistem em sete camadas diferentes que, no entanto, podem ser divididas essencialmente em três: a cobertura mais íntima que envolve a camada de aleurona é a testa (9), que envolve todo o grão e segue apenas água pura, e não os sais dissolvidos, devido sua semipermeabilidade, o revestimento para o exterior é o pericarpo (10) que envolve a testa e, por sua vez, é cercada pela epiderme que é protegida no exterior pela casca (11) (KUNZE, 2004).

**Figura 2. 2:** Grão de cevada em corte transversal longitudinal: (1) caule rudimentar; (2) embrião rudimentar; (3) raiz rudimentar (radícula); (4) escutelo; (5) camada de epitélio; (6) endosperma; (7) células vazias; (8) camada de aleurona; (9) testa; (10) pericarpo; (11) casca.



Fonte: Adaptado de Kunze (2004).

### 2.1.2 Composição e propriedades

O grão é composto por carboidratos e proteínas e em menor quantidade por lipídeos, minerais e vitaminas. A Tabela 2.1 apresenta a composição média do grão de cevada seco.

**Tabela 2. 1:** Composição do grão de cevada seco.

<b>Composto</b>	<b>%</b>
Carboidratos totais	70,0 – 85,0
Proteína	10,5 – 11,5
Material inorgânico	2,0 – 4,0
Lipídeos	1,5 – 2,0
Outras substâncias	1,0 – 2,0

Fonte: Adaptado de Kunze (2004).

Os carboidratos totais são encontrados sob a forma de amido, celulose, hemicelulose e açúcares. O amido corresponde de 50% a 75% do grão e está presente

exclusivamente no endosperma (NOVACK, 2010). A celulose é encontrada principalmente na casca e não sofre nenhuma alteração no processo de malteação. A hemicelulose tem a função de dar sustentação e resistência às paredes celulares. Existem cerca de 1,8 a 2,0% de açúcares, carboidratos de baixo peso molecular como sacarose, maltose, glicose e frutose, que são normalmente usados no início do crescimento da planta (KUNZE, 2004).

O consumo de grãos de cevada fornece baixa gordura, carboidratos complexos (principalmente amido) para energia, proteínas relativamente bem balanceadas para atender os requisitos de aminoácidos, vitaminas, especialmente vitamina E outros antioxidantes, (principalmente polifenóis), fibras solúveis e insolúveis (BAIK e ULLRICH, 2008). Porém, os portadores da doença celíaca, que é uma intolerância permanente ao glúten, devem excluir de sua dieta a cevada e seus derivados (SDEPANIAN et al., 2001). Glúten é o nome dado à proteína presente no trigo, no centeio, na aveia, na cevada, a parte tóxica do glúten para o celíaco é chamada de prolamina, na cevada recebe o nome de hordeína, que corresponde a 50% da proteína do glúten que não se dissolve na água e que é solúvel no etanol (FENACELBRA, 2010).

A utilização direta do grão de cevada na fabricação de cerveja é inadequada, pois faltam enzimas, falta friabilidade para fácil moagem, produz um extrato altamente viscoso que é deficiente em aminoácidos e não possui cor e sabor necessários para fabricar a cerveja. Por isso é necessário realizar a maltagem dos grãos de cevada (LEWIS e YOUNG, 2001). A maltagem muda todas essas propriedades de maneira crucial, que abrange a soma das mudanças feitas nas propriedades físicas, químicas e biológicas da cevada, causadas pelo processo de germinação controlada e a posterior secagem do grão. Durante o processo de molha dos grãos de cevada, as enzimas proteolíticas e amilolíticas são liberadas e degradam amido, proteínas de armazenamento e paredes celulares no endosperma, podendo assim, utilizar estes polímeros como fermento na fabricação de cerveja (GORZOLKA et al., 2012).

Por apresentar um elevado conteúdo de amido, uma taxa elevada de enzimas e um conteúdo adequado de proteínas, a cevada é considerada o cereal mais adequado para a produção de malte e cervejas, além dos grãos terem alta resistência às doenças e sua casca funcionar como proteção a danos mecânicos (PINTO, 2013). As proteínas exercem papel importante na qualidade do malte de cevada, pois exercem influência positiva sobre o gosto da cerveja, ao manter a estabilidade da espuma e a nutrição das leveduras. A quantidade de proteína na cevada está relacionada com condições do solo, climáticas, o tipo de cultivar (PORTO, 2011; SANTOS, 1999).

---

Já os lipídeos encontram-se na forma de ácidos graxos, tais como ácido linoleico, ácido palmítico, ácido oleico e ácido esteárico, e podem influenciar nas características organolépticas da cerveja, pois podem prejudicar a ação de leveduras no processo de fermentação da cerveja e podem afetar a capacidade de formação de um colarinho de espuma estável na cerveja (BRAVI et al., 2012; PORTO, 2011).

Enzimas intactas, disponibilidade de amido e viabilidade dos grãos são os principais critérios para a qualidade do malte em relação à fabricação de cervejas, mas há a falsa ideia de que os cultivares de cevada para malte possuem melhor valor nutricional do que os cultivares para alimentação, e que os cultivares para alimentação são assim designados por terem características agronômicas aceitáveis, mas características de maltagem e fabricação de cerveja inaceitáveis (GORZOLKA et al., 2012; MOLINA-CANO et al., 1997). Quando na verdade o que ocorre é, devido à composição e as propriedades da cevada variarem de acordo com o cultivar, fatores climáticos e ambientais, a sua utilização é complicada pelo fato de que a mesma matéria-prima pode ser utilizada para desenvolver diferentes produtos. Portanto, a definição de boa qualidade para este cereal muda dependendo se será usado para malte de cevada ou outros produtos processados (JADHAV et al., 1998).

Segundo a Portaria nº 691, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 1996), de 22 de Novembro de 1996, quanto ao tipo, a cevada para fins cervejeiros é classificada como tipo único, e deve apresentar como fator de qualidade para padrões de maltagem: poder germinativo de no mínimo 95 %; no máximo 12 % de proteínas e máximo de 5 % de grãos avariados. Caso a cevada esteja abaixo do padrão para maltagem poderá ser comercializada para outras destinações, como indústria de alimentos, de ração ou forragem animal. O conteúdo de umidade e o percentual de matéria estranha e impurezas máximos admitidos para o produto segundo a norma de identidade e qualidade (BRASIL, 1996) é de conteúdo de umidade de 13 % (b.u.) e 3% de matéria estranha e impurezas.

A umidade da cevada sofre modificações devido a fatores climáticos, temporais e genéticos, podendo variar de 12 % a 25 % pós-colheita (KUNZE, 2004; TUNES et al., 2010). O armazenamento dos grãos é considerado adequado quando a umidade é inferior a 13 % (base úmida). Para períodos mais longos de armazenamento, uma umidade de 10% é o mais indicado (BRIGGS et al., 2004). Segundo Kunze (2004), quando a cevada é armazenada úmida, ela perde sua capacidade germinativa e produz um malte de má qualidade, assim, cevada contendo mais do que 13 % de umidade deve passar pelo processo de secagem



---

antes do armazenamento. A secagem não pode ser realizada em temperaturas altas, pois é letal para o embrião, a temperatura do grão de cevada não deve exceder 52 °C (SOUSA, 2004).

## **2.2 Secagem de Grãos de Cevada**

### **2.2.1 Aspectos tecnológicos**

Nos últimos anos a produção de grãos tem crescido a taxas anuais acentuadas, segundo a CONAB (2017a), a produção de grãos para a safra 2016/2017 está estimada em 223 milhões de toneladas, que é 19,5% superior à obtida na safra 2015/2016, quando atingiu 186 milhões de toneladas. A produção de grãos tem crescido, principalmente, em razão das excelentes produtividades obtidas. Porém, o processamento e armazenamento destes grãos possui ainda uma infraestrutura muito precária, a capacidade estática de armazenagem é de apenas 150,35 milhões de toneladas (CONAB, 2015a).

Após a colheita, os grãos trazem consigo muitas impurezas (palha, restos de plantas, terra, pedras, restos de insetos, etc.), que são removidos no processo de beneficiamento, para que o produto atinja padrões de pureza que possibilitem sua utilização. Além dos materiais estranhos, há um fator também indesejável, o excesso de umidade, que na maioria das vezes não se apresenta de forma visível e pode causar muitos problemas (BRAGANTINI, 2006).

O armazenamento adequado é fundamental para se evitar perdas, preservar a qualidade dos alimentos e suprir demandas na entressafra. Os grãos devem ser secos antes de serem armazenados ou semeados, baixo conteúdo de umidade é um pré-requisito para o armazenamento em longo prazo e é o fator mais importante que afeta a longevidade. Os grãos perdem viabilidade e vigor durante o processamento e armazenamento, principalmente devido ao alto conteúdo de umidade (BARROZO et al., 2014). Para um armazenamento seguro são importantes umidades inferiores a 13% (base úmida), pois inibe o crescimento da maioria dos microrganismos (bactérias, leveduras, fungos) e ácaros, e umidade inferior a 10% (base úmida) limita o desenvolvimento da maioria dos insetos e pragas de grãos armazenados (FARONI, 1998).

### 2.2.2 Secador de leito fixo

Devido à necessidade de se secar os grãos após a colheita e armazená-los, sem depender das desvantajosas condições impostas por intermediários, o secador de leito fixo surgiu em regiões agrícolas de produtores familiares (JASPER et al.,2006).

A implantação do secador de leito fixo é de baixo custo e de fácil construção, e sua operação também é simples. São constituídos, basicamente, por uma coluna cilíndrica, com a base de material perfurado, para que o ar possa passar. É acoplado à base perfurada um ventilador, responsável pela distribuição uniforme do gás na coluna. Os grãos são depositados na coluna, formando um leito com empacotamento aleatório. A variação de pressão ao longo do secador depende da altura do leito, da vazão de gás e da geometria da coluna (FUMAGALLI, 2007).

Com base em Fumagalli (2007), pode-se supor que um secador de leito fixo opera de acordo com as seguintes condições:

- fase gasosa: ar seco aquecido e o vapor de água contido nele;
- fase sólida: partículas úmidas depositadas no secador;
- fase líquida: água condensada da fase gasosa, quando existir;
- após carregamento do leito com as partículas, a secagem se inicia com alimentação contínua da fase gasosa na base da coluna;
- a vazão do ar de alimentação é inferior à vazão necessária para fluidizar o leito de partículas;
- o secador opera isolado termicamente e
- o ar de secagem, fase gasosa, passa por um sistema de aquecimento e, se necessário, de desumidificação.

Os estudos de secagem em leito fixo e camada fina são indispensáveis nos experimentos de cinética de secagem de materiais sobre os quais se tem pouca informação, auxiliando no entendimento dos fenômenos de transferência de calor e massa. De acordo com Brooker et al. (1992), a escolha de um modelo de secagem em camada fina afeta fortemente a validade dos resultados da simulação em camada espessa.

Segundo Prado e Sartori (2011), a secagem em leito fixo e camada espessa é largamente utilizada, já que a operação é simples, não requer nenhuma despesa de energia adicional para mover o sólido no leito e minimiza os danos mecânicos ao material. Este tipo de secador fornece uma melhor base para compreensão dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa que ocorrem dentro de cada material no leito, e o fenômeno de transferência entre fases sólidas e fluidas do leito empacotado. Sendo assim, a modelagem

---

desses sistemas torna-se imprescindível para projetos e construção de novos secadores de leito fixo, já que permitem dados mais próximos dos processos em grande escala e também, para a otimização dos já existentes.

Porém, ao realizar o processo de secagem em camada espessa nos secadores de leito fixo há uma desvantagem, ocorre a formação de gradientes de umidade e temperatura. Com o intuito de diminuir estes gradientes de umidade e temperatura que se formam dentro do leito espesso são realizados estudos de secagem em leito fixo com reversão do escoamento de ar de secagem.

### 2.2.3 Secador de leito fixo com escoamento reverso do ar de secagem

Para aperfeiçoar os processos de secagem em camada espessa nos secadores de leito fixos, estudos de secagem com escoamento reverso tem sido realizados para melhor compreender este processo e prever as distribuições de umidade e temperatura no interior do leito.

Paulsen e Thompson (1973) estudaram a inversão do escoamento de ar em um secador de fluxo cruzados para milho e observaram uma redução de 60% a 75% no gradiente de umidade final, em comparação com a secagem convencional.

Sabbah et al. (1979) analisaram o efeito de diferentes intervalos de tempo para a inversão do escoamento de ar sobre a homogeneidade da umidade final de sementes de soja, observaram que a inversão periódica do escoamento de ar proporcionou uma distribuição mais uniforme da umidade final e que o intervalo de tempo para a inversão que proporcionava uma secagem mais uniforme e um produto de melhor qualidade dependia das condições do ar de secagem, da umidade inicial e da profundidade do leito.

Berbert et al. (1994) realizaram a secagem de grãos de café em leito fixo com e sem reversão do escoamento do ar de secagem, comparando os métodos. Observaram que a reversão do escoamento de ar proporcionou a diminuição do gradiente de umidade. Posteriormente, Berbert et al. (1995) desenvolveram um modelo matemático para simulação da secagem com reversões do escoamento de ar, obtendo resultados satisfatórios e concluindo que para cada temperatura do ar de secagem há um intervalo de tempo de reversão ótimo.

Para investigar o efeito da reversão do escoamento do ar de secagem sobre perfis de umidade e temperatura, Ratti e Mujumdar (1995), utilizando dados experimentais de secagem em leito fixo de batata, maçã e cenoura, realizaram um estudo com simulação

---

numérica e concluíram que as reversões do escoamento de ar causaram pouco efeito no tempo total de secagem, mas reduziram os gradientes de umidade e temperatura e um parâmetro ajustável é o tempo entre cada reversão.

Herman-Lara et al. (2005) realizaram a simulação matemática da secagem de mandioca em leito fixo, com modelos de fluxo pistonado e mistura completa do ar, em que concluíram que, se o processo for controlado por difusão, não há diferença entre os modelos, mas se o processo não for controlado por difusão e apresentar um comportamento de fluxo pistonado, haverá teores heterogêneos de umidade no leito e para minimizar este gradiente de umidade sugeriram a reversão do escoamento de ar de secagem.

Ruiz-López et al. (2008) compararam a secagem com e sem reversões do ar de secagem e perceberem que a reversão do ar de secagem diminui os gradientes de umidade e temperatura do leito formado por fatias de mandioca e ao analisarem a modelagem da secagem em leito fixo com escoamento de ar reverso, observaram diminuição dos gradientes de umidade e temperatura do leito e concluíram que os efeitos das reversões dependem: da espessura da partícula, da altura do leito, da velocidade do ar de secagem e a frequência das inversões. Assim, com a otimização destas variáveis se obtém um tempo mínimo de secagem com máxima eficiência.

Herman-Lara et al (2010) estudaram a cinética de secagem experimental de leitões de cenoura para determinar estatisticamente o efeito da aplicação de reversões periódicas no escoamento do ar; concluindo que as reversões periódicas tem efeito significativo sobre a taxa de secagem, com redução de até 18% do tempo de secagem.

Assim, observa-se que a secagem em leito fixo com reversões do escoamento de ar proporciona a diminuição do gradiente de umidade e temperatura. Além disso, o intervalo de tempo entre as reversões é um parâmetro ajustável para otimizar o processo, o qual depende das características do leito (espessura e das características do produto, como encolhimento, umidade inicial) e de condições operacionais (temperatura, velocidade do ar de secagem, umidade relativa).

### **2.3 Fundamentos de Secagem**

A secagem é uma operação complexa envolvendo transferência simultânea de calor e massa, juntamente com as variações de processos do material, tais como transformações físicas ou químicas, que, por sua vez, podem causar mudanças na qualidade

---

do material, assim como nos mecanismos de transferência de calor e massa (Mujumdar, 2006).

No processo de secagem, o fornecimento de calor pode ocorrer por três diferentes mecanismos: condução, convecção e radiação. A maior parte dos processos industriais que envolvem a transferência de calor emprega a combinação de tais mecanismos. Entretanto, é comum um mecanismo ser mais importante que os demais em algumas aplicações (FELLOWS, 2006).

Em geral, a secagem é feita por técnicas térmicas e, portanto, envolve a aplicação de calor, geralmente por convecção a partir de uma corrente de ar (McMINN e MAGEE, 1999). Existem três fatores inter-relacionados que controlam a capacidade do ar de remover umidade de um material quando a secagem utiliza ar quente, que são:

- a quantidade de vapor de água presente no ar (umidade absoluta);
- a temperatura do ar;
- a quantidade de ar que passa pelo material (velocidade do ar de secagem);

A quantidade de vapor de água no ar de secagem é expressa como umidade absoluta ou umidade relativa (UR), em porcentagem. O material absorve calor do ar quente, o que provê o calor latente necessário para evaporar a água da superfície. A temperatura do ar, medida por um termômetro, é chamada de temperatura de bulbo seco. Se o bulbo do termômetro for coberto por um tecido molhado, é retirado calor por evaporação da água no tecido e a temperatura cai. Essa temperatura mais baixa é chamada de temperatura de bulbo úmido. A diferença entre essas duas temperaturas é utilizada para encontrar a umidade relativa do ar, normalmente recorre-se às cartas psicométricas. Um aumento na temperatura do ar ou uma redução na UR faz com que a água evapore mais rapidamente de uma superfície molhada, portanto, provoca uma queda maior na temperatura. O ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar se torna saturado de água (UR 100%) e qualquer resfriamento além desse pronto resulta na condensação da água do ar (FELLOWS, 2006; MUJUMDAR, 2006).

Outro fator que controla a taxa de secagem, além da umidade e temperatura do ar, é a velocidade do ar de secagem. Quando o ar quente é soprado sobre um material úmido, o vapor de água se difunde através da camada limite de ar ao redor do material e é levado pelo ar em movimento. Quanto maior a velocidade do ar, menor a espessura da camada limite e maior a taxa de secagem (MUJUMDAR, 2006). Assim, resumidamente, para secar um material úmido com sucesso, o ar de secagem deve ter temperatura de bulbo seco moderadamente alta, baixa umidade relativa e alta velocidade do ar (FELLOWS, 2006).

---

O movimento da umidade do interior do material até à superfície é analisado pelos mecanismos de transferência de massa. Durante o processo de secagem, para que haja a evaporação da umidade da superfície do material ao ambiente, a umidade deve ser transportada do interior do material até a superfície. A migração de umidade de dentro do sólido pode ocorrer devido aos mecanismos de transporte de vapor de água (difusão devido ao gradiente de concentração, difusão térmica, difusão de Knudsen e escoamento viscoso) e aos mecanismos de transporte de água líquida (difusão devido ao gradiente de concentração, escoamento capilar, difusão superficial, movimento por gravidade) (BRUIN e LUYBEN, 1980; STRUMILLO e KUDRA, 1986).

A troca de energia e massa entre o fluido e o sólido pode ser influenciada pela configuração do material no secador, pelas condições operacionais do secador como temperatura, velocidade e umidade do fluido, e também pelas propriedades do sólido, como umidade, temperatura, tamanho, forma, massa específica e porosidade (McMINN e MAGEE, 1999). Assim, há vários fatores que controlam as taxas de transferência de calor e massa, estes fatores podem ser agrupados em: aqueles relacionados às condições de processamento, os relacionados à natureza do material e os relacionados à configuração do secador.

## **2.4 Transferência simultânea de calor e massa**

Para a simulação da transferência de calor e massa é necessário o conhecimento do comportamento do material no processo de secagem, obtido com a caracterização do material, isotermas de equilíbrio e cinética de secagem, conhecimento operacional do equipamento e realização de ensaios em camada espessa, para determinação da distribuição de umidade e temperatura no leito.

### **2.4.1 Caracterização do material**

A caracterização dos grãos é importante para obtenção das propriedades físicas, que são fundamentais para a solução das equações dos modelos de secagem. Com os dados das propriedades do material, é possível realizar a descrição do processo de secagem, o dimensionamento de secadores, de sistemas de armazenamento e a avaliação de processos envolvendo transferência de calor e massa. Também é desejável conhecer como estas

propriedades físicas variam com o conteúdo de umidade, o que permite prever sua variação ao longo do processo de secagem.

#### 2.4.1.1 Umidade

O grão pode apresentar diferentes proporções entre a quantidade de água e matéria seca contida em seu interior. A umidade quando expressa em base úmida (b.u.) é a relação da massa de água contida no material em relação à massa total do material úmido, Equação 1, e quando expressa em base seca (b.s.), é a relação da massa de água presente no material em relação à massa de material seco, Equação 2 (FELLOWS, 2006).

$$X_{bu} = \frac{m_a}{m_u} \cdot 100 = \frac{m_a}{m_a + m_{ss}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_{ss}} \quad (2)$$

Em que,  $m_a$  é a massa de água,  $m_{ss}$  é a massa de sólido seco,  $m_u$  é a massa úmida (massa total do sistema),  $X_{bu}$  é a umidade em base úmida e  $X_{bs}$  é a umidade em base seca. Geralmente, a umidade em base úmida é dada em porcentagem e a umidade em base seca é dada em decimal.

A umidade dos grãos pode ser determinada por meio de métodos diretos ou métodos indiretos. Nos métodos diretos, a água contida no grão é retirada através da vaporização por aquecimento da amostra, em condições controladas. Entre estes métodos, tem-se: o método de estufa, de destilação e químicos. O método de estufa é adequado ao uso em rotina, pois é um método padronizado. Os métodos indiretos não avaliam diretamente o conteúdo de água, a umidade é estimada por meio de variações de diversos outros parâmetros que influenciam e/ou são influenciados significativamente pelo conteúdo de umidade do material, como por exemplo, a condutividade elétrica e as propriedades dielétricas. Não são métodos precisos, devem ser padronizados pelos métodos diretos, porém sua utilização é importante em situações que exigem resultados rápidos (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

O método de estufa é o mais utilizado e está baseado na remoção da água por aquecimento. A temperatura de secagem deve ser um pouco acima de 100°C, para evaporar a

água à pressão atmosférica na estufa simples (CECCHI, 2003). Vários pesquisadores utilizaram o método de estufa para determinação da umidade de grãos e sementes, entre eles, Barrozo (1995), Arnosti Jr. (1997), Prado (2000), Fumagalli (2007), Corrêa et al. (2013) e Albini (2015). É padronizado pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2002).

#### 2.4.1.2 Dimensões características

Alguns grãos apresentam forma irregular, o que dificulta a determinação de suas dimensões. Na literatura, há várias maneiras e critérios para medir as dimensões das partículas, cada uma com suas vantagens e desvantagens.

O peneiramento das partículas por agitação mecânica é uma metodologia que permite realizar uma análise granulométrica das partículas, classificar as partículas em relação ao diâmetro e com a massa de partículas retida em cada peneira é possível calcular o diâmetro médio de Sauter, Equação 3. Esta técnica foi utilizada por Fumagalli (2007), Pereira (2010), Felizardo (2014) e Albini (2015) com sementes de gramíneas, de painço, de embaúba e grãos de cevada, respectivamente.

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (3)$$

Em que,  $x_i$  e  $D_i$  são a fração mássica de grãos retidas na peneira  $i$  e a abertura da peneira  $i$ , respectivamente.

O diâmetro médio da partícula pode ser determinado por várias metodologias, não há uma vantagem definida para utilização de qualquer das dimensões analisadas, seja diâmetro de Feret, raio de Martin e diâmetro da área projetada (ALLEN,1990). Segundo Arnosti Jr. (1997), com a técnica de picnometria, que determina o volume do material e, a partir do volume de uma forma geométrica semelhante, é possível determinar o diâmetro médio desse material. Este método foi utilizado por Sartori (1986) para determinação do diâmetro do grão de soja, milho, arroz, esferas de vidro e areia.

Outra técnica que pode ser utilizada é a análise de imagens, com auxílio de *softwares*, por exemplo o *Image Pro Plus 6*, que fornece o diâmetro médio de Feret, o raio



médio de Martin, comprimento, largura e outras medidas das partículas, que são importantes para o caso de materiais cuja forma difere bastante de uma esfera. É uma técnica muito utilizada, pois os *softwares* de análise de imagens se utilizam de fotografias digitais para analisar tamanho e forma das partículas de maneira rápida e fácil (SOUZA, 2007). Vários trabalhos utilizaram *softwares* para determinação das dimensões características das partículas, entre eles Arnosti Jr. (1997), Prado (2004), Fumagalli (2007), Pereira (2010), Felizardo (2014) e Albini (2015).

Mohsenin (1970) apresenta algumas equações que podem ser utilizadas para o cálculo do diâmetro da parte esférica, volume, área superficial e esfericidade, a partir dos dados do comprimento ( $L'$ ), largura ( $W'$ ) e espessura ( $T'$ ) das partículas.

- diâmetro da parte esférica:

$$B = \sqrt{W'.T'} \quad (4)$$

- volume:

$$V = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot L'^2}{6(2L' - B)} \quad (5)$$

- área superficial:

$$S = \frac{\pi \cdot B \cdot L'^2}{2L' - B} \quad (6)$$

- esfericidade:

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{W'.T'.L'}}{L'} \quad (7)$$

A esfericidade também pode ser calculada pela Equação 8, que utiliza dados de picnometria. Sartori (1986) utilizou-se desta técnica para determinar a esfericidade da soja, milho, arroz, vidro e areia.

$$\phi = \frac{D_p}{D_l} \quad (8)$$

onde  $D_p$  é o diâmetro da esfera de igual volume que a partícula e  $D_l$  é o diâmetro linear máximo da partícula.

O *software Image Pro Plus 6* após a análise das imagens fornece dados de circularidade ( $\vartheta$ ), assim, é possível determinar indiretamente a esfericidade, conforme a Equação:

$$\phi = \frac{1}{\vartheta} = \frac{A_p 4 \pi}{P^2} \quad (9)$$

Appel (1996), Costa (1996), Fumagalli (2007) e Albini (2015) determinaram a esfericidade de grãos de soja, areia, gramínea e cevada, respectivamente, com os dados da  $A_p$  (área projetada) e do  $P$  (perímetro) fornecidos pelo *software*, utilizando a Equação 9. Os resultados obtidos por Appel (1996) foram muito próximos aos encontrados por Sartori (1986), mesmo utilizando técnicas diferentes.

#### 2.4.1.3 Massa específica e porosidade

A massa específica aparente é uma propriedade utilizada para determinar a capacidade de armazenamento e transporte, enquanto a massa específica real é útil para concepção do equipamento de separação apropriado, e com a porosidade total do leito dos grãos se pode determinar a resistência ao fluxo de ar durante a operação de arejamento e secagem (BROOKER et al., 1992; TAVAKOLI et al., 2009). Encontra-se na literatura as seguintes definições para massa específica.

- *massa específica real ou absoluta*: dada pela Equação 10, definida pela razão entre a massa do material e o seu volume sólido. O volume de sólidos ( $V_s$ ) é considerado o volume do material sólido incluindo cadeias de polímeros e líquidos como água, ácidos, etc., excluindo o volume de todos os poros da partícula (KARATHANOS et al., 1996).

---

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (10)$$

A técnica de picnometria a hélio é a mais indicada na determinação da massa específica real de grãos, pois o gás hélio é capaz de penetrar nos poros abertos que são maiores que o diâmetro de sua molécula e o que não é penetrado pelo gás é considerado como volume sólido (KARATHANOS et al., 1996).

- *massa específica aparente ou da partícula*: dada pela Equação 11, é a razão entre a massa da partícula e o volume total ocupado pela partícula, incluindo os poros abertos e fechados.

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (11)$$

Para determinar a massa específica aparente de grãos utiliza-se a técnica de picnometria líquida, em que o material sólido é imerso em um líquido inerte de densidade conhecida. Comumente, água, hexano ou tolueno são utilizados como líquido de referência, mas o uso de água como líquido de referência em materiais altamente higroscópicos pode resultar em erros (MOHSENIN, 1970). A escolha do líquido de referência deve levar em consideração a interação existente entre o sólido e o líquido, evitando que este seja facilmente absorvido, o que influenciaria a determinação da massa específica aparente do material. Devido à baixa tendência de penetrar no interior de sólidos, os solventes orgânicos têm sido utilizados como líquidos de referência (LIMA, 2013). Fumagalli (2007), Pereira (2010) e Albini (2015) determinaram a massa específica aparente de sementes de gramíneas, painço e cevada, respectivamente, por picnometria líquida com hexano. Vieira (2012) utilizou isoprpanol nos grãos de linhaça e Corrêa et al. (2013) utilizaram tolueno para determinar a massa específica de grãos de cevada.

- *massa específica do leito ou densidade bulk*: dada pela Equação 12, é a razão entre a massa de partículas e o volume do leito empacotado. O volume *bulk* ( $V_b$ ) depende do volume de sólido úmido, e depende também do volume de poros dentro das partículas e dos espaços vazios entre as partículas no leito empacotado (PRADO, 2004).

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (12)$$

Com as definições de massa específica, podemos distinguir três tipos de porosidade: porosidade da partícula, porosidade *bulk* e porosidade total do leito.

- *porosidade da partícula*: dada pela Equação 13, é a relação entre o volume de poros abertos e o volume total de partículas, ou seja, a relação entre a massa específica aparente e real da partícula (MADAMBA et al., 1994).

$$\varepsilon_p = 1 - \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right) \quad (13)$$

- *porosidade bulk*: dada pela Equação 14, é a relação entre o volume de vazios de ar interpartículas e o volume total do leito, ou seja, a relação entre a massa específica *bulk* e aparente.

$$\varepsilon_b = 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_p} \right) \quad (14)$$

- *porosidade total do leito*: dada pela Equação 15, é a relação entre o volume de poros abertos intrapartículas e de vazios de ar interpartículas e o volume total do leito, ou seja, relação entre massa específica *bulk* e real.

$$\varepsilon_t = 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) \quad (15)$$

#### 2.4.1.4 Caracterização dos grãos de cevada

Tavakoli et al. (2009), Sologubik et al. (2013), Corrêa et al. (2013), Polachini et al. (2015), Albini et al.(2015) realizaram estudos para avaliar o efeito do conteúdo de umidade em algumas das propriedades físicas do grão de cevada. Os parâmetros avaliados foram suas dimensões, forma, massa específica, porosidade, ângulo de repouso e concluíram que as propriedades físicas apresentaram uma dependência com o conteúdo de umidade. As

---

medidas das dimensões (comprimento, largura, espessura, diâmetro), a massa de mil grãos, esfericidade, porosidade e área superficial aumentaram com o aumento da umidade inicial do grão. A massa específica aparente, massa específica real e a porosidade diminuíram com o aumento do conteúdo de umidade, pois há um maior aumento do volume dos grãos em comparação com o aumento de massa.

Carvalho et al.(2015) realizaram a caracterização física do leito de grãos de cevada, observando que o maior conteúdo de umidade inicial promove a expansão do leito, aumentando o volume das partículas e, por consequência, do leito, aumento que foi mais intenso que o ganho de peso da partícula, além de promover um menor empacotamento, resultando em porosidade maior e reduzindo as massas específicas real e *bulk*, como verificado nos outros trabalhos mencionados anteriormente.

#### 2.4.2 Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura e pressão, pode ser definida como a umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor de água no material e na vizinhança. A umidade de equilíbrio determina a mínima umidade que o material pode atingir. O material não pode perder uma quantidade maior de água que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem. Assim, a umidade de equilíbrio caracteriza a umidade mínima que o material pode atingir nas condições de processo, sendo de fundamental importância no processo de secagem.

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 as 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 se observa a aumento da massa do material devido à retenção de umidade. Analogamente, as isotermas de dessorção são assim classificadas quando material úmido, sob as mesmas condições de umidade relativa, perde massa ao longo do processo. Frequentemente há diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção para um mesmo produto e em condições idênticas de determinação, fenômeno denominado histerese (BHANDARI e ADHIKARI, 2008).

Há na literatura um grande número de equações teóricas, semiempíricas e empíricas para estimar a umidade de equilíbrio. Uma determinada equação de isoterma pode ser considerada mais adequada do que outra, principalmente quando descreve com maior

precisão o fenômeno de adsorção ou dessorção para uma ampla faixa de umidade de equilíbrio. Outra característica é a possibilidade destas equações fornecerem informações importantes acerca do fenômeno de sorção, tais como a água adsorvida na monocamada ou o calor de sorção para a primeira e para as camadas subsequentes (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982). Como os modelos teóricos não estimam com precisão a umidade de equilíbrio para grãos, vários modelos empíricos e semiempíricos surgiram para aumentar a precisão na estimativa desta variável (BARROZO, 1995). Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas equações de isothermas de equilíbrio.

**Tabela 2. 2:** Equações de isothermas de equilíbrio.

Modelo	Equação
Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	$X_{eq} = \frac{abcUR}{(1 - aUR)(1 - aUR + acUR)}$
Chung-Pfost	$X_{eq} = -\frac{1}{b} \ln \left[ \frac{(T + c)}{-a} \ln(UR) \right]$
Halsey modificada	$X_{eq} = \left[ \frac{-\exp(aT + c)}{\ln(UR)} \right]^{1/b}$
Brunauer-Emmett-Teller (BET)	$X_{eq} = \left( \frac{UR}{1 - UR} \right) / \left( \left( \frac{1}{a} \right) + \left( \frac{b - 1}{a} \right) UR \right)$

Fonte: Barrozo (1995); Lima (2013).

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. O aspecto mais importante desta equação é que permite calcular o conteúdo de umidade em monocamada. O conceito de conteúdo de umidade da monocamada tem sido bastante estudado em alimentos, devido à sua relação com a estabilidade química e física de alimentos desidratados (BHANDARI e ADHIKARI, 2008).

A equação de Halsey modificada foi desenvolvida supondo que a condensação ocorre em multicamadas, assumindo que o potencial de energia da molécula varia inversamente com a distância radial da superfície (RIZVI, 1986).

Vermuganti et al. (1980) determinaram os valores de umidade de equilíbrio de grãos de cevada em um intervalo de temperatura de 10 °C a 40 °C, no qual o modelo de Chung- Pfost foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Já a equação de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) é a melhor equação entre os modelos de três parâmetros. Fundamentalmente, incorpora os princípios básicos das teorias de Langmuir e BET. Todos os parâmetros utilizados na equação de GAB têm significado físico associado a eles (BHANDARI e ADHIKARI, 2008). Maia et al. (2016) estudaram o efeito da temperatura nas isotermas de dessorção de água em grãos de cevada, com a utilização do método estático das soluções salinas e obtiveram uma boa interpretação dos dados experimentais. O modelo de GAB descreveu bem os dados em condições de temperatura de 15 °C, 20 °C, 30 °C e 50 °C, e os parâmetros do modelo de GAB foram adequados para uma análise qualitativa da descrição das classes de água presentes no sistema.

#### 2.4.3 Cinética de Secagem

Os estudos sobre a transferência de calor e massa tem início, geralmente, pela determinação e análise da cinética de secagem. A cinética de secagem é, posteriormente, utilizada na elaboração dos projetos de secadores, pois permite obter dados, como o coeficiente de difusão, coeficiente de transferência de massa e fornece uma previsão adequada das taxas de secagem, que são utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência (BROOKER et al., 1992).

As taxas de transferência de calor e massa podem ser classificadas como período de taxa constante e período de taxa decrescente. Segundo Chirife (1983), o período de taxa constante é importante somente para situações em que o potencial de secagem é muito baixo ou a umidade do material é muito alta. O fim do período de taxa constante corresponde ao tempo em que a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma. O conteúdo de umidade deste ponto é denominado de umidade crítica. Brooker et al. (1974) afirmam que os grãos de cereais não costumam exibir um período de taxa constante, a menos que sejam colhidos em um estado muito imaturo ou tenham água condensada em suas superfícies.

O período de taxa decrescente se inicia quando a migração interna de umidade passa a controlar o processo. O conteúdo de umidade do material cai além da umidade crítica, a taxa de secagem decresce lentamente até se aproximar do conteúdo de umidade de equilíbrio, no qual o material fica em equilíbrio com o ar de secagem. O período de taxa decrescente é geralmente a parte mais demorada da operação de secagem. No início, os fatores importantes são similares àqueles que controlam a taxa no período constante, mas,

gradativamente, a taxa de movimento de umidade (transferência de massa) torna-se fator limitante (FELLOWS, 2006). Os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. Nota-se que um mecanismo não necessariamente exclui os outros, podendo haver a ocorrência simultânea de diversos mecanismos (CHIRIFE, 1983).

Quando as informações sobre o comportamento cinético da secagem de determinado material são 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). O modelo de cinética de secagem em camada fina proposto por Jayas et al. (1991) tem sido aplicado para:

- um simples grão livre no ar de secagem ou uma monocamada de grãos;
- uma policamada de grãos, se a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem puderem ser consideradas, para propósito de cálculos do processo de secagem, como estando no mesmo estado termodinâmico em qualquer tempo de secagem.

Concluindo:

- o modelo matemático de secagem de um simples grão é também modelo de secagem de uma camada delgada, usando qualquer método de secagem e,
- a espessura da camada fina pode mudar com a velocidade, temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Quando uma camada de material a ser seco em leito fixo não apresentar gradientes significativos de umidade e temperatura pode-se considerar que a secagem ocorreu em camada fina.

Para descrever a cinética de secagem em camada fina, na literatura, são encontrados diversos modelos, há os modelos difusivo fundamentais ou teóricos, os modelos empíricos e semiempíricos, mas o objetivo é buscar o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais e represente a cinética de secagem. Os modelos clássicos de secagem em camada fina, isoladamente, não descrevem adequadamente o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, pois os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados (BARROZO, 1995).

### *Modelo Difusivo*

Na secagem em camada fina, uma vez que o tempo de residência é considerado curto e o equilíbrio térmico é atingido rapidamente, a variação de umidade e temperatura da



fase gasosa em todo o leito pode ser considerada desprezível, sendo apenas o balanço de massa para a água contida na fase sólida considerado na modelagem do processo. Logo, com base na Teoria da Difusão, supondo um sistema isotérmico e convertendo a concentração de soluto difundente na umidade do sólido em base seca, tem-se a seguinte equação do balanço de massa:

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \rho_s \nabla X) \quad (16)$$

Assumindo a difusividade efetiva e as propriedades do sólido constantes, umidade uniforme (homogênea), a célula de secagem aproximada para uma placa plana de espessura  $2L$  e infinita, o encolhimento do material desprezível e a transferência de massa unidimensional (direção  $z$ ), a Equação (16) fica reduzida a forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (17)$$

A Equação 17 está sujeita às seguintes condições inicial e de contorno:

C.I :  $X = X_0$  em  $t = 0, 0 < z < L$

C.C.1 :  $\left(\frac{\partial X}{\partial z}\right) = 0$  em  $z = 0, t > 0$

C.C.2 :  $X = X_{eq}$  em  $z = L, t > 0$

Em estudos de secagem de material biológico, a resistência externa à transferência de massa é geralmente considerada desprezível, já que o coeficiente convectivo de transferência de massa é elevado o bastante para que uma condição de contorno do tipo convectiva possa ser dispensada. Isto implica que a superfície do sólido atinge instantaneamente o equilíbrio, conforme descrito pela C.C.2.

A Equação 17, submetida às condições apresentadas, tem sua solução analítica obtida pelo método de separação de variáveis (CRANK, 1975):

$$\frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos \left[ \left( \frac{2n+1}{2L} \right) \pi z \right] \exp \left[ - \frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D_{ef} t \right] \quad (18)$$

A umidade média é obtida pela Equação 19, teorema da média, pois em estudos de camada fina o que se obtém experimentalmente é a concentração média espacial de umidade da célula de secagem ao longo do tempo.

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L X \, dz \quad (19)$$

Substituindo a Equação 18 na Equação 19 e integrando, a umidade adimensional do meio homogêneo (MR) em função do tempo é dada por:

$$MR = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left[ - \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t \right] \quad (20)$$

Albini (2015) verificou a dependência da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) com a temperatura e a umidade inicial dos grãos de cevada, o que permite avaliar a dependência da difusividade efetiva com a temperatura através de uma correlação do tipo Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp \left( - \frac{Ea}{RT} \right) \quad (21)$$

### *Modelos empíricos e semiempíricos*

Os modelos empíricos são baseados em resultados experimentais e têm uma relação direta entre a umidade e o tempo de secagem. Estes modelos são análogos à lei de resfriamento de Newton ou à solução geral da equação de difusão (Lei de Fick) e assumem que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre a umidade atual e a umidade de equilíbrio do material (PARRY, 1985; Prado e Sartori, 2011). A Tabela 2.3 apresenta as principais equações de cinética de secagem utilizadas para grãos.

Lewis, em 1921, fazendo analogia a lei de resfriamento de Newton, sugeriu que durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade fosse proporcional à diferença entre a umidade instantânea e a umidade de equilíbrio do material, dando origem ao Modelo de Lewis (BROOKER et al., 1992).

**Tabela 2. 3:** Equações de cinética de secagem.

Modelo	Equação
Page	$MR = \exp(-K_p t^{np})$
Lewis	$MR = \exp(-K_L t)$
Henderson e Pabis	$MR = a' \exp(-K_{HP} t)$
Overhults	$MR = \exp[-(K_O t)^{no}]$

Fonte: Barrozo, 1995.

O Modelo de Page e o Modelo de Overhults são oriundos de modificações empíricas do Modelo de Lewis. O Modelo de Henderson e Pabis é baseado na pequena diferença entre a solução analítica do modelo difusivo para a umidade média de uma esfera truncado no primeiro termo e a solução com toda a série (BARROZO, 1995; VIEIRA, 2012).

O parâmetro  $K$ , denominado constante de secagem, nos Modelos de Lewis, Page e Henderson e Pabis é considerado o parâmetro que caracteriza o fenômeno de evaporação da umidade, porém não inclui as características do produto, e sim, as condições externas do processo. A dependência deste parâmetro pode ser representada por uma função apenas da temperatura do ar, por uma correlação do tipo Arrhenius, Equação 22. Entretanto, esta equação não apresenta significado físico, visto que o conceito da energia de ativação não explica nenhum fenômeno da cinética de secagem. Já para o Modelo de Overhults a função que representa esta variação é diferente e está apresentada na Equação 23 (BROKKER et al., 1992; BARROZO, 1995; VIEIRA, 2012).

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (22)$$

$$K = \exp\left(K_0 + \frac{Ea}{RT}\right) \quad (23)$$

#### 2.4.4 Encolhimento

Simultaneamente aos fenômenos de transferência de calor e massa ocorrem os processos cinéticos associados a transformações físicas, como, por exemplo, o encolhimento do material, a cristalização ou mesmo transições vítreas, e há transformações químicas e/ou

---

bioquímicas que podem produzir modificações na cor, textura, odor, etc., do material (AZEVEDO e ALVES, 2009).

O encolhimento do material, que pode ocorrer simultaneamente com a transferência de calor e massa, é um fenômeno físico caracterizado macroscopicamente pela contração de volume do material durante o processo de secagem devido à evaporação da umidade contida no material. Em leitos porosos, o encolhimento ou o deslocamento do leito pode ocorrer como resultado da mudança do tamanho e forma da partícula, e também devido ao gradiente de umidade dentro do leito (PRADO e SARTORI, 2011).

Segundo Arnosti Jr. (1997), a aplicação dos métodos para determinação da massa específica do material permite detectar o fenômeno de encolhimento da partícula que pode vir a ocorrer durante o processo de secagem. Ratti (1994) observou que a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do conteúdo de água, mas são dependentes também das condições do processo e da geometria do produto. Bala e Woods (1984) realizaram simulações de secagem em camada espessa de malte e observaram que a incorporação do fenômeno de encolhimento nos modelos melhoraram as previsões. Sendo assim, este fenômeno não pode ser ignorado na modelagem do processo de secagem.

Na literatura são encontradas diferentes abordagens para descrever o fenômeno do encolhimento. São teorias envolvendo leis mecânicas, em que se consideram as tensões e as deformações do material durante a secagem, até abordagens experimentais, em que estudos visam quantificar a dependência do volume dos materiais em função do conteúdo de umidade.

O estudo experimental do encolhimento é o mais utilizado, a razão de encolhimento volumétrico ( $S_b$ ) é obtida a partir de dados experimentais de acordo com a proporção entre o volume em um tempo de secagem e o volume inicial da amostra. Há vários modelos empíricos e teóricos desenvolvidos para descrever o fenômeno de encolhimento, tanto das partículas individuais como dos leitos.

Suzuki et al. (1976), para investigar o encolhimento durante a secagem de vegetais (cenoura, batata, batata doce e rabanete), propuseram três modelos para correlacionar os dados entre a variação de volume e o conteúdo de umidade: modelo de secagem uniforme, modelos de secagem central e modelos de secagem semicentral. No modelo de secagem uniforme assume-se que o encolhimento é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todas as fases de secagem, em que o modelo necessita de informações do conteúdo de umidade de equilíbrio e de massa específica aparente. O modelo de secagem central assume a

formação de uma camada externa seca com um centro sólido úmido. Já o modelo de secagem semicentral representa uma formulação intermediária entre os modelos anteriores.

Sokhansanj e Lang (1996) utilizaram as leis das misturas para desenvolver as Equações (24) e (25), que descrevem o encolhimento volumétrico, tanto das partículas como do leito de grãos de trigo e canola, em função do conteúdo de umidade.

$$\frac{V_s}{V_{s0}} = \left[ \frac{1 - X_0}{1 + (\eta - 1) \cdot X_0} \right] \cdot \left[ \frac{1 + (\eta - 1) \cdot X}{1 - X} \right] \quad (24)$$

$$\frac{V_b}{V_{b0}} = \frac{[1 - (X_0 - X)] \cdot [1 + (\eta - 1) \cdot X] (1 - \varepsilon_0)}{[1 + (\eta - 1) \cdot X_0] (1 - \varepsilon)} \quad (25)$$

onde,  $V_s$  e  $V_{s0}$  são os volumes das partículas,  $V_b$  e  $V_{b0}$  são os volumes dos leitos correspondentes ao conteúdo de umidade em um determinado tempo ( $X$ ) e tempo inicial ( $X_0$ ),  $\varepsilon$  é a porosidade e  $\eta$  é a massa específica relativa do sólido seco, considerada constante para cada grão.

Boyce (1965), Lozano et al.(1983), Bala e Woods (1984), Ratti (1994), Prado et al. (2006) usaram equações empíricas para representar as mudanças no volume e área de superfície em função do conteúdo de umidade. Este fato ocorre porque os modelos empíricos permitem a previsão do encolhimento sem exigir o conhecimento das propriedades físicas, que nem sempre estão disponíveis (PRADO e SARTORI, 2011).

## 2.5 Modelagem Matemática da Transferência Simultânea de Calor e Massa

Os estudos teóricos, baseados na transferência de calor e massa são complexos e sua descrição físico-matemática difícil. Na literatura, os modelos matemáticos para descrever o processo de secagem em camada espessa podem ser classificados como modelos logarítmicos e exponenciais, modelos simplificados de balanço de calor e massa e modelos baseados em equações diferenciais parciais. Os modelos logarítmicos e exponenciais são úteis devido a sua simplicidade, não exigindo ferramentas computacionais sofisticadas, mas apresentam resultados aceitáveis apenas para baixas temperaturas e velocidades do ar de secagem, normalmente fora da faixa usualmente usada para grãos. Os modelos empíricos e semiempíricos baseados em balanços de calor e massa, devido às várias simplificações

realizadas na sua elaboração, têm se mostrado pouco precisos e limitados no que se refere a faixa de aplicação (PARRY, 1985).

O modelo de secagem em camada espessa que vem recebendo maior atenção na literatura é o chamado modelo a duas fases (BROOKER et al., 1974; SILVA TELLES e MASSARANI, 1992). O modelo a duas fases é oriundo de uma análise fundamental do problema físico envolvido na secagem e tem como base a Teoria das Misturas de Truesdel (TRUESDEL, 1957), na qual a secagem do material sólido particulado pode ser descrita como um processo de transferência de calor e massa que se desenvolve entre uma fase fluida e uma fase sólida, em que apenas um componente, água, se transfere entre elas. Assim, a cada ponto do sistema está associado um valor de velocidade, umidade e temperatura para as fases sólida e fluida. Segundo o modelo a duas fases, o meio poroso é tido como um “fictício” meio contínuo e os fenômenos podem ser descritos por equações dos balanços de massa e energia num elemento de volume representativo do leito (BROOKER et al., 1992).

Brooker et al. (1974) adotaram algumas simplificações para o estabelecimento do sistema de equações do modelo, que são aceitas pela grande maioria dos pesquisadores:

- os gradientes de temperatura dentro das partículas individuais são desprezíveis;
- são desprezíveis a condução de calor e a difusão de massa entre as partículas;
- as fases sólida e fluida são consideradas misturas ideais;
- a radiação térmica e a perda de calor pelas paredes do sistema são consideradas desprezíveis;
- escoamento unidirecional com distribuições uniformes de temperatura, velocidade e umidade do fluido de secagem;
- as propriedades físicas do fluido e do sólido são constantes;
- o encolhimento do leito durante o processo de secagem é desprezível;

Entre as hipóteses adotadas no modelo a duas fases, a menos aceita é a que não há redução da espessura do meio poroso. Para materiais com altos teores de umidade inicial, esta hipótese não é válida e o fenômeno de encolhimento do leito deve ser considerado na modelagem (PRADO, 2004).

As equações que compõem o sistema que representa os fenômenos de transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido para um sistema de leito fixo são (BROOKER et al. , 1992):

- *Conservação de energia*

$$\text{Fluido} \quad \frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{-ha(T_f - T_s)}{G_f C p_f + G_f C p_v W} \quad (26)$$

$$\text{Sólido} \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{ha(T_f - T_s)}{\rho_s C p_s + \rho_s C p_a \bar{X}} + \frac{\lambda + C p_v (T_f - T_s)}{\rho_s C p_s + \rho_s C p_a \bar{X}} G_f \frac{\partial W}{\partial y} \quad (27)$$

- *Conservação de massa*

$$\text{Fluido} \quad \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{-\rho_s}{G_f} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \quad (28)$$

$$\text{Sólido} \quad \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \text{equação adequada de taxa de secagem em camada fina} \quad (29)$$

*E as condições iniciais e de contorno:*

$$T_f(0, t) = T_{f0} \quad (30)$$

$$T_s(y, 0) = T_{si} \quad (31)$$

$$W(0, t) = W_0 \quad (32)$$

$$\bar{X}(y, 0) = \bar{X}_i \quad (33)$$

Em que,  $Cp$  é o calor específico,  $G$  é a vazão mássica,  $T$  é a temperatura,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $a$  é a área superficial do sólido por unidade de volume do meio poroso,  $X$  é a umidade em base seca,  $W$  é a umidade do ar,  $y$  é a direção de escoamento do fluido e  $t$  é o tempo.

Segundo Massarani e Silva Telles (1992), a abrangência do modelo a duas fases é dependente do tratamento dado à determinação das equações constitutivas de equilíbrio termodinâmico e de transporte de calor e massa entre as fases, e a obtenção das mesmas tem sido feita a partir de estudos experimentais específicos. Neste modelo são feitas as seguintes simplificações para a solução do sistema de equações:

- ocorre escoamento unidimensional do ar;
- transporte de calor e massa é convectivo;

- taxa local de secagem é descrita por um modelo de resistência de filme associado a um fator de controle;
- comportamento ideal da fase fluida;
- capacidades caloríficas constantes;
- perda de calor através das paredes do secador é desprezível;
- perfil uniforme (velocidade, temperatura e umidade) nas condições de entrada do ar quente;
- regime de operação estabilizado;
- gradiente de pressão desprezível no meio poroso;
- ausência de interação do movimento entre as fases.

As equações originadas dos balanços de massa e energia para o modelo de Massarani e Silva Telles (1992) são:

#### *Balanço de energia*

$$\text{Fluido} \quad \varepsilon C p_f \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C p_f G_f (1 + W) \nabla T_f = -h a (T_f + T_s) - C p_f (T_f - T_s) f \quad (34)$$

$$\text{Sólido} \quad (1 - \varepsilon) C p_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + C p_s G_s (1 + X) \nabla T_s = h a (T_f - T_s) - \lambda f \quad (35)$$

#### *Balanço de massa*

$$\text{Fluido} \quad \varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{W}{1 + W} \right) + G_f \nabla W = f \quad (36)$$

$$\text{Sólido} \quad (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{X}{1 + X} \right) + G_s \nabla X = -f \quad (37)$$

#### *Para a taxa de secagem*

$$f = k_y a (Y_{f,e} - Y_f) \quad (38)$$

$$k_y = \frac{h}{C p_f} \quad (\text{Analogia de Lewis}) \quad (39)$$



---

em que,  $\varepsilon$  é a porosidade do leito,  $C_p$  é o calor específico,  $\rho$  é a massa específica,  $G$  é a vazão mássica,  $W$  é a razão mássica de água na fase,  $T$  é a temperatura,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $a$  é a área superficial do sólido por unidade de volume do meio poroso,  $\lambda$  é a entalpia mássica de vaporização da água.

A resolução do sistema de equações diferenciais resultantes do balanço de conservação de massa e energia, as equações constitutivas para o sistema em consideração e as condições iniciais e de contorno, levam ao estabelecimento dos perfis de temperatura e umidade do sólido e do fluido ao longo do secador.

Assim, após a revisão bibliográfica relacionada ao processo de secagem de grãos, foi possível o desenvolvimento do presente trabalho. A seguir, são apresentadas as metodologias empregadas nos estudos conduzidos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar para a secagem de grãos de cevada, com e sem escoamento reverso do ar de secagem.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção é apresentado o material utilizado, grãos de cevada, o equipamento e as metodologias para reumidificação, caracterização do fenômeno de encolhimento e da transferência de calor e massa durante o processo de secagem dos grãos. Também são apresentados os métodos de tratamento de dados para solução numérica do modelo de secagem e para análise da eficiência energética dos experimentos sem e com escoamento reverso do ar de secagem.

#### 3.1 Reumidificação dos grãos de cevada

Para os procedimentos experimentais foram utilizados grãos de cevada (*Hordeum vulgare*), Figura 3.1, doados pela Cooperativa Agrária Agroindustrial, localizada no Distrito de Entre Rios – Guarapuava/PR.

**Figura 3. 1:** Grãos de cevada (*Hordeum vulgare*).



Fonte: Acervo pessoal.

Uma vez que é difícil obter grãos recém-colhidos, para restabelecer o conteúdo de umidade inicial do grão úmido quando colhido, foi realizada a reumidificação do grão de cevada. Uma quantidade dos grãos de umidade inicial conhecida foi colocada em um saco plástico, no qual foi adicionada uma massa calculada de água ( $Q$ ). Em que  $Q$  foi calculado a partir da relação dada na Equação 40, na qual  $A$  é a massa inicial da amostra em kg,  $a$  o conteúdo de umidade inicial da amostra em base úmida (% b.u.),  $b$  o final (desejado), de modo que a umidade final foi pré-estabelecida através de um balanço de massa

(BALASUBRAMANIAN, 2001). Três valores de umidade inicial foram pré-estabelecidos: 25 % , 20 % e 13 % , respectivamente, X1, X2 e X3.

$$Q = \frac{A(b - a)}{(100 - b)} \quad (40)$$

Após a reumidificação, os grãos permaneceram armazenados em geladeira. O conteúdo de umidade das amostras foi determinado pelo método da estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (AOAC, 2002).

### 3.2 Unidade experimental

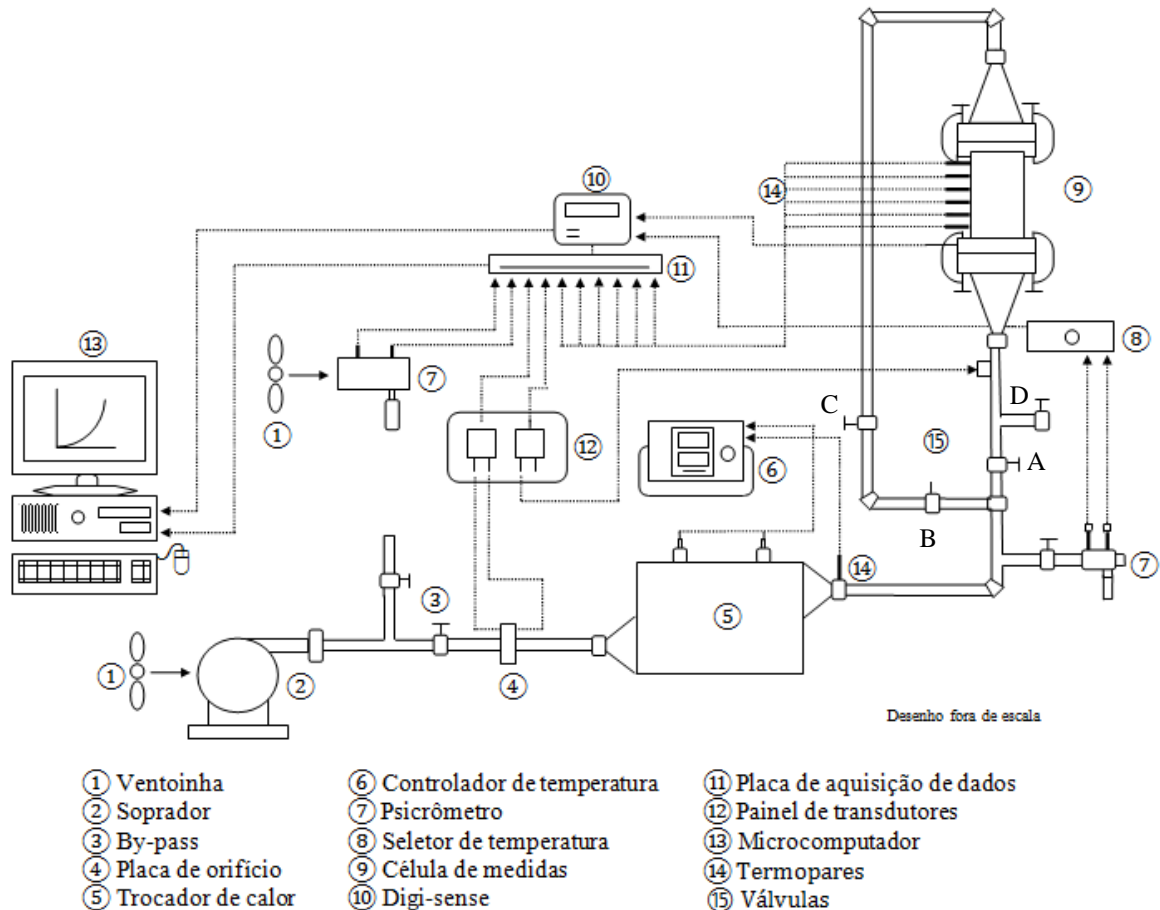
Para realização deste trabalho foi utilizada a unidade de secagem experimental em leito fixo existente no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, que opera com e sem escoamento reverso do ar de secagem. A Figura 3.2 apresenta o equipamento utilizado para os experimentos de secagem.

No equipamento utilizado (Figura 3.2), temos uma ventoinha (1) que direciona ar adicional ao soprador radial IBRAM com 3,5 HP de potência (2) que fornece ar para o aquecedor (5). O aquecedor, com controle de temperatura, aquece o ar direcionado à superfície inferior da célula de secagem (9). O aquecedor é constituído de duas resistências elétricas, com 1000 W de potência cada, ligadas em série. O conjunto de resistências está conectado a um controlador de temperatura (8), modelo Flyever FE50S, que permite alterar a potência de aquecimento e obter a temperatura de entrada desejada. A vazão de entrada de ar foi ajustada com o auxílio de um sistema de purga (by-pass) (3), constituído de duas válvulas do tipo gaveta de 2 polegadas de diâmetro, que direcionam o ar proveniente do soprador em direção ao ambiente (purga) ou diretamente para o leito de secagem. A vazão mássica de ar foi determinada indiretamente pela diferença de pressão no escoamento em uma placa de orifício (4). Para as medidas de umidade relativa do ar ambiente e do ar de secagem havia um psicrômetro constituído de termopares de bulbo seco e bulbo úmido (7). O equipamento não dispõe de controladores de umidade do ar, sendo assim, a umidade do ar de secagem depende das condições do laboratório.

Os transdutores de pressão (12), um com faixa operacional de 0-10 polegadas de água modelo 600D-014 que forneceu os dados de pressão da placa de orifício, e o outro,

com faixa de 0-5 polegadas de água modelo 600D-5 forneceu os dados da queda de pressão do leito de secagem, ambos transdutores são da marca Auto Tran Incorporated e convertem o sinal de pressão em voltagem entre 1 – 5 V linearmente.

**Figura 3. 2:** Esquema da unidade experimental para estudo de secagem em leito fixo.



Fonte: Adaptado de Perazzini, 2014.

As seções de entrada, superior e inferior, são constituídas por um tubo de teflon com diâmetro interno igual a 10 cm e com altura de 3 cm. Cada tubo foi recheado com partículas de vidro de 2,80 mm de diâmetro e uma tela de sustentação foi fixada nas extremidades para fixar as partículas em seu interior e estabilizar a velocidade do ar. O tubo foi unido a um difusor (cabeçote) de 9 cm de comprimento por uma flange de ferro. O ar de secagem antes de atingir ascendentemente a célula de medida percorre uma tubulação de ferro de 1,2 m de comprimento e percorre uma tubulação de 2,0 m de comprimento para atingir a célula na direção descendente. Estas tubulações foram isoladas com tubos bipartidos fabricados com silicato de cálcio e estes foram cobertos com alumínio corrugado. As quatro válvulas (15) permitem que o ar de secagem percorra a seção de secagem de maneira

ascendente ou descendente, dependendo da configuração em que são dispostas. Na secagem convencional, o ar era alimentado no fundo do secador fechando as válvulas B e D (as válvulas A e C permaneciam abertas e o fluxo de ar era direcionado para a saída de ar C). Nos experimentos realizados com reversão do fluxo de ar, a direção do fluxo foi periodicamente invertida em intervalos de 10 min, abrindo as válvulas B e D e fechando as válvulas A e C.

A seção de secagem consistiu de um tubo cilíndrico de acrílico de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Uma tela de sustentação metálica móvel foi utilizada para impedir a fluidização dos grãos de cevada. A tela foi fixada por uma haste flexível de metal. O tubo de acrílico era sustentado por uma base inferior e superior de teflon de diâmetro de 15,5 cm e com uma cavidade de 10 cm de diâmetro e 0,5 cm de profundidade, para encaixe do tubo de acrílico.

### **3.3 Ensaio preliminares**

Foram realizados alguns ensaios preliminares para verificar as condições operacionais do equipamento e para determinar parâmetros operacionais, como velocidade e temperatura do ar de secagem.

Nos ensaios preliminares, um tempo de 720 minutos foi determinado como tempo suficiente para que os grãos de cevada atingissem umidade inferior a 10% de umidade (base úmida), conteúdo indicado para o armazenamento dos grãos por períodos mais longos (BRIGGS et al., 2004).

Devido a limitações do equipamento, escolheu-se para a faixa de temperatura um mínimo de 40°C e uma temperatura máxima de 50°C. Esta temperatura máxima foi escolhida para assegurar que os grãos de cevada não sofressem danos térmicos.

Com relação à velocidade do ar de secagem, foi utilizada a velocidade de 4,0 m/s, valor que foi mantido constante para todos os experimentos. Esta velocidade foi escolhida com base nos resultados obtidos por Albini (2015).

### **3.4 Ensaio em camada espessa**

Na realização dos ensaios em camada espessa foi utilizada a metodologia proposta por Zotin (1985) para o empacotamento de leito de grãos, visando garantir a

reprodutibilidade e a homogeneidade da estrutura do leito formado. Esta metodologia consiste em derramar uma quantidade fixa de grãos, em etapas, para ter a mesma altura de queda, após a adição de uma quantidade de grãos, acomodar o meio poroso através de batidas na parede do leito e quando não se observar mais a variação de altura do meio, introduzir uma nova quantidade de grãos no leito, até atingir a altura de empacotamento desejada.

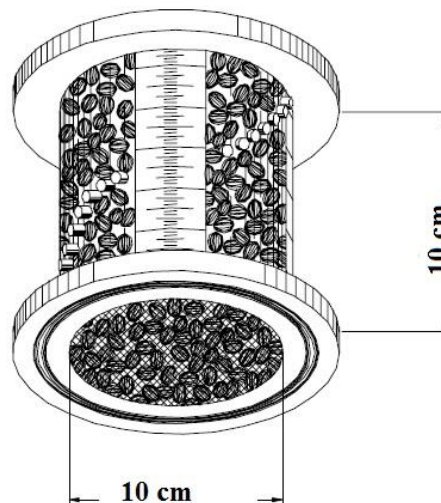
*(a) Determinação do encolhimento do leito de grãos de cevada*

Para a medida do encolhimento do leito de grãos de cevada durante a secagem em camada espessa foi construída uma célula cilíndrica em acrílico transparente, a fim de permitir a visualização e a medida da contração do volume do leito poroso. A célula possui 10 cm de diâmetro e 10 cm altura. Um esquema da célula utilizada para medida de encolhimento é apresentada na Figura 3.3.

O encolhimento do leito de grãos de cevada foi determinado através de medidas de sua altura em três posições angulares equidistantes em  $120^\circ$ , com o auxílio de graduações existentes na célula de secagem.

O encolhimento no leito espesso de grãos de cevada foi determinado para os experimentos com e sem reversão do escoamento do ar de secagem. O tempo de 10 minutos em que se deveria fazer a reversão do escoamento do ar de secagem foi estabelecido com base nos experimentos de transferência de calor.

**Figura 3. 3:** Esquema da célula de secagem para a medida de encolhimento do leito de grãos de cevada.



Fonte: Adaptado de Prado (2004).

As condições operacionais para determinação do encolhimento do leito estão descritas na Tabela 3.1, para cada condição operacional foi realizado a repetição do experimento para verificar a reprodutibilidade dos dados. Todos os experimentos descritos na Tabela 3.1 foram realizados com velocidade do ar de secagem de 4,0 m/s.

**Tabela 3. 1:** Condições operacionais para determinação do encolhimento do leito.

Sem reversão			Com reversão		
Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]	Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]
1	40	X1	10	40	X1
2	45	X1	11	45	X1
3	50	X1	12	50	X1
4	40	X2	13	40	X2
5	45	X2	14	45	X2
6	50	X2	15	50	X2
7	40	X3	16	40	X3
8	45	X3	17	45	X3
9	50	X3	18	50	X3

Fonte: Elaborado pelo autor.

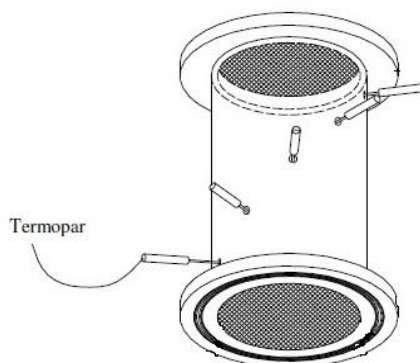
*(b) Determinação da distribuição de temperatura no leito*

Os dados de temperatura foram determinados por termopares inseridos em diferentes posições axiais. Os termopares são constituídos de termoelementos de ferro-constantan revestidos por bainha de aço inox, tendo os termopares uma espessura de 1,5 mm, espessura que proporciona boa resistência aos sensores, sem grandes interferências no leito. Os 10 termopares de 5,2 cm foram dispostos nas posições axiais de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 cm e um termopar foi disposto próximo à base do secador (0,3 cm). Um termopar do tipo J (ferro-constantan) de 6 cm de comprimento e 3 mm de espessura foi inserido na base inferior e outro na base superior da célula para determinar a temperatura de entrada/saída do ar. Para minimizar erros de medidas ocasionados pelo efeito aleta, todos os termopares foram isolados eletricamente e termicamente, com seus cabeçotes revestidos com poliestireno expandido. Os termopares foram calibrados em um poço de calibração (Block Calibrator DB-35L) obtendo-se um desvio médio de  $\pm 0,3$  °C entre as medidas de temperaturas fornecidas pelo calibrador e aquelas medidas pelos termopares.

A célula de medida utilizada continha os termopares distribuídos de maneira helicoidal ao longo da célula, como apresentado na Figura 3.4. Os termopares distribuídos ao longo do leito estavam conectados a um leitor de temperaturas. A placa de aquisição de dados (11), Figura 3.2, Lynx ADS0500 recebeu o sinais analógicos de

temperatura e de pressão e o microcomputador (13) processou, filtrou e converteu estes sinais analógicos em digitais. Com auxílio de uma rotina computacional desenvolvida em modo LabVIEW (Nationals Instruments, versão 7.0) os dados foram lidos e armazenados.

**Figura 3. 4:** Células utilizadas para obtenção da distribuição de temperatura do leito.



Fonte: Adaptado de Lima (2013).

Os perfis de temperatura no leito espesso de grãos de cevada foram determinados para os experimentos com e sem reversão do escoamento do ar de secagem.

O tempo em que se deveria fazer a inversão do ar de secagem foi estabelecido com base nos experimentos sem reversão, em que se observou que com 10 minutos o equilíbrio térmico para a transferência de calor foi alcançado.

A metodologia utilizada para determinação da distribuição de temperatura no leito foi adequada. Os experimentos foram realizados com repetições e os dados mostraram resultados reprodutíveis. As condições operacionais de cada experimento estão descritas na Tabela 3.2. Todos os experimentos descritos na Tabela 3.2 foram realizados com velocidade do ar de secagem de 4,0 m/s e o tempo total do experimento foi de 720 minutos, com aquisição de dados a cada 20 segundos.

**Tabela 3. 2:** Condições operacionais para determinação da distribuição de temperatura no leito.

Sem reversão			Com reversão		
Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]	Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]
19	40	X1	28	40	X1
20	45	X1	29	45	X1
21	50	X1	30	50	X1
22	40	X2	31	40	X2
23	45	X2	32	45	X2
24	50	X2	33	50	X2
25	40	X3	34	40	X3
26	45	X3	35	45	X3
27	50	X3	36	50	X3

Fonte: Elaborado pelo autor.



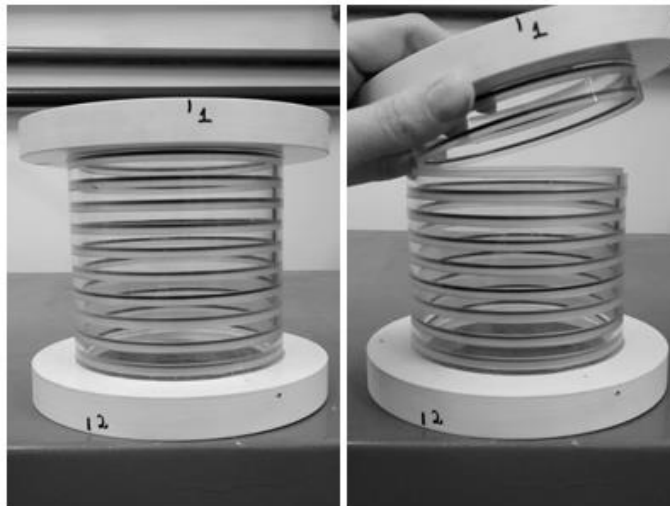
(c) *Determinação da distribuição de umidade no leito*

Para determinação da distribuição de umidade no leito, uma célula também com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, mas com subdivisões de 1 cm, dotadas em suas extremidades de um sistema de encaixe e vedação que possibilita a sobreposição das diversas subdivisões, permitindo a fragmentação do leito e as medidas locais de umidade, Figura 3.5.

A espessura da seção para a subdivisões do leito foi definida com base em Albini (2015). De acordo com este trabalho, 1 cm representa a espessura de camada fina, ou seja, a espessura correspondente ao menor elemento de volume representativo do leito. Assim, para o estudo do comportamento de secagem em leitos espessos foi utilizada uma altura de empacotamento de 10 cm, resultando em 10 camadas.

Foi utilizado o método de fragmentação periódica e reconstituição do leito em tempos pré-determinados para a obtenção dos dados de distribuição de umidade. Por ser um método destrutivo, a fragmentação exige que para cada tempo um novo leito seja empacotado.

**Figura 3. 5:** Células utilizadas para obtenção da distribuição de umidade no leito.



Fonte: Acervo pessoal.

Os ensaios foram realizados nos tempos de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 minutos. Para cada tempo foi realizada a medida de umidade para cada camada da célula (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 cm). Assim, a umidade foi medida em função do tempo e da posição longitudinal do leito. A célula era retirada da unidade experimental e as

amostras de grãos de cevada eram retiradas de cada seção e realizadas as medidas de umidade, em triplicata, pelo método da estufa ( $105 \pm 3$  °C por 24 horas).

Os perfis de umidade no leito espesso de grãos de cevada foram determinados para os experimentos com e sem reversão do escoamento do ar de secagem. O tempo da inversão do ar de secagem foi estabelecido com base nos experimentos de transferência de calor, 10 minutos ente cada reversão.

As condições operacionais para determinação da distribuição de umidade no leito estão descritas na Tabela 3.3, Todos os experimentos descritos na Tabela 3.3 foram realizados com velocidade do ar de secagem de 4,0 m/s. Com base em ensaios preliminares, não foram realizadas repetições para estes experimentos, visto que o método utilizado mostrou-se reproduzível.

**Tabela 3. 3:** Condições operacionais para determinação da distribuição de umidade no leito.

Sem reversão			Com reversão		
Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]	Experimento	Temperatura [°C]	Umidade Inicial [b.s]
37	40	X1	43	40	X1
38	50	X1	44	50	X1
39	40	X2	45	40	X2
40	50	X2	46	50	X2
41	40	X3	47	40	X3
42	50	X3	48	50	X3

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Modelagem matemática da transferência de calor e massa de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa

A simulação dos perfis de umidade e temperatura do sólido e do gás durante a secagem foi realizada através do modelo a duas fases. O modelo proposto por Massarani e Silva Teles (1992) particularizado ao leito fixo apresenta as seguintes equações de conservação de massa e energia e sistema de coordenadas:

*Balanço de energia*

$$\text{Fluido} \quad \varepsilon C p_f \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C p_f G_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = -h a (T_f - T_s) - C p_f (T_f - T_s) f \quad (41)$$

$$\text{Sólido} \quad (1 - \varepsilon)Cp_s\rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = ha(T_f - T_s) - \lambda f \quad (42)$$

*Balanço de massa*

$$\text{Fluido} \quad \varepsilon\rho_f \frac{\partial W}{\partial t} + G_f \frac{\partial W}{\partial z} = f \quad (43)$$

$$\text{Sólido} \quad (1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = -f \quad (44)$$

Condições iniciais e de contorno:

$$X(y, 0) = X_{s0} \quad (45a)$$

$$W(0, t) = W_{f0} \quad (45b)$$

$$T_m(y, 0) = T_{m0} = T_{s0} \quad (45c)$$

$$T_m(0, t) = T_{f\infty} \quad (45d)$$

Algumas considerações assumidas para o desenvolvimento do modelo a duas fases:

- distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador;
- as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- transferência de calor predominantemente convectiva;
- transporte unidimensional de calor e massa;
- o fenômeno de encolhimento não é desprezível e
- as propriedades físicas do material são assumidas como funções do conteúdo de umidade inicial.

Estas duas últimas considerações diferem das originalmente propostas por Brooker et al. (1974) e Massarani e Silva Telles (1992) para o modelo a duas fases.

Mas a principal consideração adotada, assim como Fumagalli (2007) no estudo da secagem de sementes de *Brachiaria brizantha*, é o equilíbrio térmico entre as fases (gás, sólido e mistura), ou seja,  $T_f = T_s = T_m$ , pois há uma dificuldade experimental para se obter as temperaturas da fase fluida e da fase sólida separadamente. Com esta hipótese, somam-se as equações de conservação de energia, obtendo-se um balanço para a mistura fluido-sólido

em equilíbrio térmico, dado por uma única equação. Temos assim, a Equação 46, que é a equação de conservação de energia para a mistura fluido-sólido.

$$[\varepsilon C p_f \rho_f + (1 - \varepsilon) C p_s \rho_s] \frac{\partial T_m}{\partial t} + C p_f G_f (T_m + T_{f0}) = -\lambda f \quad (46)$$

Para incorporar o encolhimento dos grãos durante a secagem, um sistema de coordenadas móvel, que segue o movimento de contração do leito de grãos, foi utilizado, Equação 47, com base em Ratti e Mujumdar (1995).

$$\partial y = \frac{\rho_{b0}}{\rho_b} \partial z = \frac{V_b}{V_{b0}} \partial z = S_b \partial z \quad (47)$$

Assim, com as considerações feitas para a secagem dos grãos em leito fixo, o sistema de equações diferenciais parciais (EDPs) obtido do balanço de massa e energia em um volume diferencial localizado no leito fixo é representado da seguinte forma:

*Conservação de massa para o fluido:*

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{(\varepsilon \rho_f)} \left( f - \frac{G_f}{S_b} \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad (48)$$

*Conservação de massa para o sólido:*

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (49)$$

*Conservação de energia para a mistura fluido-sólido:*

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{-f \lambda - \left( \frac{G_f}{S_b} (C p_f + W C p_v) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right)}{(1 - \varepsilon) \rho_s (C p_s + X C p_l) + \varepsilon \rho_f (C p_f + W C p_v)} \quad (50)$$

*Condições iniciais e de contorno:*

$$X(z, 0) = X_0$$

$$T_m(z, 0) = T_{m0} = T_{s0}$$

$$W(0, t) = W_0$$

$$T_m(0, t) = T_{f0}$$

Para a simulação, temos um sistema de equações diferenciais parciais obtido dos balanços de massa e energia para as fases sólida e fluida. Para a resolução do modelo proposto foi utilizado o método de linhas. Foi utilizado o software MatLab® (R2015a, Mathworks) para resolver as derivadas temporais.

O método das linhas é uma ferramenta para resolução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs) não lineares e é utilizado para aproximar EDPs através de sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDOs). O procedimento consiste em discretizar, na EDP, todas as variáveis exceto uma delas, obtendo assim um sistema de EDOs. O tempo (t) é deixado contínuo e as variáveis espaciais são discretizadas (PINTO e LAGE, 2001). A discretização da variável espacial pode ser feita de diferentes maneiras, entre elas por diferenças finitas que foi o modo utilizado neste trabalho. Após a discretização das derivadas espaciais foi obtido um sistema de equações diferenciais ordinárias no tempo, conforme descrito a seguir, em que  $i = 1, \dots, N$  (número de subdivisões do domínio z).

*Conservação de massa para o fluido:*

$$\frac{\partial W(i)}{\partial t} = \frac{1}{(\varepsilon(i) \rho_f)} \left( f - \frac{G_f}{S_b(i)} \left( \frac{W(i) - W(i-1)}{\Delta z} \right) \right) \quad (51)$$

*Conservação de massa para o sólido:*

$$\frac{\partial X(i)}{\partial t} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon(i)) \rho_s(i)} \quad (52)$$

Conservação de energia para a mistura fluido-sólido:

$$\frac{\partial T_m(i)}{\partial t} = \frac{-f \lambda - \left( \frac{G_f}{S_b(i)} (Cp_f + W(i) Cp_v) \left( \frac{T_m(i) - T_m(i-1)}{\Delta z} \right) \right)}{(1 - \varepsilon(i)) \rho_s(i) (Cp_s + X(i) Cp_l) + \varepsilon(i) \rho_f (Cp_f + W(i) Cp_v)} \quad (53)$$

### 3.6 Estimativa dos parâmetros de transferência de calor e massa

A solução numérica do modelo requer um conhecimento das equações auxiliares para umidade de equilíbrio, taxa de secagem e propriedades físicas do material. Estas equações são oriundas de estudos específicos, apresentados a seguir.

#### 3.6.1 Umidade de equilíbrio

Os dados de umidade de equilíbrio para grãos de cevada obtidos por Maia et al. (2016) foram utilizados na modelagem matemática deste trabalho. Na Tabela 3.4 temos os coeficientes do modelo GAB para as isotermas de cevada, segundo os autores, o modelo se mostrou adequado para a previsão da umidade de equilíbrio dos grãos de cevada.

**Tabela 3. 4:** Coeficientes do modelo GAB para isotermas de cevada.

	Temperaturas	
	30 °C	50 °C
<b>a</b>	0,67	0,73
<b>b</b>	0,080	0,067
<b>c</b>	30,0	9,35
R <sup>2</sup>	0,997	0,999

Fonte: Maia et al. (2016)

#### 3.6.2 Taxa de secagem

A equação utilizada para a taxa de secagem de grãos de cevada foi a Equação de Page, obtida a partir dos dados de Albini (2015) e está descrita a seguir.

Para taxa de secagem temos:

$$MR = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-K t^n) \quad (54)$$

Onde  $K = \exp\left(7,8119 - \left(4403,7 / (T_m + 273,15)\right)\right)$ , para  $t$  em minutos e  $T_m$  em °C. Assim, a variação de umidade dos grãos de cevada com o tempo é igual a:

$$\bar{X} = (X_0 - X_{eq})\exp(-K t^n) + X_{eq} \quad (55)$$

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{-n(X_0 - X_{eq}) K \exp(-K t^n)}{(t^{(1-n)})} \quad (56)$$

A escolha por utilizar a Equação de Page foi feita como uma forma de simplificar a solução do complexo sistema de equações do modelo a duas fases e com base nos dados obtidos por Albini (2015), não foram observadas diferenças significativas entre as curvas de cinética de secagem ajustadas pela Equação de Page e pela Equação de Difusão, por exemplo. Segundo Bala (2016), há na literatura vários estudos que relatam que a Equação de Page prevê adequadamente a secagem em camada fina para cereais, como os grãos de cevada.

Para cada condição operacional, o parâmetro  $n$  assumiu um valor específico, como apresentado na Tabela 3. 5.

**Tabela 3. 5:** Valores do parâmetro  $n$  da equação de Page.

Experimento	Temperatura de secagem [°C]	Umidade inicial	$n$
37	40	X1	0,66
39	40	X2	0,64
41	40	X3	0,55
38	50	X1	0,68
40	50	X2	0,65
42	50	X3	0,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6.3 Propriedades físicas

A partir do estudo realizado por Albini (2015), em que caracterizou os grãos de cevada em função do conteúdo de umidade, temos as seguintes informações:

*Massa específica real ( $\rho_s$ )*

$$\rho_s = 1,3104 + 0,0998 (X(i)/X_0) \quad (57)$$

*Porosidade do leito ( $\varepsilon$ )*

$$\varepsilon = 0,4459 - 0,0968 (X(i)/X_0) \quad (58)$$

### 3.6.4 Equações e parâmetros complementares

As equações que descrevem as condições do ar de secagem estão apresentadas a seguir. Com base em Strumillo e Kudra (1986), a umidade absoluta do ar ( $Y$ ) é dada pela equação aplicada a gases com comportamento ideal:

$$Y = 0,622 \left( \frac{P_v}{P - P_v} \right) \quad (59)$$

Sendo  $P_v$  a pressão de vapor e  $P$  a pressão do sistema. A pressão de vapor  $P_v$  é dada por:

$$P_v = P_{sat} - A (T_f - T) P, \text{ sendo:} \quad (60)$$

$$A = \frac{Cp_f}{0,622 \lambda} \left( \frac{P - P_{sat}}{P} \right) \quad (61)$$

onde  $P_{sat}$  é a pressão de saturação.

A pressão de vapor saturado é dada pela expressão de Antoine:

$$P_{sat} = \exp \left[ \frac{18,3036 - \frac{3816,44}{(T_s + 273,15) - 46,13}}{760} \right] \quad (62)$$



A umidade relativa do ar é dada pela equação:

$$UR = \left( \frac{P_{ab}}{P_{sat}} \right) \quad (63)$$

Em que  $P_{ab}$  é a pressão de vapor da água na temperatura do ar:

$$P_{ab} = \left[ \frac{\left( \frac{28,97}{18} Y \right)}{1 + \left( \frac{28,97}{18} Y \right)} \right] \quad (64)$$

Na Tabela 3.6 temos os dados de calor específico e calor latente utilizados na modelagem e simulação.

**Tabela 3. 6:** Dados de calor específico e calor latente.

<b>Calor específico</b>	
Água (ÇENGEL e GHAJAR, 2012)	$Cp_l = 1,0$ [cal/g °C]
Ar seco (ÇENGEL e GHAJAR, 2012)	$Cp_f = 0,25$ [cal/g °C]
Vapor d'água (ÇENGEL e GHAJAR, 2012)	$Cp_v = 0,28$ [cal/g °C]
Grãos de cevada (BALA, 2016)	$Cp_s = 0,35$ [cal/g °C]
<b>Calor latente</b>	
Vaporização da água (ÇENGEL e GHAJAR, 2012)	$\lambda = 573$ [cal/g]

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 3.7 estão apresentadas as dimensões do leito de grãos de cevada que foram utilizados na modelagem e simulação.

**Tabela 3. 7:** Dimensões do leito de grãos de cevada.

<b>Dimensões do leito de grãos de cevada</b>	
Altura do leito, [cm]	H = 10
Raio do leito, [cm]	raio = 5

Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 3.7 Forma de análise dos resultados

#### *Distribuição de umidade no leito*

Com os resultados de umidade (base seca) e tempo que foram obtidos ao longo de cada experimento, foram construídas curvas de adimensional de umidade ( $MR$ ) em função do tempo de secagem. O adimensional de umidade ( $MR$ ) foi calculado pela definição a seguir:

$$MR = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (65)$$

onde  $\bar{X}_t$  é a umidade média em determinado tempo do processo,  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio e  $X_0$  é a umidade inicial da amostra.

#### *Tratamento estatístico dos dados de encolhimento do leito*

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância ANOVA e Teste de Tukey, ao nível de significância de 5 %, utilizando o *software* Excel.

#### *Eficiência energética*

Para avaliar o desempenho do secador, os parâmetros usuais adotados na literatura foram estimados (KUDRA, 2012; LIMA e ROCHA, 1998; MOTEVALLI et al., 2014; VIEIRA et al., 2007).

#### Eficiência de secagem (DE)

$$DE (\%) = \frac{\text{energia utilizada para aquecer o material e evaporação da umidade}}{\text{entrada total de energia}} \quad (66)$$

Eficiência energética (EE)

$$EE (\%) = \frac{\text{energia utilizada para evaporação da umidade}}{\text{entrada total de energia}} \quad (67)$$

Consumo energético específico (SEC)

$$SEC (MJ/kg) = \frac{\text{entrada de energia do aquecedor de ar}}{\text{taxa de evaporação da água}} \quad (68)$$

O balanço de energia aplicado ao secador de leito fixo foi baseado nos experimentos 37 a 48, utilizados na determinação da distribuição de umidade no leito. Os experimentos foram realizados conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.3. O desempenho energético do secador foi analisado considerando o tempo necessário para atingir um conteúdo de umidade em torno de 12 % (b.u.).

A energia requerida para evaporação da água foi calculada ( $\Delta H_{v,b}$ ) (CENKOWSKI et al., 1992), como segue:

$$Q_w = \Delta H_{v,b} m_{db} (\bar{X}_i - \bar{X}_t) \quad (69)$$

$$\Delta H_{v,b} = (2502,2 - 2,39T_1)[1 + 1,0\exp(-19,9\bar{X}_t)] \quad (70)$$

A energia necessária para aquecer os grãos foi calculada por:

$$Q_m = m_{wb} c_{p,b} (T_{b,t} - T_{b,i}) \quad (71)$$

onde  $m_{wb}$  é a massa úmida dos grãos de cevada,  $c_{p,b}$  é o calor específico dos grãos de cevada,  $T_{b,t}$  e  $T_{b,i}$  são as temperaturas médias dos grãos de cevada no momento  $t$  e no início do processo, respectivamente. O calor específico dos grãos de cevada foi calculado em função do conteúdo de umidade, a partir da Equação (BALA, 2016):

$$c_{p,b} = 1,445 + 0,04885\bar{X}_t \quad (72)$$

onde  $\bar{X}_t$  é o conteúdo de umidade médio no tempo  $t$ , em base seca.

A energia térmica fornecida ao sistema,  $E_{ter}$ , foi calculada com base na diferença entre a temperatura de entrada de ar ( $T_1$ ) e a temperatura do ar ambiente ( $T_{amb}$ ), Equação 73.

$$E_{ter} = \dot{m}c_p(T_1 - T_{amb}) t \quad (73)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar e  $c_p$  é o calor específico do ar, que foi estimado a partir do calor específico do vapor ( $c_{p,v}$ ), calor específico do ar seco ( $c_{p,g}$ ) e umidade absoluta do ar ( $Y$ ), Equação 74 (BORGNAKKE e SONNTAG, 2009).

$$c_p = c_{p,g} + c_{p,v}Y \quad (74)$$

$$c_{p,g} = 1,05 - 0,365 \left( \frac{T_1}{1000} \right) + 0,85 \left( \frac{T_1}{1000} \right)^2 - 0,39 \left( \frac{T_1}{1000} \right)^3 \quad (75)$$

$$c_{p,v} = 1,79 + 0,107 \left( \frac{T_1}{1000} \right) + 0,586 \left( \frac{T_1}{1000} \right)^2 - 0,20 \left( \frac{T_1}{1000} \right)^3 \quad (76)$$

onde  $T_1$  é a temperatura absoluta do ar de entrada. A umidade absoluta do ar de entrada foi medida usando um psicrômetro de bulbo úmido.

### *Modelagem e Simulação*

Para simulação do modelo a duas fases, foi utilizado o software Matlab® R2015a para resolver as derivadas temporais utilizando a ferramenta ode23s (APÊNDICE A).

A verificação do modelo proposto foi realizada com base na comparação entre os resultados experimentais e os simulados, e o erro médio relativo foi utilizado para verificar o ajuste dos mesmos.

$$EMR(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(y_{exp} - y_{sim})}{y_{exp}} \cdot 100 \quad (77)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir das metodologias utilizadas no trabalho.

Inicialmente são apresentados os dados do conteúdo de umidade inicial dos grãos de cevadas, que foram reumidificadas para utilização nos experimentos. Em seguida, foi realizada a caracterização do fenômeno de encolhimento nos leitos empacotados com os grãos para os três conteúdos de umidade iniciais e para os processos de secagem sem e com reversão do escoamento do ar de secagem para três temperaturas iniciais do ar. A seguir, um estudo da distribuição de temperatura e umidade para os experimentos sem e com reversão do escoamento do ar de secagem é apresentado. A heterogeneidade do processo de secagem foi avaliada com base nos dados experimentais e cálculos da eficiência energética e eficiência de secagem.

No final, temos uma apresentação da solução numérica do modelo a duas fases, que considerou o encolhimento do leito de grãos de cevada, para os experimentos sem reversão do ar de secagem, seguida da comparação dos resultados preditos com os obtidos experimentalmente.

### 4.1 Reumidificação dos grãos de cevada

Seguindo a metodologia descrita anteriormente, os grãos de cevada foram reumidificados para três diferentes conteúdos de umidade inicial, apresentados na Tabela 4.1. Com base nos dados apresentados, se observa o baixo desvio apresentado, indicando que a metodologia utilizada é satisfatória.

**Tabela 4. 1:** Dados do conteúdo de umidade inicial.

Umidade Inicial	Base Úmida [b.u.]	Base Seca [b.s.]
X1	$25 \pm 0,9 \%$	$0,34 \pm 0,01$
X2	$20 \pm 0,5 \%$	$0,24 \pm 0,01$
X3	$13 \pm 0,7 \%$	$0,15 \pm 0,01$

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Encolhimento

O encolhimento é um fenômeno físico caracterizado pela contração de volume do material durante o processo de secagem. Ao observar os dados individuais dos grãos de cevada obtidos por Albini (2015), verifica-se pouca variação das dimensões lineares. Mas ao observar os dados da massa específica e densidade *bulk*, Tabela 4.2, se nota que há uma diminuição dos valores com o aumento da umidade. Este fato ocorre, pois há um maior aumento do volume dos grãos em comparação com o aumento da massa (TAVAKOLI et al., 2009).

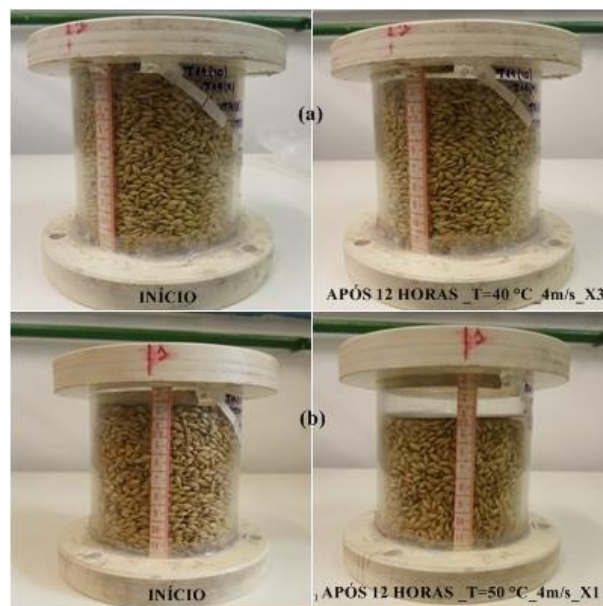
**Tabela 4. 2:** Propriedades físicas dos grãos de cevada.

Propriedades Físicas		Dados		
		X1	X2	X3
Massa específica	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,337±0,006	1,345±0,003	1,371±0,001
Densidade do leito (bulk)	$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,701±0,006	0,718±0,001	0,750±0,001

Fonte: Albini, 2015.

Na Figura 4.1 estão apresentados os leitos de cevada, antes e após o processo de secagem, em duas condições experimentais.

**Figura 4. 1:** Leito empacotado, antes e após a secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

---

Na Figura 4.1 (a) os grãos estavam com umidade inicial X3 e temperatura do ar de secagem de 40 °C, já na Figura 4.1 (b) a umidade inicial era X1 e temperatura do ar de secagem de 50°C, ou seja, dois extremos das condições experimentais utilizadas neste trabalho. Essa colocação das imagens foi proposital para observar qualitativamente o encolhimento do leito de grãos de cevada durante a secagem.

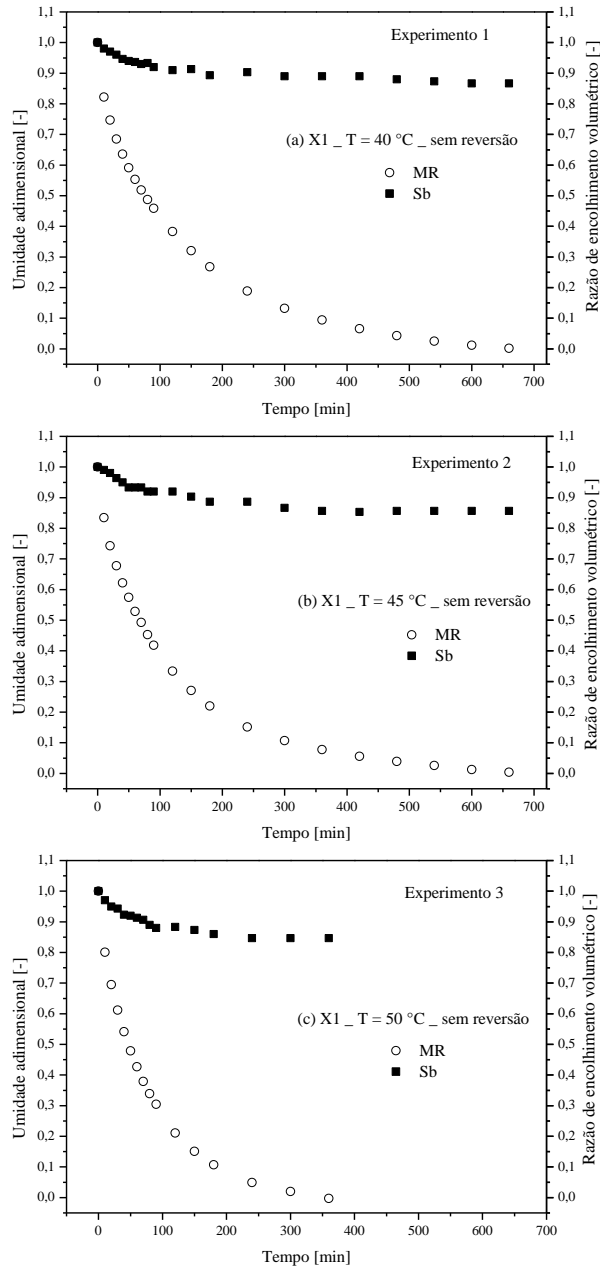
Os dados de encolhimento volumétrico do leito, expressos pela razão  $Sb = V_l / V_{l0}$ , foram plotados em conjunto com a umidade adimensional média do leito ( $MR$ ) em função do tempo de secagem (minutos), para os ensaios sem reversão e com reversão.

Nas Figuras 4.2 e 4.3, podemos analisar a dinâmica de encolhimento do leito de grãos de cevada, com umidade inicial X1, submetidos ao processo de secagem sem reversão e com reversão, respectivamente.

Temos nas Figuras 4.4 e 4.5, a dinâmica de encolhimento do leito de grãos de cevada, com umidade inicial X2, submetidos ao processo de secagem sem reversão e com reversão do ar de secagem, respectivamente.

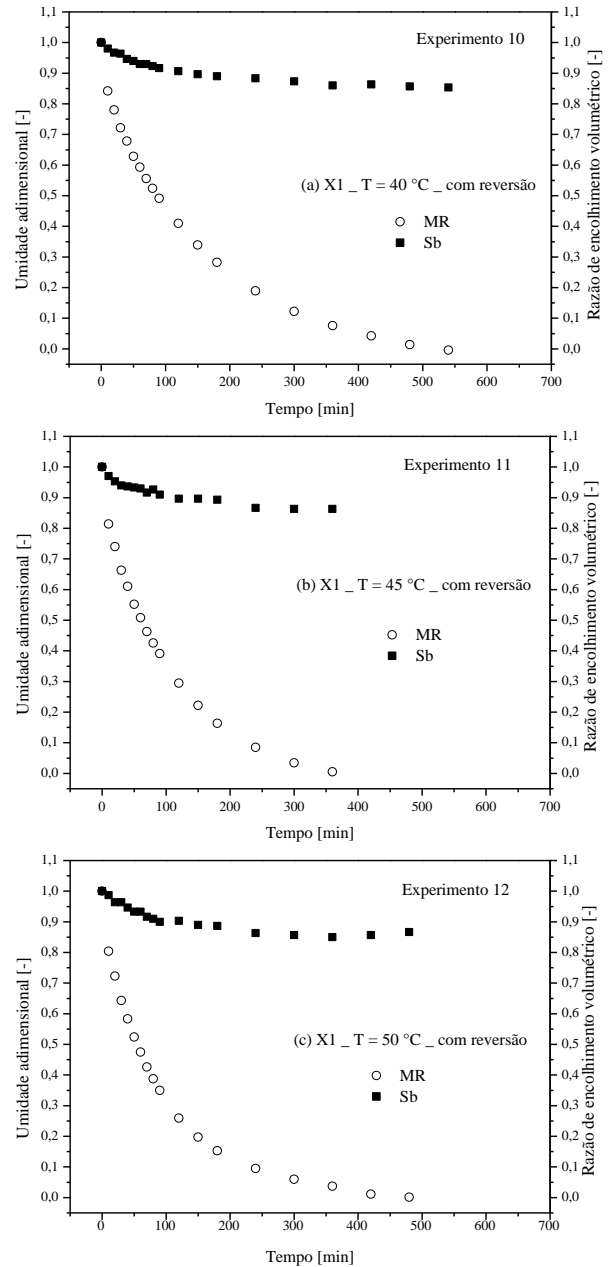
Nas Figuras 4.6 e 4.7, temos a dinâmica de encolhimento do leito de grãos de cevada, com umidade inicial X3, submetidos ao processo de secagem sem reversão e com reversão, respectivamente.

**Figura 4. 2:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X1 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios sem reversão do ar de secagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

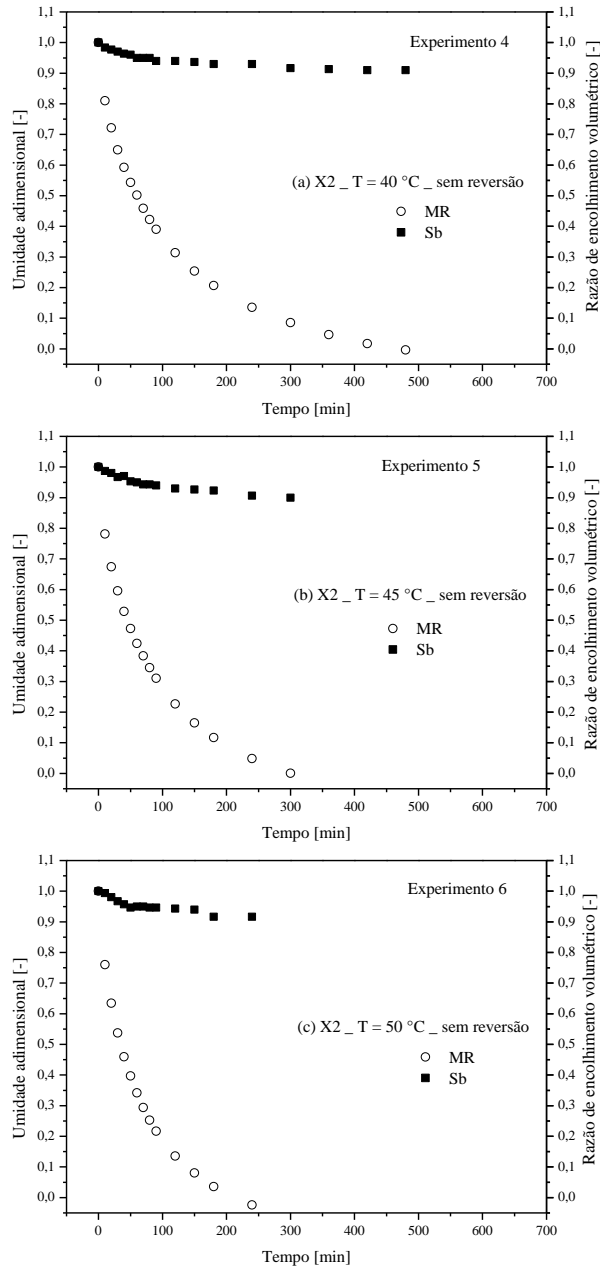
**Figura 4. 3:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X1 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios com reversão do ar de secagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

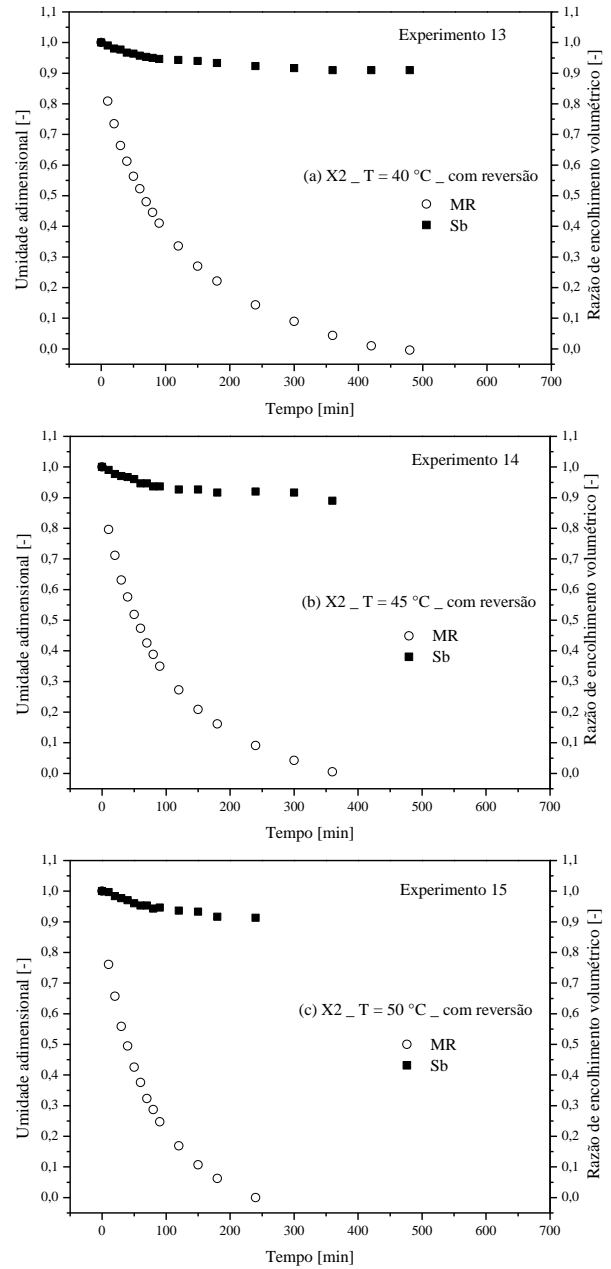


**Figura 4. 4:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X2 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios sem reversão do ar de secagem.



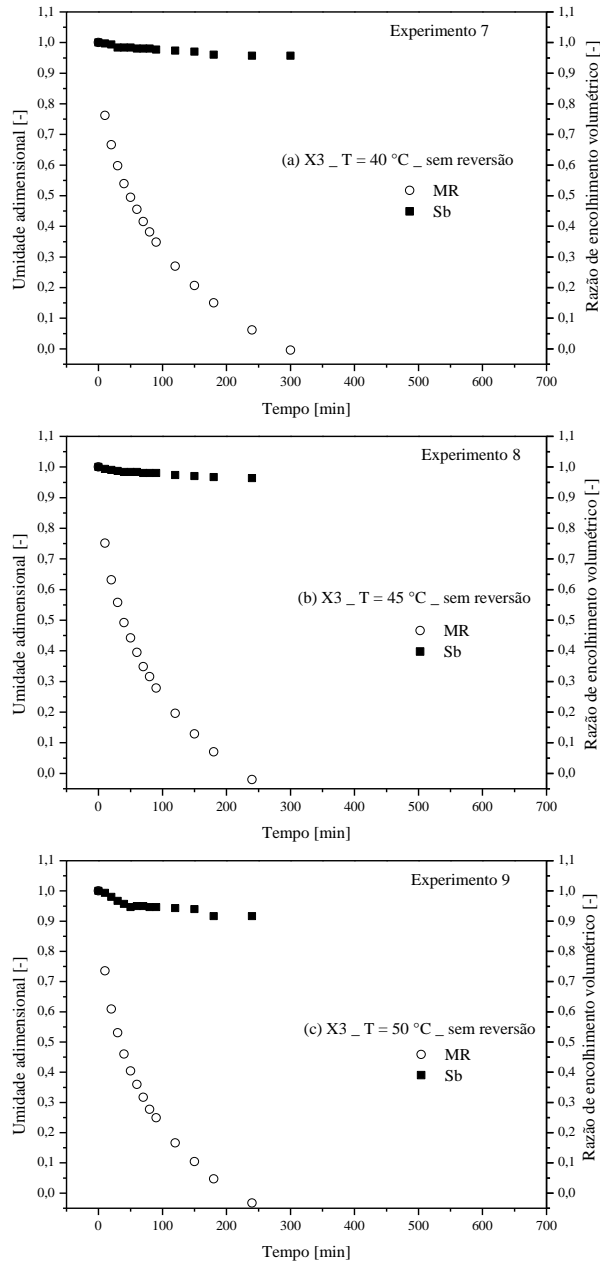
Fonte: Acervo Pessoal.

**Figura 4. 5:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X2 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios com reversão do ar de secagem.



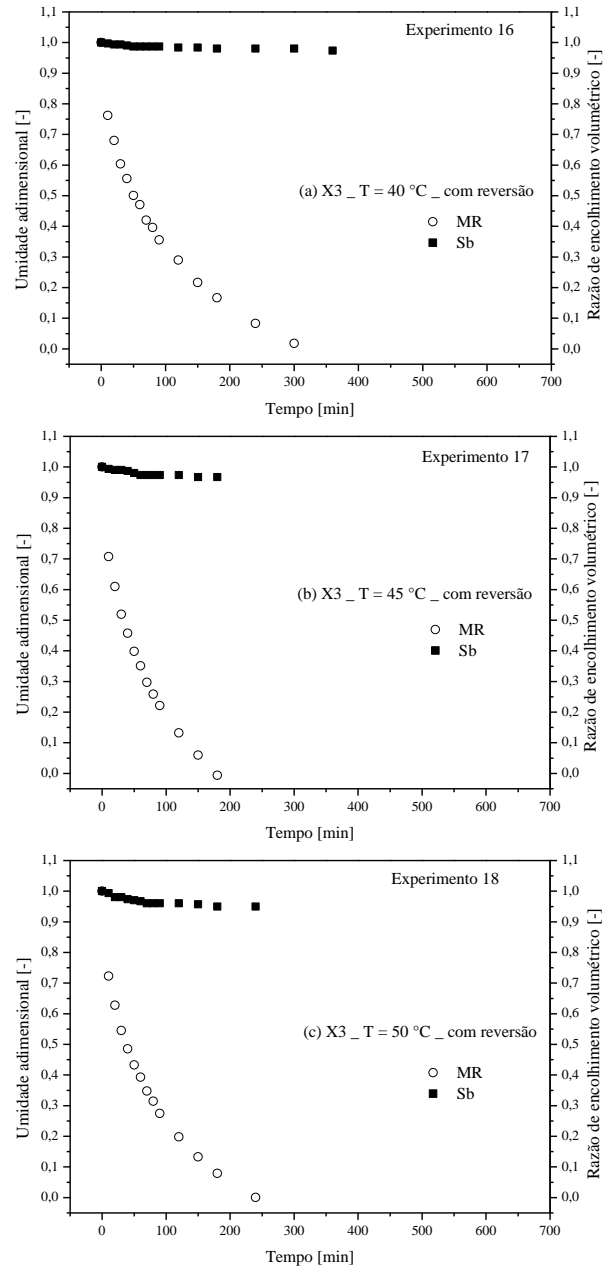
Fonte: Acervo Pessoal.

**Figura 4. 6:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X3 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios sem reversão do ar de secagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

**Figura 4. 7:** Umidade adimensional e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem para grãos de cevada, para umidade inicial X3 e temperatura do ar de secagem de: (a) 40 °C, (b) 45 °C e (c) 50 °C. Ensaios com reversão do ar de secagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios percentuais do encolhimento do leito de grãos de cevada ao final de cada processo de secagem, para os ensaios sem reversão e com reversão do escoamento do ar de secagem.

**Tabela 4. 3:** Percentual de encolhimento do leito.

Sem reversão do escoamento de ar			Com reversão do escoamento de ar		
Experimento [T(°C) – X <sub>0</sub> ]	% Encolhimento	Desvio	Experimento [T(°C) – X <sub>0</sub> ]	% Encolhimento	Desvio
1 [40 – X1]	13,2	0,2	10 [40 – X1]	14,3	0,5
2 [45 – X1]	13,3	1,4	11 [45 – X1]	13,7	0,0
3 [50 – X1]	14,2	1,6	12 [50 – X1]	13,3	0,0
4 [40 – X2]	9,5	0,7	13 [40 – X2]	9,0	0,0
5 [45 – X2]	9,9	0,2	14 [45 – X2]	10,0	1,4
6 [50 – X2]	8,7	0,5	15 [20 – X2]	8,7	0,0
7 [40 – X3]	4,0	0,5	16 [40 – X3]	3,3	0,9
8 [45 – X3]	3,7	0,0	17 [45 – X3]	3,5	0,2
9 [50 – X3]	4,3	0,5	18 [50 – X3]	5,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.4, são apresentados os dados percentuais de encolhimento do leito relacionando a umidade inicial dos grãos de cevada e a temperatura do ar de secagem. Observa-se que a umidade inicial do leito apresentou uma maior relevância ao encolhimento do leito do que a temperatura do ar de secagem. Os leitos com conteúdo de umidade maior (X1) tiveram um maior encolhimento do leito quando comparados com as outras umidades iniciais. Com relação a umidade inicial, os valores diferiram significativamente entre si em um nível de significância de 5 %. Já a temperatura, não apresentou influência nos dados, justificado pelo fato de que a diferença entre as temperaturas, 5 graus, não é uma diferença expressiva se pensarmos na escala absoluta de Kelvin. Os valores não diferiram significativamente entre si em um nível de significância de 5 %

**Tabela 4. 4:** Encolhimento do leito, em porcentagem.

Umidade inicial	T = 40 °C	T = 45°C	T = 50 °C
X1	13,8 ± 0,7a	13,5 ± 0,9a	13,7 ± 1,1a
X2	9,3 ± 0,5b	9,9 ± 0,8b	8,7 ± 0,3b
X3	3,7 ± 0,7c	3,6 ± 0,2c	4,7 ± 0,5c

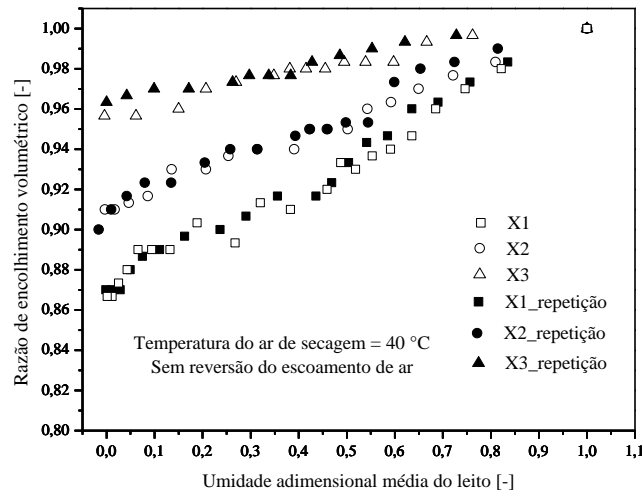
\*As médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que a umidade inicial do grão de cevada influencia diretamente a contração do volume do leito poroso durante a secagem, na Figura 4.8, são mostrados os

dados de razão de encolhimento volumétrico em função da umidade adimensional média do leito de grãos de cevada, para as umidades iniciais de X1, X2 e X3. Podemos observar que a contração do volume do leito de grãos de cevada apresenta uma dependência linear com a umidade adimensional média do leito.

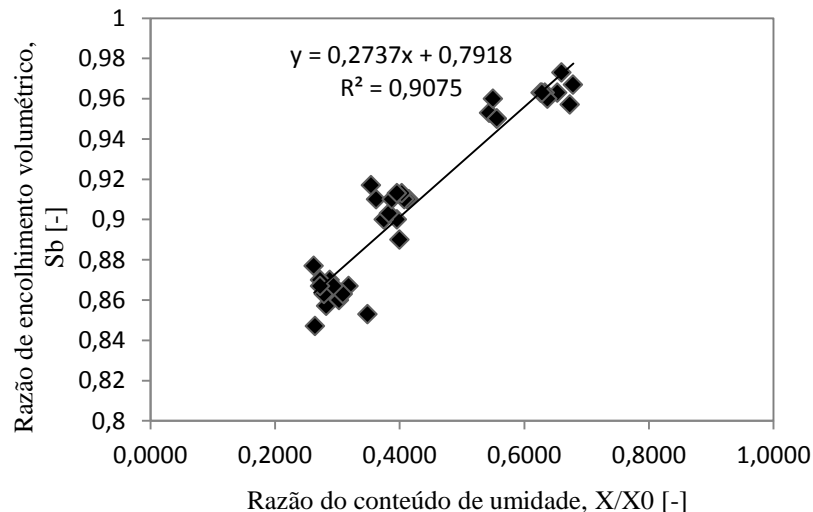
**Figura 4. 8:** Razão do encolhimento volumétrico em função da umidade adimensional média do leito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, na Figura 4.9, é mostrada a razão de encolhimento volumétrico em função da razão do conteúdo de umidade, na secagem de grãos de cevada em leito espesso, sem e com reversão do escoamento do ar de secagem. Uma regressão linear dos dados representa o encolhimento do leito em função do conteúdo de umidade.

**Figura 4. 9:** Razão de encolhimento volumétrico em função da razão do conteúdo de umidade, na secagem de grãos de cevada em leito espesso, sem e com reversão do escoamento do ar de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

---

Portanto, a Equação 78 foi utilizada na modelagem matemática do processo de secagem.

$$Sb = 0,2737(X(i)/X_0) + 0,7918 \quad (78)$$

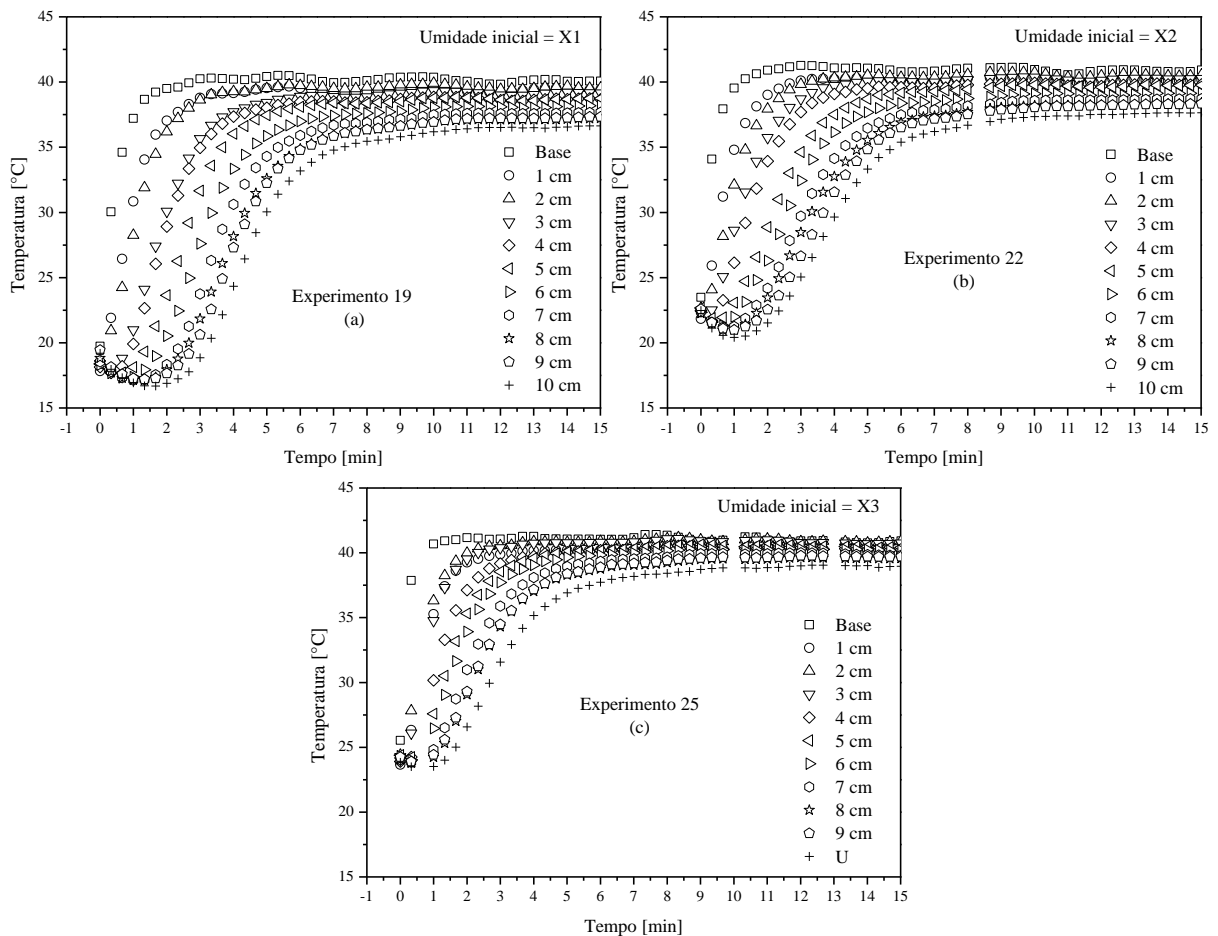
### 4.3 Determinação da distribuição da temperatura

Neste tópico é apresentada a distribuição de temperatura no leito de grãos de cevada para três temperaturas do ar de secagem, 40 °C, 45 °C e 50 °C, e três conteúdos de umidade inicial, X1, X2 e X3, seguindo a metodologia descrita anteriormente. Os experimentos foram realizados sem reversão do escoamento de ar (secagem convencional) e com reversão do escoamento do ar de secagem.

#### 4.3.1 Determinação da distribuição da temperatura sem reversão do ar de secagem

Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 encontram-se apresentados os resultados típicos de distribuição de temperatura em função do tempo obtidos para a velocidade do ar de secagem igual a 4,0 m/s e temperaturas de 40 °C, 45 °C e 50 °C, respectivamente, sem reversão do ar de secagem. Podemos ver nas Figuras 4.10 a 4.12 que as temperaturas do ar são superiores a 40 °C, 45 °C e 50 °C, respectivamente. Isso ocorre devido ao desvio médio das medições do termopar e à precisão do controlador de temperatura para manter essa temperatura (temperatura de set point). A temperatura do ar de secagem foi controlada entre  $\pm 0,5$  °C da temperatura de set point no controlador e permaneceu inalterada durante cada um dos processos de secagem.

**Figura 4.10:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 40$  °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

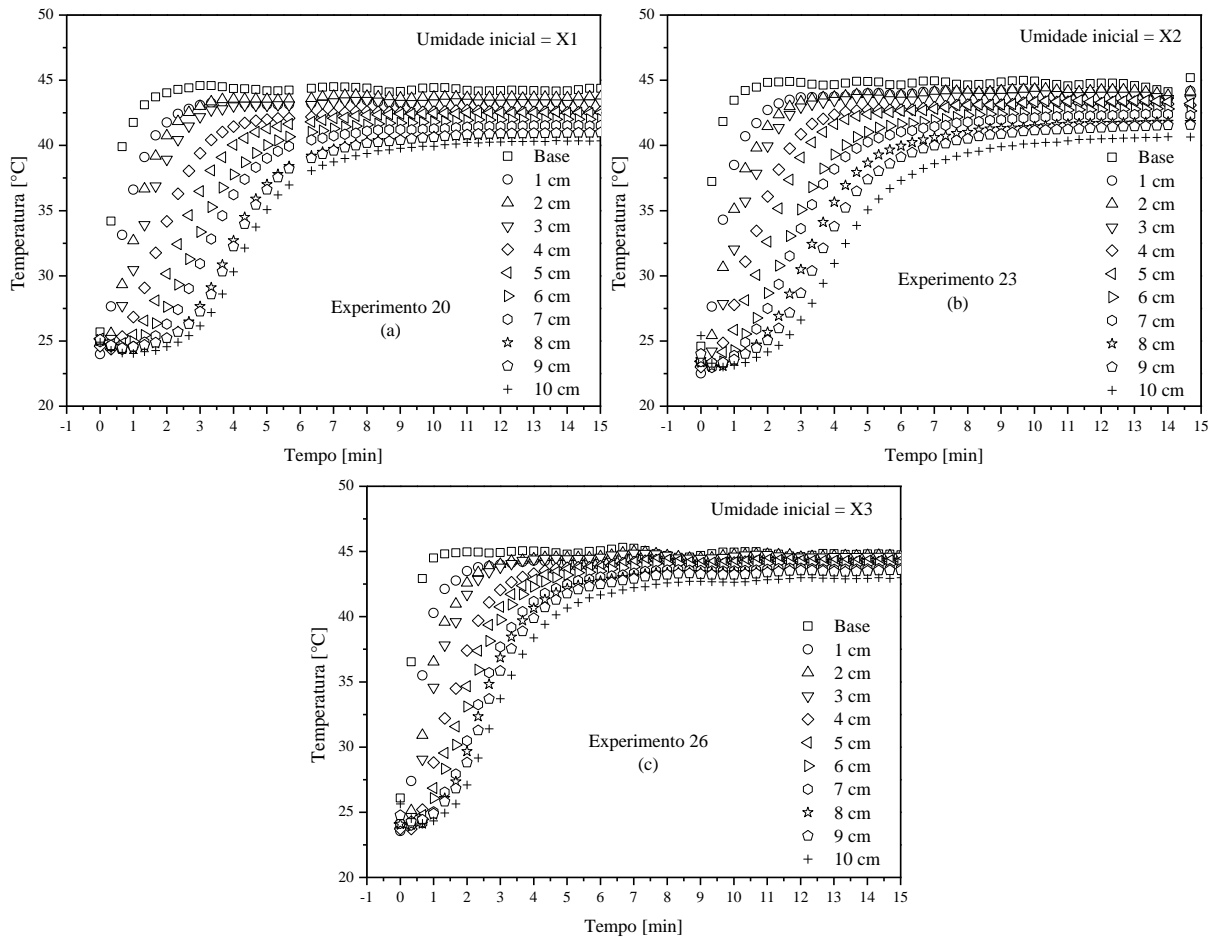
As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram a variação da temperatura do ar de secagem em relação ao tempo de processo para 10 diferentes alturas de leito. Em todas as curvas observa-se um incremento de temperatura, pois o leito estava inicialmente a uma temperatura ambiente e progressivamente este ar é substituído pelo ar quente. Vemos também que a temperatura não aumenta infinitamente, mas tende a temperatura do ar de entrada, atingindo o equilíbrio térmico.

Nas Figuras 4.10(a), 4.10(b) e 4.10(c) observa-se que para conteúdo de umidade inicial maior ( $X1 > X2 > X3$ ), maior é o gradiente de temperatura formado dentro do leito, o que também é observado para as Figuras 4.11 e 4.12. Para a Figura 4.10 (a) e 4.10 (c), as diferenças entre as temperaturas em 1 cm e 10 cm são de 4,2 °C (X1) e 2,4 °C (X3), respectivamente. Para as Figuras 4.11 (a) e 4.11 (c), as diferenças de temperatura são de 3,6 °C (X1) e 1,8 °C (X3) entre as posições em 1 e 10 cm, respectivamente; enquanto nas Figuras 4.12 (a) 4.12 (c) as diferenças são de 6,8 °C (X1) e 2,5 °C (X3), respectivamente. Isso se deve

ao fato que uma mesma quantidade de energia é fornecida ao leito, mas para os grãos com maior conteúdo de umidade inicial, uma maior quantidade de energia está sendo utilizada na forma de calor latente, para vaporizar a água contida no grão, de modo que menos energia fica disponível na forma de calor sensível para aquecer o material nas camadas seguintes. Assim, maiores tempos de secagem serão requeridos para que o topo atinja a condição de equilíbrio.

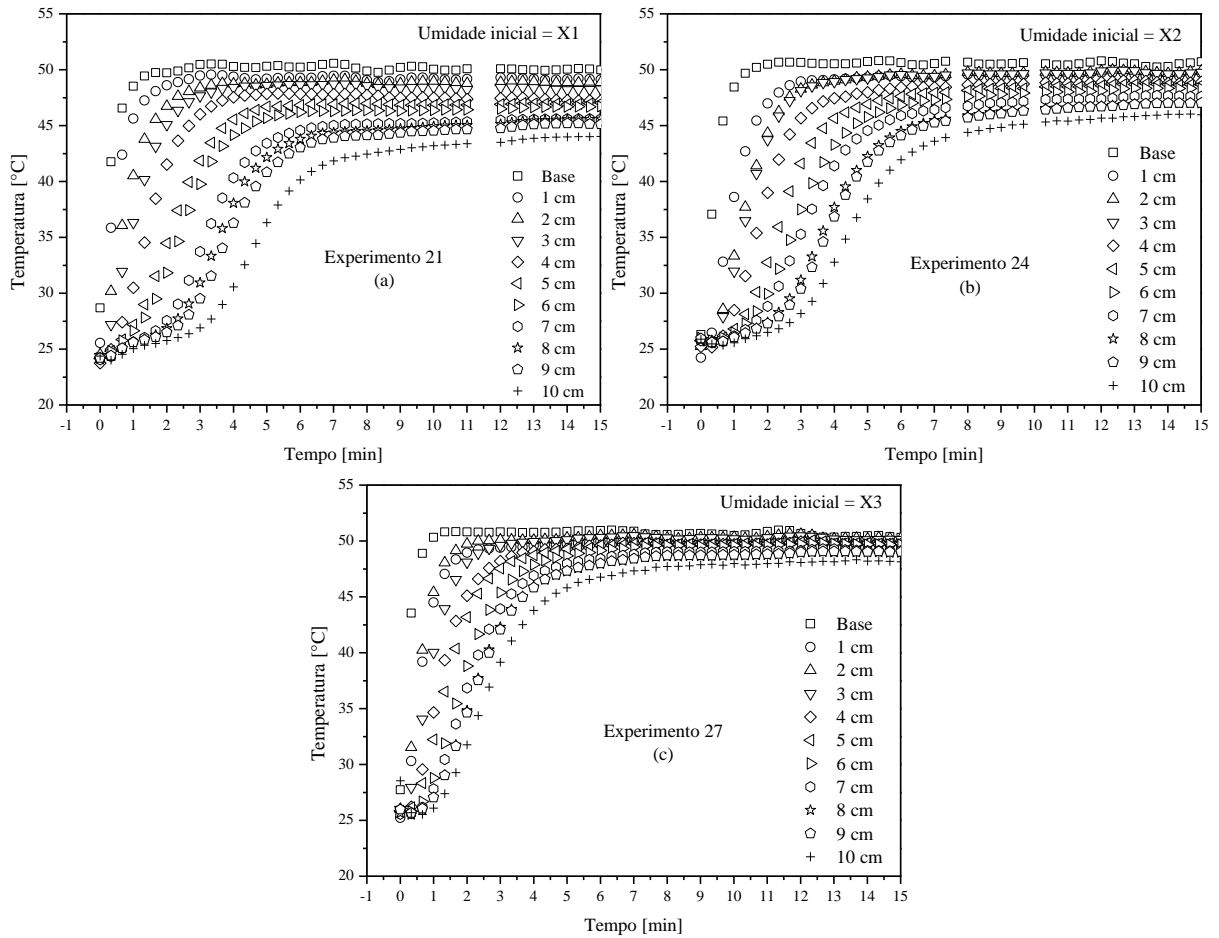
Com base nas Figuras 4.10 a 4.12, para quantificar essa diferença significativa entre as temperaturas nas posições 1 cm e 10 cm, foi calculada a diferença entre os valores de temperatura observados em 10 minutos do processo de secagem.

**Figura 4. 11:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 45$  °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.12:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 50$  °C : (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



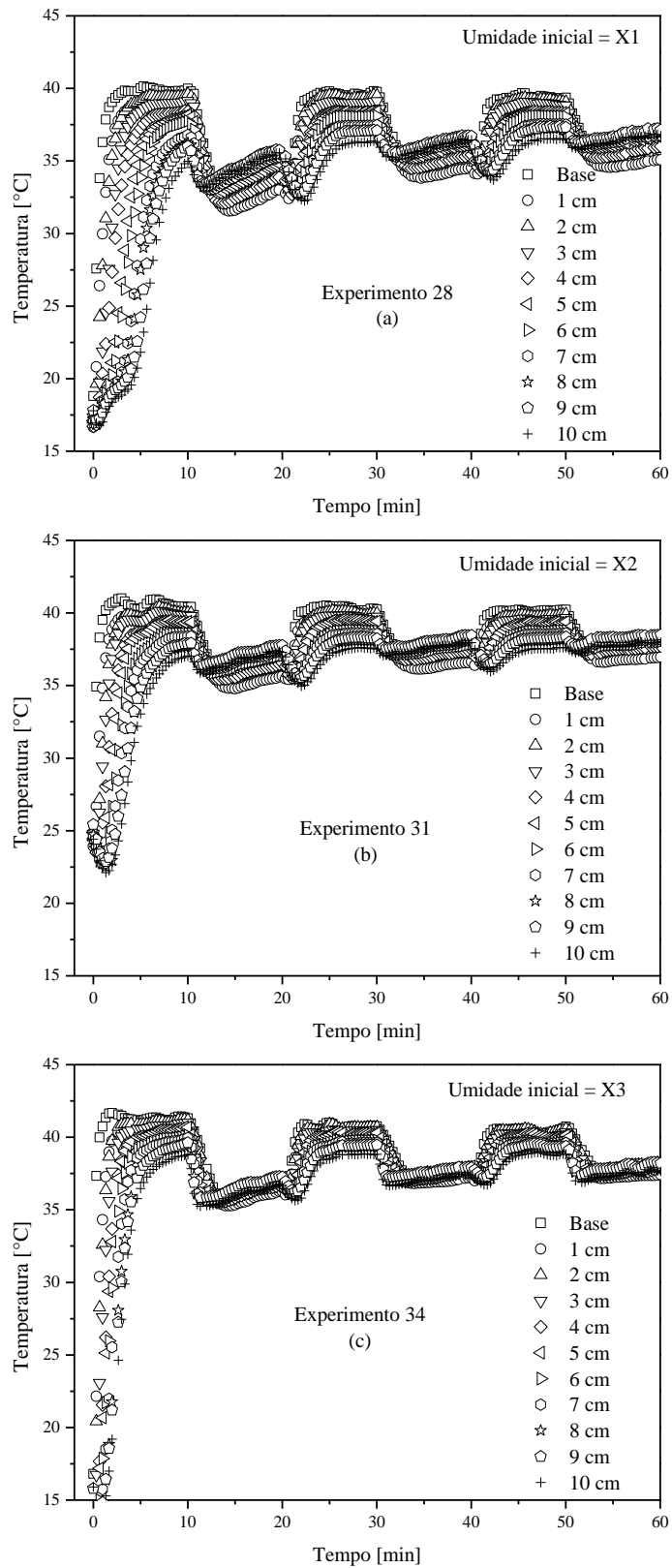
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.2 Determinação da distribuição da temperatura com reversão do ar de secagem

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentados os resultados típicos de distribuição de temperatura em função do tempo obtidos para a velocidade do ar igual a 4,0 m/s e temperaturas de 40 °C, 45 °C e 50 °C, respectivamente, com reversão do ar de secagem. O comportamento descrito anteriormente, para a formação de gradientes de temperatura nos experimentos sem reversão do ar de secagem também é observado para os experimentos com reversão do ar de secagem. Mas ao realizar a reversão do ar de secagem favorecemos a transferência de calor no leito, pois o ar de secagem é direcionado tanto na base (ascendente) como no topo (descendente) de maneira alternada, fazendo com que a energia fornecida pelo ar de secagem que é utilizada na forma de calor latente e calor sensível seja mais bem distribuída no interior do leito. Consequentemente, os gradientes de temperatura são menores em comparação aos experimentos sem reversão do escoamento do ar.

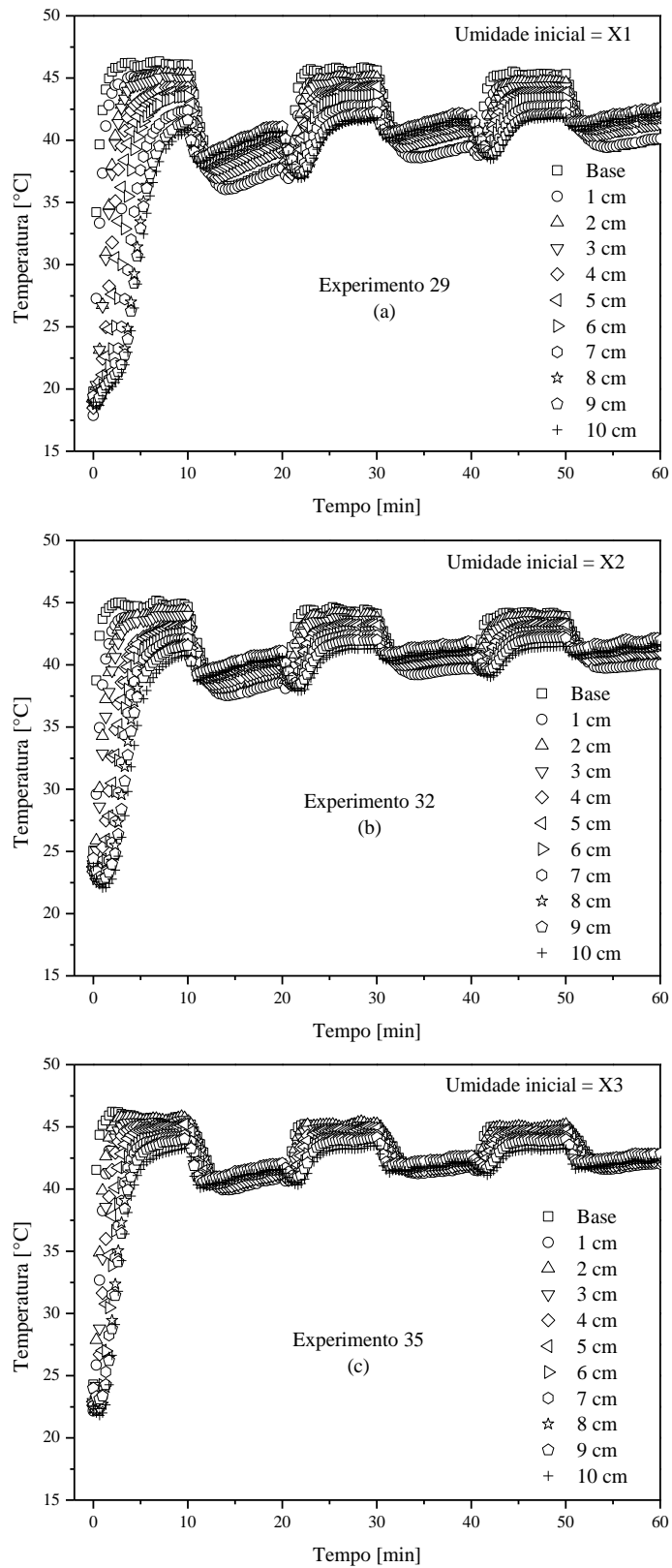


**Figura 4. 13:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 40$  °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



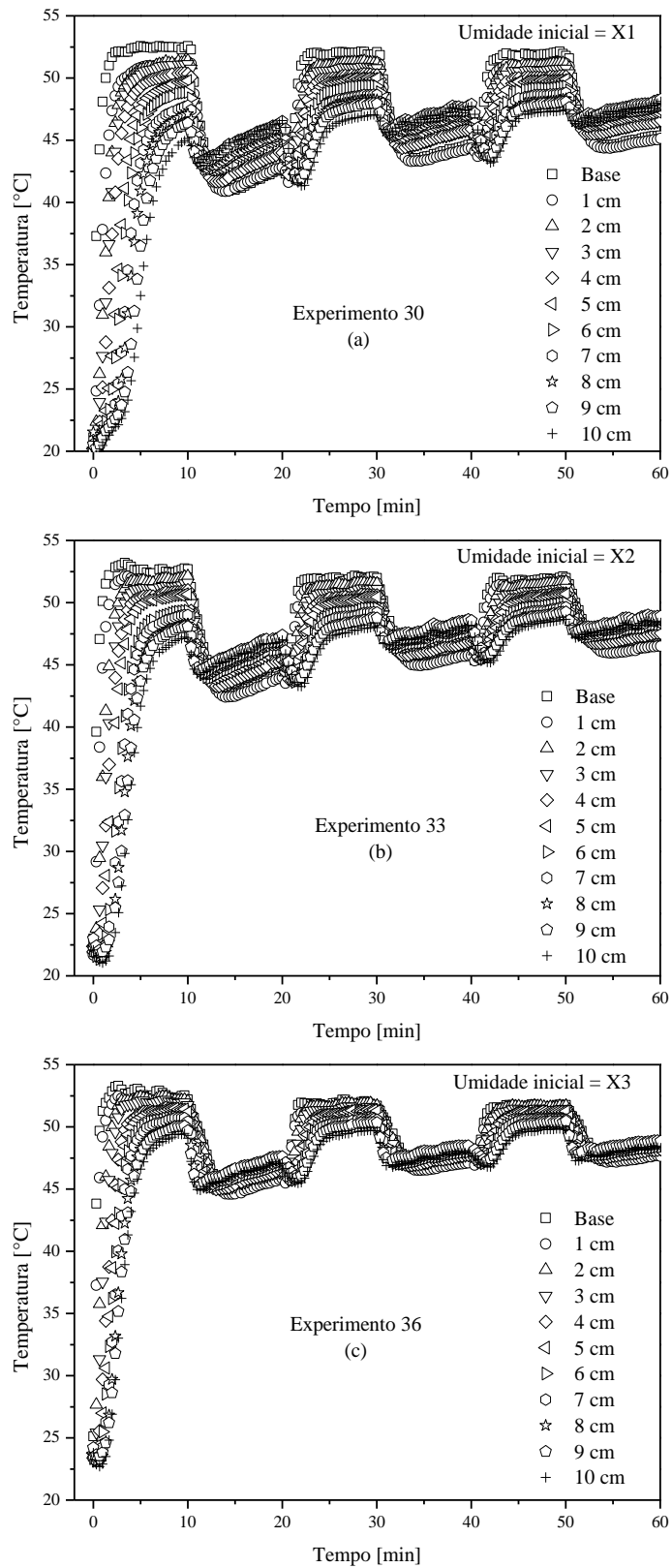
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 14:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 45$  °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 15:** Distribuição de temperatura em função do tempo para o leito constituído com grãos de cevada e percolado com ar reverso de secagem a  $v = 4,0$  m/s e  $T = 50$  °C: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observamos nas Figuras 4.13 a 4.15, que quando o escoamento é ascendente, as temperaturas podem ser superiores a 40 °C, 45 °C e 50 °C, respectivamente. Isso ocorre, como mencionado anteriormente para os experimentos sem reversão, devido à calibração dos termopares e à precisão do controlador de temperatura para manter a temperatura de set point. Enquanto que quando ocorre a reversão do ar de secagem, escoamento descendente, os valores da temperatura do ar de secagem são inferiores às temperaturas de set point, pois o ar de secagem percorre uma tubulação de ferro de 2,0 m de comprimento para atingir a célula de secagem na direção descendente. Toda a tubulação do equipamento está isolada termicamente, mesmo assim ocorre a perda de calor. Assim, conforme o processo de secagem vai ocorrendo, as temperaturas tendem ao equilíbrio térmico, porém uma diferença entre as temperaturas do escoamento ascendente e o escoamento descendente continua a existir devido à estrutura do equipamento.

#### **4.4 Determinação da distribuição de umidade**

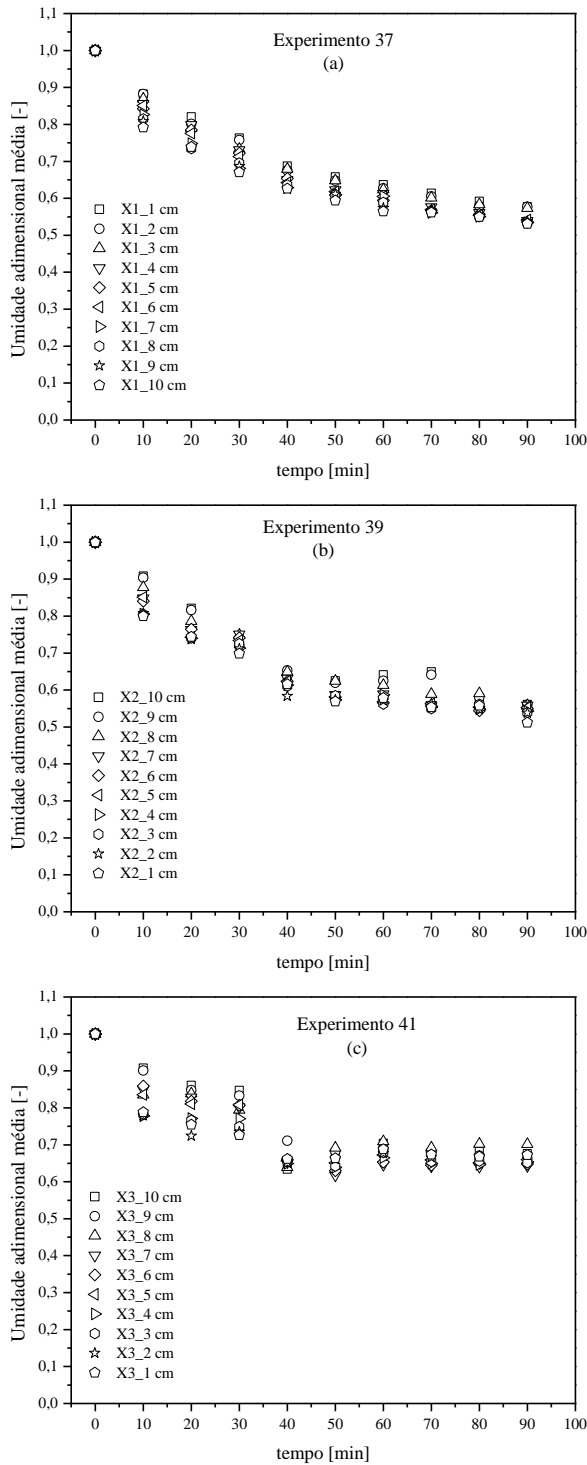
Neste tópico é apresentada a distribuição de umidade no leito de grãos de cevada para duas temperaturas do ar de secagem, 40 °C e 50 °C, e três conteúdos de umidade inicial, X1, X2 e X3, seguindo a metodologia descrita na seção Material e Métodos. Os experimentos foram realizados sem reversão do escoamento de ar (secagem convencional) e com reversão do escoamento do ar de secagem.

##### **4.4.1 Determinação da distribuição de umidade sem reversão do ar de secagem**

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os valores de umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as posições do leito, na temperatura do ar de secagem de 40 °C e 50 °C e velocidade do ar de 4,0 m/s, para experimentos sem reversão do escoamento do ar, respectivamente. Podemos observar a variação da umidade nas diferentes posições axiais do leito, confirmando a formação de gradientes de umidade durante o processo de secagem de grãos de cevada no secador de leito fixo.

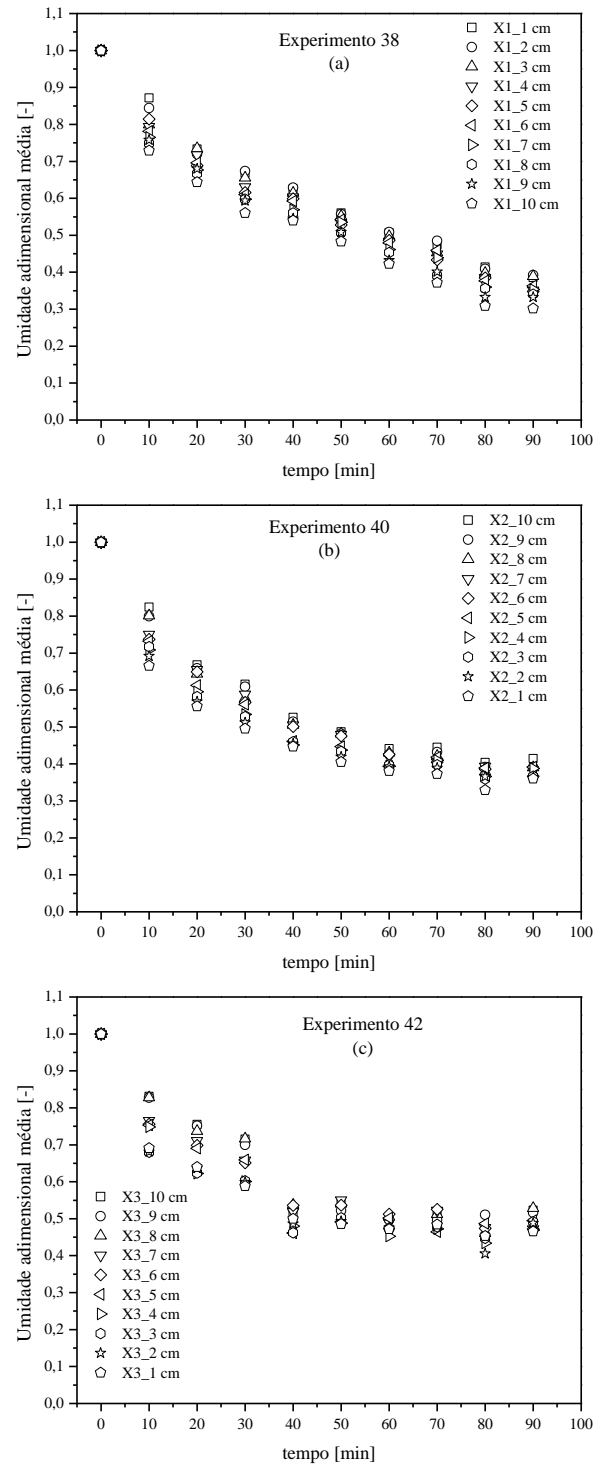
A variação entre os valores da umidade adimensional média para X1, entre as posições 1 cm e 10 cm, após 90 minutos, foi de 0,53 a 0,58 para  $T = 40\text{ °C}$  e de 0,30 a 0,39 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.16 (a) e Figura 4.17(a).

**Figura 4. 16:** Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, sem reversão do escoamento de ar de secagem, para  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 17:** Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, sem reversão do escoamento de ar de secagem, para  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a umidade inicial X2, a variação da umidade adimensional média entre a base (1 cm) e o topo (10 cm) do leito, após 90 minutos, foi de 0,51 a 0,56 para  $T = 40\text{ °C}$  e 0,36 a 0,41 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.16 (b) e Figura 4.17 (c).

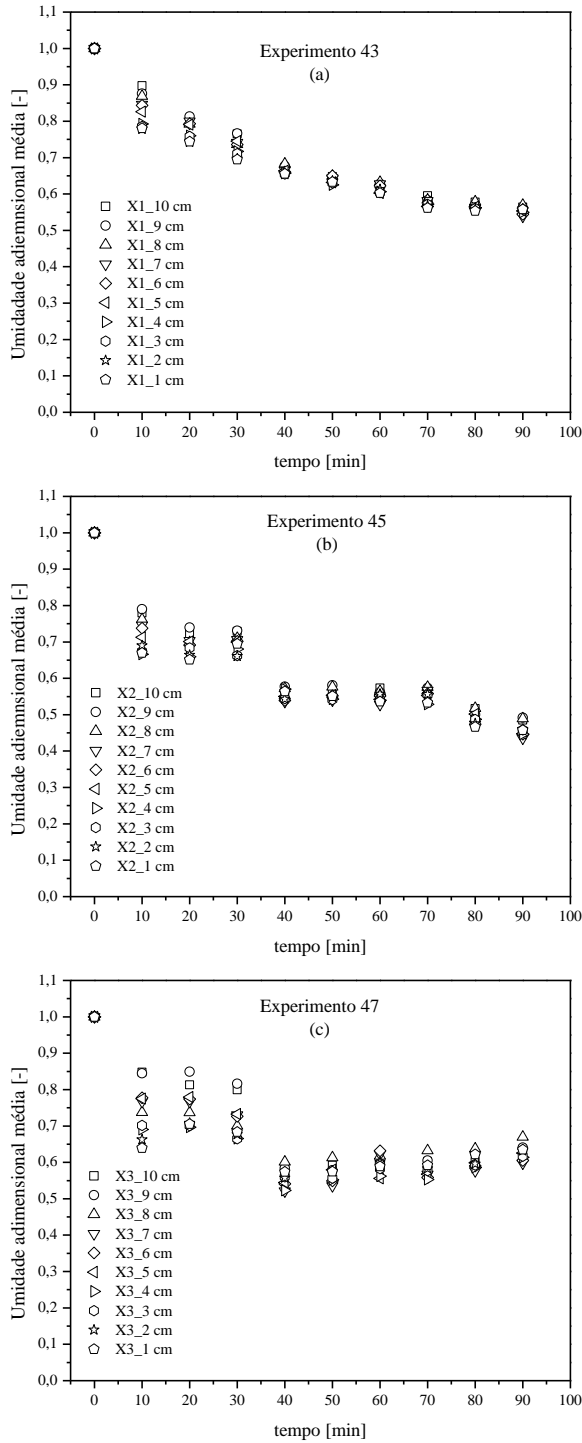
Para umidade inicial X3, a variação foi de 0,67 a 0,68 para  $T = 40\text{ °C}$  e 0,47 a 0,52 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.16 (c) e Figura 4.17 (c).

#### 4.4.2 Determinação da distribuição de umidade com reversão do ar de secagem

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são mostrados os perfis de umidade adimensional para os experimentos com reversão do escoamento do ar de secagem, para as temperaturas do ar de secagem de  $40\text{ °C}$  e  $50\text{ °C}$  e velocidade do ar de  $4,0\text{ m/s}$ , respectivamente. Como descrito anteriormente, as reversões do escoamento do ar de secagem foram realizadas a cada 10 minutos.

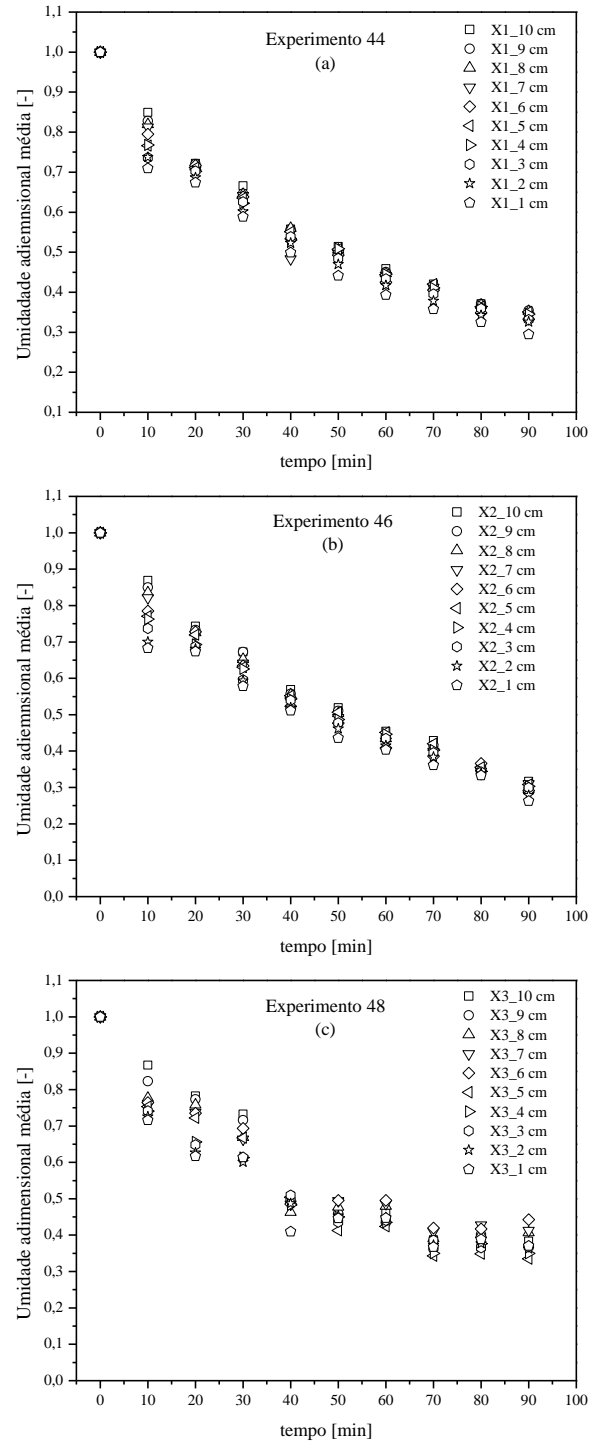
Para a umidade inicial X1, a variação da umidade adimensional média entre a base (1 cm) e o topo (10 cm) do leito, após 90 minutos, foi de 0,56 a 0,56 para  $T = 40\text{ °C}$ , ou seja, não houve variação, e 0,29 a 0,34 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.18 (a) e Figura 4.19 (a). Para umidade inicial X2, a variação foi de 0,46 a 0,48 para  $T = 40\text{ °C}$  e 0,26 a 0,32 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.18 (b) e Figura 4.19 (b). Já para umidade inicial X3, a variação foi de 0,64 a 0,63 para  $T = 40\text{ °C}$  e 0,37 a 0,38 para  $T = 50\text{ °C}$ , respectivamente, Figura 4.18 (c) e Figura 4.19 (c).

**Figura 4. 18:** Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, com reversão do escoamento de ar de secagem, para  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 19:** Umidade adimensional dos grãos de cevada no decorrer do tempo para as diferentes posições do leito, com reversão do escoamento de ar de secagem, para  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.

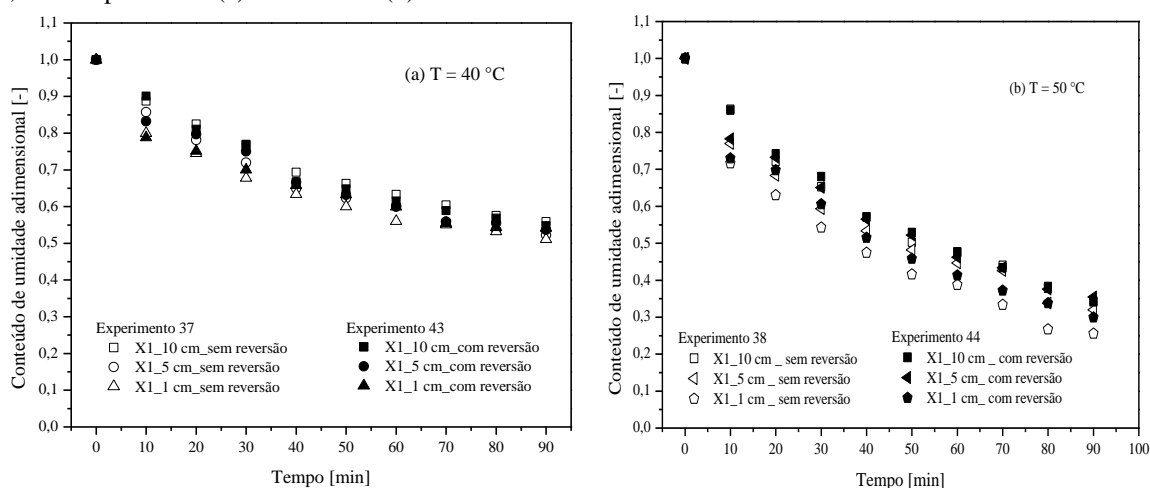


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.20 (a) e (b) estão apresentados os valores de umidade adimensional média para as temperaturas de 40 °C e 50 °C, respectivamente, comparando os dados para os experimentos sem e com reversão do escoamento do ar de secagem. Podemos notar que ao fazer a reversão do ar de secagem os gradientes de umidade diminuíram. Para temperatura de 40 °C, Figura 4.20 (a), ao realizar a reversão do escoamento do ar, a diferença entre a umidade adimensional média entre a base (1 cm) e o topo (10 cm), que antes era de 0,05, reduziu para zero. Já para a temperatura de 50 °C, a diferença entre a base e o topo, sem reversão, era de 0,09 e com reversão reduziu para 0,05.

Isso se deve ao fato de que, ao realizar a secagem sem reversão do escoamento de ar, a zona de secagem é estabelecida de maneira ascendente, acompanhando o escoamento do ar. No entanto, quando se faz a reversão do escoamento do ar de secagem, uma zona de secagem descendente é estabelecida. Estas zonas de secagem alternadas que se formam com as reversões proporcionam uma secagem mais uniforme, pois reduzem o gradiente de umidade no leito. Comportamento semelhante foi descrito por Ruiz-López et al. (2008), no estudo da secagem de cenoura em leito fixo com e sem reversão do escoamento de ar.

**Figura 4. 20:** Comparando os valores dos experimentos com e sem reversão do escoamento para umidade inicial X1, nas temperaturas: (a) T = 40 °C e (b) T = 50 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

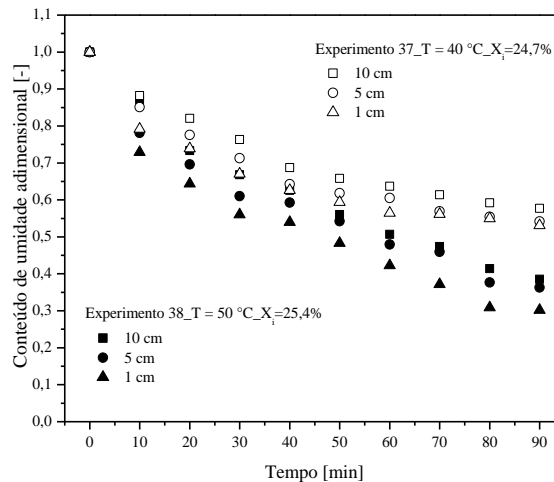
#### 4.5 Heterogeneidade no processo de secagem em camada espessa

A Figura 4.21 mostra uma comparação entre os valores de conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem em diferentes posições axiais (1 cm, 5 cm e 10 cm) para os experimentos 37 e 38. Ambos os experimentos iniciaram com umidade



de X1 e diferem na temperatura do ar de secagem, o experimento 37 utilizou  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o experimento 38 utilizou  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 4. 21:** Conteúdo de umidade adimensional versus tempo de secagem para grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo (1, 5 e 10 cm) para os experimentos 37 e 38.

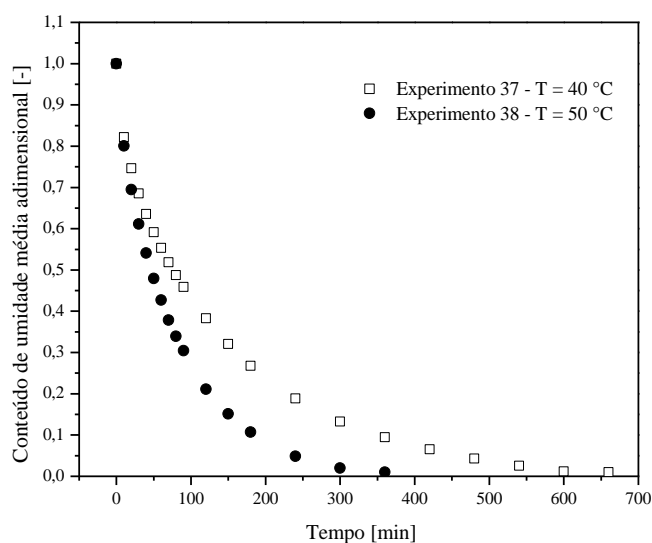


Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o conteúdo de umidade tenha sido medido em 10 camadas, os dados de apenas três camadas são mostrados na Figura 4.21 por uma questão de clareza. Para ambos os experimentos, o conteúdo de umidade adimensional varia ao longo da posição axial e mostra evidências de que os gradientes de umidade são desenvolvidos durante a secagem e como variam ao se comparar a temperatura. Padrões semelhantes foram observados para as outras condições testadas.

O efeito da temperatura do ar na secagem dos grãos de cevada pode ser observado na Figura 4.22. O aumento da temperatura do ar de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  levou a tempos mais curtos para atingir um determinado conteúdo de umidade porque a capacidade térmica do ar é aumentada e as taxas de transferência de massa aumentam (CLEMENTE et al., 2014).

**Figura 4. 22:** Conteúdo de umidade adimensional médio versus tempo de secagem para grãos de cevada nos Experimentos 37 e 38.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado anteriormente, uma distribuição de temperatura do ar não uniforme é estabelecida no leito, levando a uma distribuição de umidade não uniforme e, conseqüentemente, a um processo de secagem heterogêneo. A Tabela 4.5 mostra as taxas de secagem dos grãos de cevada nas alturas de 1 cm (na base do leito) e 10 cm (no topo do leito), obtidas dos experimentos 37 - 42. A taxa de secagem foi calculada em pontos percentuais por hora (pp.h<sup>-1</sup>), que é a diferença entre as porcentagens do conteúdo de umidade após 1 hora. Uma queda significativa na taxa de secagem é observada da base (1 cm) para o topo (10 cm) do leito, confirmando que o potencial de secagem diminui ao longo das diferentes posições axiais.

**Tabela 4. 5:** Taxa de secagem dos grãos de cevada para diferentes posições axiais do leito fixo após 60 minutos.

Experimento [T (°C) – Umidade inicial]	Taxa de secagem (pp.h <sup>-1</sup> )	
	Posição axial do leito	
	1 cm	10 cm
37 [40 – X1]	10,64	8,87
39 [40 – X2]	6,74	5,74
41 [40 – X3]	2,20	2,09
38 [50 – X1]	16,11	13,78
40 [50 – X2]	10,48	9,45
42 [50 – X3]	3,94	3,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferenças entre as taxas de secagem das posições 1 cm e 10 cm foram de 1,77 pp.h<sup>-1</sup> e 2,33 pp.h<sup>-1</sup> para os experimentos 37 e 38, respectivamente. A queda nas taxas

de secagem leva aos gradientes de umidade observados na Figura 4.21 nos Experimentos 37 e 38 e leva a um conteúdo de umidade heterogêneo ao longo do leito.

Para minimizar os gradientes de umidade, experimentos com reversão do escoamento do ar foram realizados alterando periodicamente a direção do escoamento do ar em intervalos de 10 minutos. Este período foi utilizado com base nos valores de temperatura versus tempo de secagem, Figuras 4.10 a 4.12, onde após 10 minutos, os valores da temperatura do ar tendem à temperatura do ar de entrada, atingindo o equilíbrio térmico. A Tabela 4.6 mostra as taxas de secagem obtidas em diferentes posições axiais nestes experimentos.

**Tabela 4. 6:** Taxa de secagem dos grãos de cevada para diferentes posições axiais do leito fixo, com reversão do ar de secagem a cada 10 minutos, após 60 minutos.

Experimento [T (°C) – Umidade inicial]	Taxa de secagem (pp.h <sup>-1</sup> )	
	Posição axial do leito	
	1 cm	10 cm
43 [40 – X1]	9,69	9,31
45 [40 – X2]	6,87	6,32
47 [40 – X3]	2,37	2,34
44 [50 – X1]	13,92	12,41
46 [50 – X2]	8,72	7,98
48 [50 – X3]	3,08	3,00

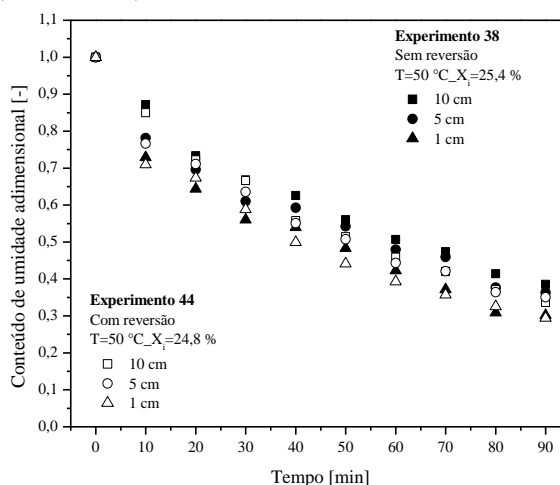
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferenças menores entre as taxas de secagem nas posições axiais 1 e 10 cm são observadas aplicando a reversão do fluxo de ar em comparação com o escoamento de ar convencional. Os dados dos experimentos 47 e 48, que tinham grãos de cevada com um baixo conteúdo de umidade inicial (X3), não mostraram diferenças significativas nas taxas de secagem para as diferentes posições.

Entre os testes com escoamento de ar convencional, a maior diferença, igual a 2,33 pp.h<sup>-1</sup>, foi observada para o Experimento 38, e entre os experimentos com reversão de fluxo de ar, foi observado para o Experimento 44 e foi igual a 1,51 pp.h<sup>-1</sup>. Os dados mostram que, quando a reversão do escoamento de ar é aplicada, as diferenças entre as taxas de secagem da base e do topo diminuem para 35,2%.

A Figura 4.23 mostra os dados do conteúdo de umidade adimensional em função do tempo de secagem para os experimentos 38 e 44, que foram realizados com o mesmo conteúdo de umidade inicial (X1) e temperatura do ar de secagem (T = 50 °C), mas o experimento 44 foi realizado com reversões, a cada 10 minutos, do escoamento do ar de secagem.

**Figura 4. 23:** Conteúdo de umidade adimensional versus tempo de secagem para grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo (1, 5 e 10 cm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora os resultados mostrem que as taxas de secagem diminuíram usando a reversão do fluxo de ar, pela Figura 4.23 observamos um comportamento semelhante entre os experimentos.

A Tabela 4.7 mostra o conteúdo de umidade dos grãos de cevada após a secagem por 90 min. Os valores foram medidos nas posições de 1 e 10 cm.

**Tabela 4. 7:** Conteúdo de umidade (% b.u.) dos grãos de cevada em diferentes posições axiais do leito fixo após secagem por 90 minutos.

Experimento [ $X_0$ ]	Temperatura	Conteúdo de umidade (% b.u.)	
		Posição axial do leito	
		1 cm	10 cm
<b>Sem reversão</b>			
37 [X1]	40 °C	13,9	15,6
39 [X2]		12,1	12,9
41 [X3]		10,0	10,4
38 [X1]	50 °C	17,3	18,1
40 [X2]		13,9	14,5
42 [X3]		11,4	11,4
<b>Com reversão</b>			
43 [X1]	40 °C	14,1	14,8
45 [X2]		12,4	13,0
47 [X3]		10,7	10,8
44 [X1]	50 °C	18,2	18,3
46 [X2]		14,8	15,0
48 [X3]		11,3	11,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma comparação entre as condições operacionais confirma a redução nos gradientes de umidade observados com a reversão do escoamento de ar. Isto é explicado

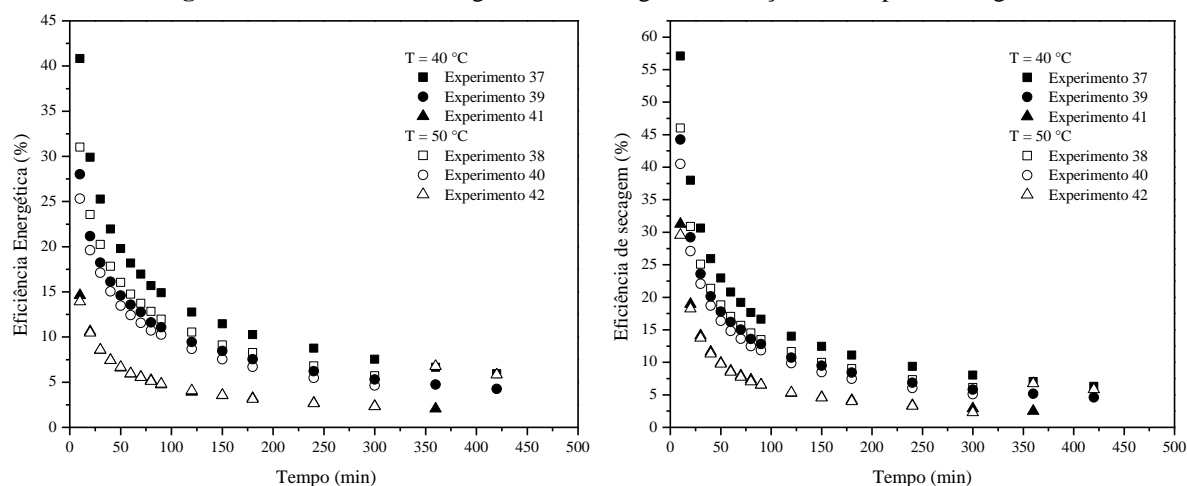
porque num escoamento convencional (Experimentos 37 a 42), a frente de secagem é estabelecida apenas no sentido ascendente, enquanto que com uma reversão do escoamento de ar periódica (Experimentos 43 a 48), a frente de secagem é alternada de cima para baixo. Aqui, a interface entre os grãos secos e aqueles que estão em processo de secagem ou esperando para secar é chamada de frente de secagem. Os grãos localizados próximos da fonte de ar aquecido secam mais rapidamente do que os localizados mais longe. Consequentemente, um processo de secagem mais homogêneo é alcançado na condição de secagem com reversão do escoamento de ar.

De acordo com a Tabela 4.7, após secagem por 90 min, as diferenças máxima e mínima no conteúdo de umidade entre as camadas superior e inferior na secagem convencional (sem reversão) são iguais a 12,2% (Experimento 37) e 4,0% (Experimento 41) para  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 4,6% (Experimento 38) e 0,0 % (Experimento 42) para  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na secagem com reversão do escoamento de ar, as diferenças máxima e mínima caem para 4,9% (Experimento 43) e 0,9% (Experimento 47) para  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e para 0,5% (Experimento 44) e 0,0% (Experimento 48) para  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Com um baixo conteúdo de umidade inicial (X3), não foram observadas diferenças nos níveis de umidade das camadas superior e inferior, pois o tempo de secagem foi longo o suficiente para atingir o conteúdo de umidade de equilíbrio. No entanto, nos experimentos com um alto conteúdo de umidade inicial (X1 e X2), alterar a direção do escoamento do ar foi eficaz para diminuir o conteúdo de umidade dos grãos nas camadas superiores.

#### 4.5.1 Eficiência energética e de secagem

A Figura 4.24 mostra a eficiência energética e de secagem em função do tempo, para os experimentos 37 a 42. Os resultados para as outras condições não são mostrados porque eles apresentaram essencialmente o mesmo comportamento. As eficiências de energia e secagem diminuem à medida que o tempo de secagem aumenta. Os menores valores para eficiência energética e de secagem são obtidos a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , considerando o mesmo período de secagem. Isso ocorre porque a energia térmica fornecida ao secador aumenta à medida que a temperatura do ar aumenta, mas a quantidade de energia usada para aquecer o produto e evaporar a umidade é a mesma. Assim, com base nas Equações 66 e 67, aumentar a entrada de energia total no denominador diminuirá as eficiências de energia e secagem.

**Figura 4. 24:** Eficiência energética e de secagem em função do tempo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A energia fornecida ao sistema é usada para aquecer o sólido e evaporar a umidade que não está fortemente ligada à estrutura do sólido (MAIA et al., 2016). Na secagem de grãos com um baixo conteúdo inicial de umidade ( $X_0 = 13,4$  % b.u. – X3), não são observadas diferenças significativas entre as eficiências a 40 °C e 50 °C (Experimentos 41 e 42). Isto é explicado pelo fato de que, quanto menor a quantidade de água no grão, mais ligada ela está, conseqüentemente, mais energia tem que ser consumida para aquecer os grãos e dissociar fisicamente a água. Devido a esses fatores, valores mais altos de eficiência de secagem e energia são observados nos estágios iniciais da secagem.

Na secagem de materiais agrícolas com um alto conteúdo de umidade inicial, a maior parte da energia fornecida ao sistema é usada para evaporar a água que não está fortemente ligada à estrutura do grão. Quando o conteúdo de umidade é reduzido a valores próximos à umidade de equilíbrio, sua remoção torna-se cada vez mais difícil porque a água remanescente está intimamente associada à estrutura porosa. Portanto, um tempo adicional é necessário para remover essa umidade residual, o que pode ser a razão para a baixa eficiência energética e de secagem observadas nos estágios finais de secagem. Estes resultados são confirmados por outros estudos sobre a secagem de vários produtos agrícolas (MOTEBALI et al., 2014; BRITO et al., 2017; TOHIDI et al., 2017).

Em operações comerciais, a secagem é realizada até atingir um determinado conteúdo de umidade, fazendo com que diferentes tempos de secagem sejam adotados para diferentes temperaturas do ar e umidade inicial. A faixa de umidade recomendada para armazenamento de grãos de cevada é 11-12% (base úmida) (KUNZE, 2004). A Tabela 4.8

mostra o conteúdo de umidade final e as eficiências de secagem (DE) estimadas pela Equação 66 para os experimentos 37 a 48.

**Tabela 4. 8:** Eficiência de secagem estimada para conteúdo de umidade final pré-estabelecido.

Secagem convencional				Secagem com reversão			
Experimento	T (°C)	X <sub>f</sub> (% b.u.)	DE (%)	Experimento	T (°C)	X <sub>f</sub> (% b.u.)	DE (%)
37		11,8	8,0	43		11,6	8,0
39	40	11,5	8,4	45	40	12,2	9,0
41		11,6	14,1	47		11,6	15,2
38		11,5	10,0	44		11,7	8,5
40	50	11,3	12,5	46	50	11,5	8,8
42		11,5	18,2	48		11,6	17,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados na Tabela 4.8 indicam que os valores de eficiência de secagem para atingir o conteúdo final de umidade foram superiores para 50 °C em comparação com a secagem a 40 °C. Este resultado opõe-se ao mostrado na Figura 4.24, em que as maiores eficiências de secagem foram encontradas a 40 °C. Isso porque, na Figura 4.24, o tempo de secagem considerado na análise foi o mesmo para todas as condições. Mas com relação ao efeito da temperatura, devido aos tempos mais curtos necessários para atingir o conteúdo de umidade especificado, as maiores eficiências de secagem foram encontradas a 50 °C nos experimentos com escoamento de ar convencional.

As eficiências de secagem na Tabela 4.8 indicam que a diminuição do conteúdo de umidade inicial aumenta a eficiência. A maior eficiência de secagem, igual a 18,2%, foi encontrada a 50 °C e  $X_0 = 13,4\%$  (b.u.) (Experimento 42), enquanto a menor, igual a 8,0%, foi observada a 40 °C e  $X_0 = 24,7\%$  (b.u.) (Experimento 37). Como pode ser observada, a eficiência de secagem usando a reversão do escoamento de ar é similar ou ligeiramente menor do que a observada usando uma configuração de escoamento de ar convencional. Sabbah et al. (1977) e Davila et al. (1983) relataram um comportamento semelhante na reversão do escoamento de ar e na secagem convencional de grãos de soja e arroz, respectivamente.

#### 4.5.2 Consumo específico de energia

Os valores do consumo específico de energia na secagem dos grãos de cevada foram calculados usando a Equação 68, assumindo o conteúdo final de umidade mostrado na Tabela 4.8. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9. Observa-se que os valores de SEC variam de 24,0 MJ/kg a 34,2 MJ/kg.

**Tabela 4. 9:** Eficiência energética e consumo energético específico estimado em diferentes condições de operação.

Experimento [X <sub>0</sub> ]	Temperatura	Tempo(min)	EE (%)	SEC(MJ/kg)
<b>Sem reversão</b>				
37 [X1]	40 °C	300	7,5	34,2
39 [X2]		180	7,6	34,2
41 [X3]		30	8,6	30,1
38 [X1]	50 °C	150	9,1	28,1
40 [X2]		80	10,7	24,0
42 [X3]		20	10,5	24,5
<b>Com reversão</b>				
43 [X1]	40 °C	360	7,6	34,0
45 [X2]		180	8,1	31,8
47 [X3]		30	9,1	28,4
44 [X1]	50 °C	180	7,8	32,7
46 [X2]		120	7,7	33,3
48 [X3]		20	10,3	25,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado na Tabela 4.9, nos experimentos com escoamento de ar convencional, o consumo específico de energia é menor à medida que a temperatura do ar aumenta. Como a capacidade térmica do ar de secagem melhora em temperaturas mais altas, o tempo necessário para reduzir a umidade dos grãos, nas condições apresentadas, diminui. Nos experimentos com reversão do escoamento de ar, não se observa influência significativa da temperatura nos valores do SEC. Isto é provavelmente porque os tempos de secagem mais longos exigidos nesta configuração são mais relevantes do que os efeitos do aumento da temperatura do ar (Experimento 44 e 46). Ou seja, a reversão do escoamento a princípio não serve para aumentar a eficiência, mas sim para evitar dano térmico.



#### 4.6 Simulação numérica da transferência de calor e massa da secagem convencional de grãos de cevada em leito fixo e camada espessa

Com o trabalho experimental foi possível obter os perfis de umidade e temperatura dos grãos de cevada em 10 posições axiais ao longo do leito fixo. Para facilitar a visualização, a seguir, são apresentados os dados experimentais e preditos de apenas 3 posições axiais do leito, representando a base (1 cm), o centro (5 cm) e o topo (10 cm) do leito empacotado.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 são apresentados os perfis de umidade dos grãos de cevada (base seca) nas diferentes posições axiais do leito (1, 5 e 10 cm) ao longo do tempo para os dados experimentais e preditos pela solução numérica do modelo a duas fases para os experimentos a 40 °C e 50°C e umidades iniciais de X1, X2 e X3.

De maneira geral pode-se observar que as curvas simuladas de umidade em função do tempo possuem o comportamento típico do processo de secagem, apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,90, indicando que mais de 90 % dos dados são representados pelo modelo, mas é possível observar que o ajuste proporcionado subestima ou superestima os dados do processo de secagem.

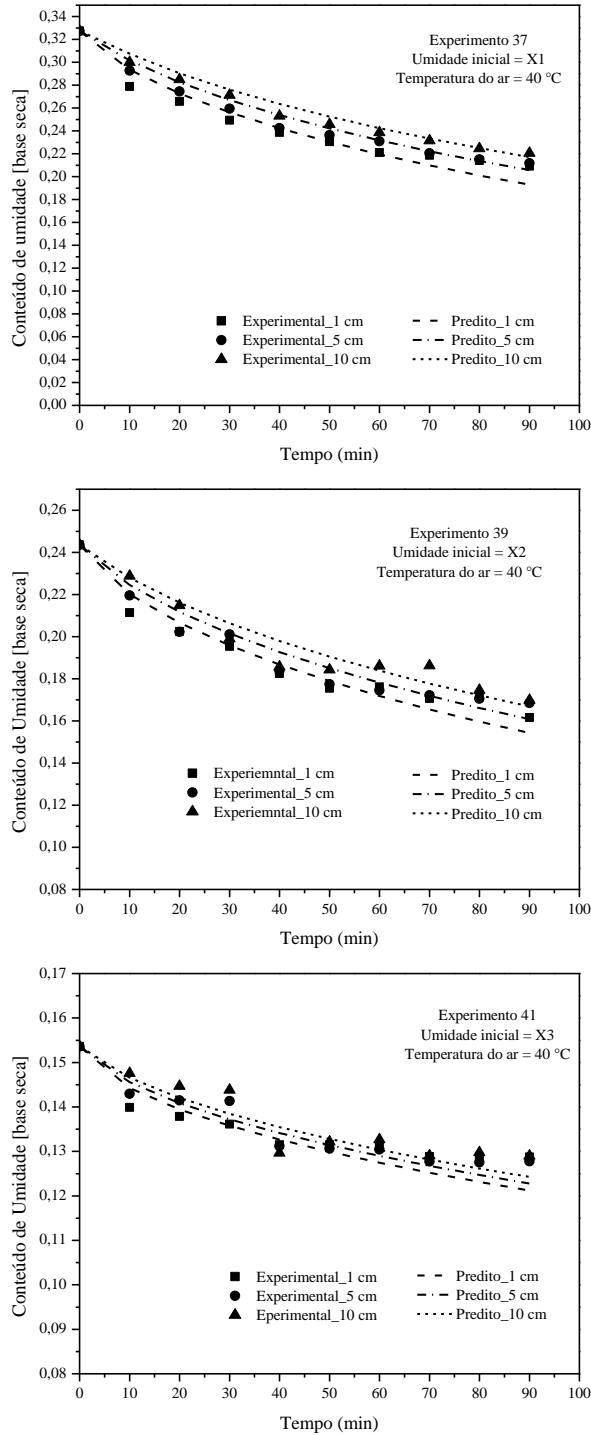
O erro médio relativo (EMR), em porcentagem, entre os valores experimentais e preditos nas diferentes posições da direção axial do leito de 1, 5 e 10 cm para os experimentos analisados, foram calculados e estão apresentados na Tabela 4.10. Estes erros entre os dados experimentais e preditos podem ser explicados pela incerteza na predição das equações de cinética de secagem e de equilíbrio.

**Tabela 4. 10:** Erro médio relativo (EMR) entre os dados experimentais e preditos para os dados de umidade dos grãos de cevada.

Experimento [T – Umidade inicial]	EMR (%)		
	1 cm	5 cm	10 cm
37 [40 °C - X1]	3,1	2,1	1,7
39 [40 °C - X2]	2,7	2,6	2,4
41 [40 °C - X3]	2,3	1,6	2,0
38 [50 °C - X1]	3,7	2,9	4,2
40 [50 °C - X2]	4,2	4,0	3,3
42 [50 °C - X3]	2,1	2,6	2,5

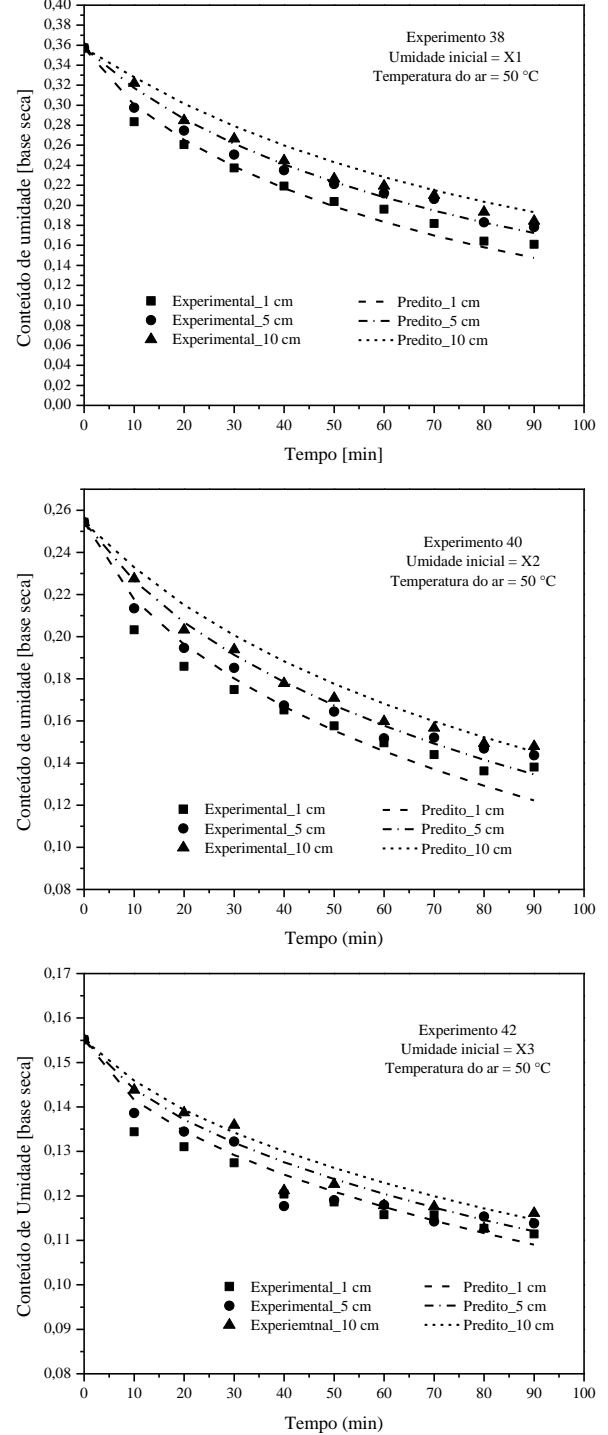
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 25:** Perfis de umidade dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 40 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 26:** Perfis de umidade dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação dos perfis de temperatura da mistura com o tempo de secagem foi realizada conforme a metodologia descrita anteriormente. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os perfis de variação de temperatura do ar de secagem de 40 °C e 50 °C, respectivamente, em relação à altura do leito para o início do processo de secagem (900 segundos) para três umidades iniciais diferentes, (a) X1, (b) X2 e (c) X3.

Nas Figuras 4.27 e 4.28, observa-se que a temperatura no topo (10 cm) é sempre menor que na base (1 cm). Ao fixar uma altura qualquer, verifica-se que a temperatura sempre foi menor no início. Isso acontece, pois no início, em tempos menores, o ar está em contato com um sólido frio e úmido, o que favorece a transferência de calor, mas diminui a temperatura do ar de secagem. A tendência é que depois de um determinado tempo, a temperatura do ar em qualquer posição atinja a temperatura do ar na base, tendo assim uma condição de equilíbrio térmico.

Ao observar os dados experimentais e preditos, vemos que o equilíbrio térmico foi atingido, mas houve uma diferença maior entre os dados obtidos experimentalmente e os estimados para a temperatura, as predições foram melhores para umidades mais baixas e tempos maiores. Isso pode ter ocorrido devido a consideração no modelo a duas fases de temperatura de mistura (ar - grão).

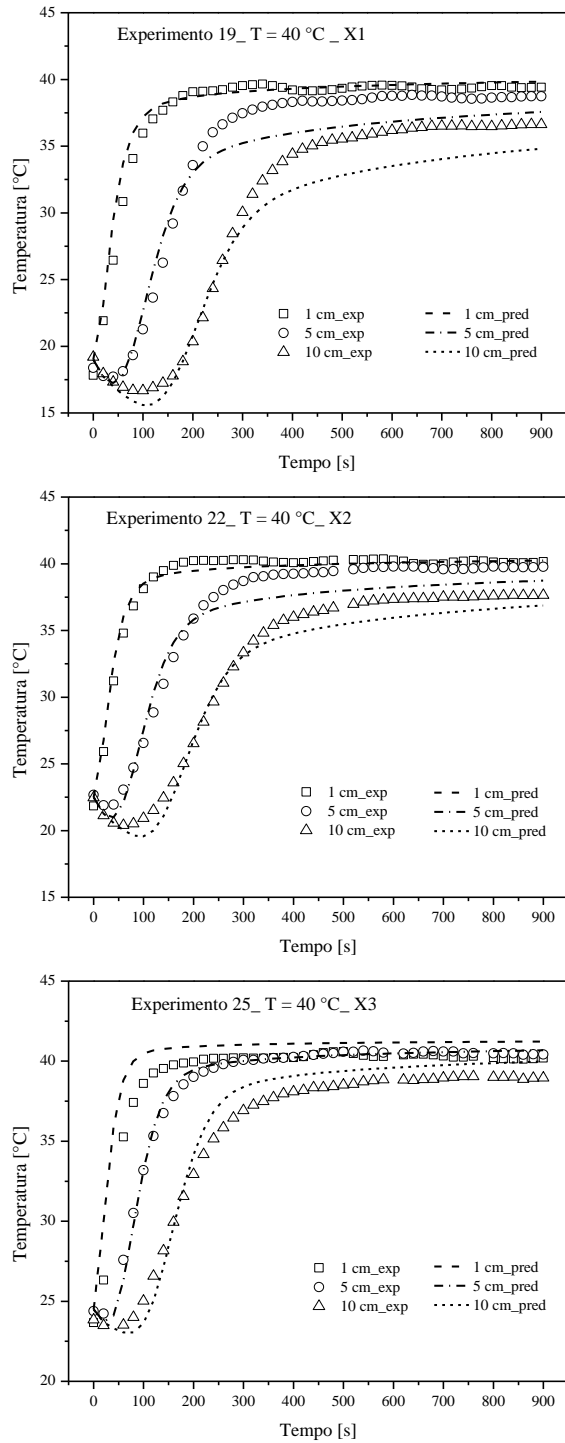
Na Tabela 4.11 são apresentados os valores do erro médio relativo calculado entre os dados experimentais e preditos para a temperatura nas diferentes posições do leito (1, 5 e 10 cm).

**Tabela 4. 11:** Erro médio relativo (EMR) entre os dados experimentais e preditos para a temperatura.

Experimento [T – Umidade inicial]	EMR (%)		
	1 cm	5 cm	10 cm
19 [40 °C - X1]	1,6	4,4	5,4
22 [40 °C – X2]	1,0	3,3	2,8
25 [40 °C – X3]	2,9	0,6	2,8
21 [50 °C - X1]	4,5	10,0	13,6
24 [50 °C – X2]	2,0	3,8	5,1
27 [50 °C – X3]	1,9	1,4	2,5

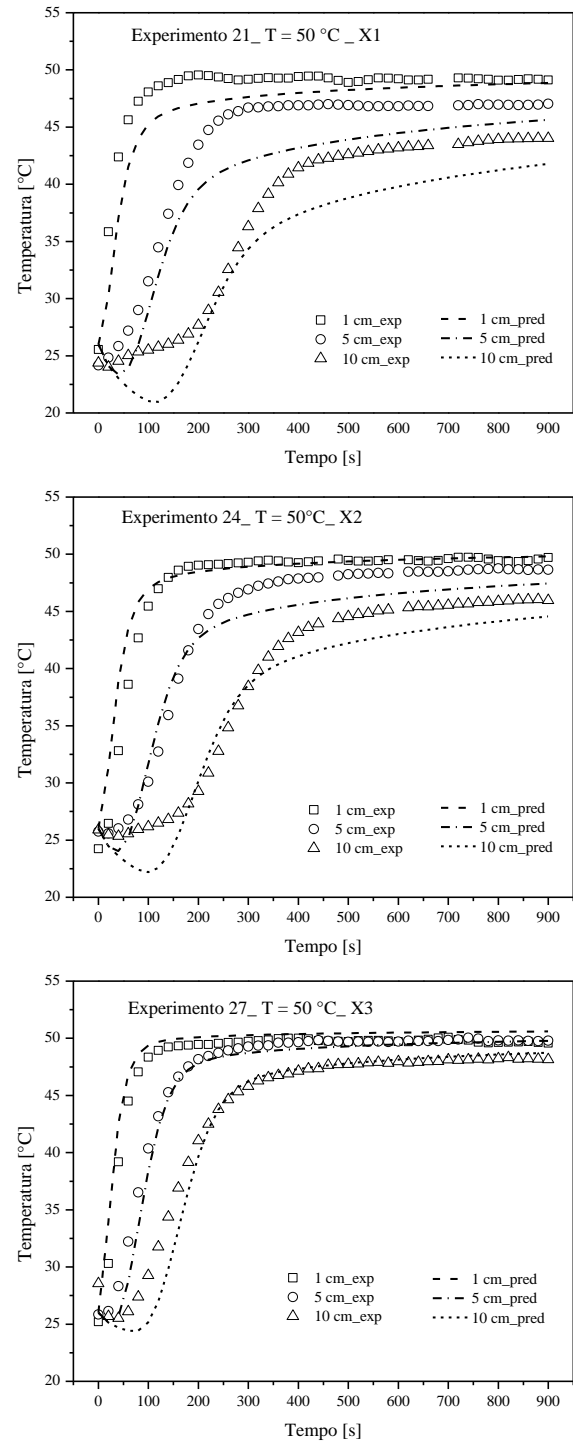
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 27:** Perfis de temperatura dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial : (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 28:** Perfis de temperatura dos grãos de cevada experimentais e preditos no decorrer do tempo para as posições 1, 5 e 10 cm, na direção axial do leito, na temperatura de 50 °C, velocidade de 4,0 m/s e umidade inicial: (a) X1, (b) X2 e (c) X3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, de maneira geral, observamos que existe uma concordância entre os dados experimentais e os preditos para a umidade e a temperatura ao longo do tempo nas diferentes posições axiais do leito. Ressaltando que foi feita uma comparação direta dos dados experimentais com os dados preditos pela simulação, o que permite uma análise mais realista da previsibilidade do modelo. Mesmo com baixos valores de erro médio relativo entre os resultados experimentais e preditos, para as situações simuladas, o modelo matemático necessita de aprimoramento, como a utilização de outro tipo de equação para expressar a taxa de secagem, por exemplo, substituir a equação de Page por um modelo difusivo para os grãos de cevada, para corrigir as incertezas das equações de equilíbrio, isotermas para cada temperatura utilizada podem ser medidas, pois utilizamos interpolação para obter os dados necessários para a modelagem. Mas previu com sucesso o transporte de calor e massa em camada espessa em um secador de leito fixo e permite uma análise preliminar do processo de secagem.

## 5 CONCLUSÕES

O método de reumidificação aplicado nos grãos de cevada mostrou-se adequado para atingir os diferentes conteúdos de umidade necessários para o desenvolvimento do trabalho.

As metodologias experimentais empregadas para a determinação do encolhimento, da distribuição de temperatura e da distribuição de umidade mostraram-se adequadas para a obtenção dos dados. A configuração do equipamento de secagem para operar com reversões também se mostrou adequada, o que possibilitou os experimentos com reversão do ar de secagem.

O encolhimento do leito apresentou uma relação linear com a umidade inicial dos grãos de cevada. Os resultados obtidos mostraram a necessidade de incluir a equação de encolhimento na modelagem matemática da secagem em leito fixo e camada espessa.

Os dados de distribuição de temperatura e umidade, com e sem reversão do ar de secagem, foram analisados e se observou a formação de gradientes de temperatura e umidade no leito de grãos de cevada durante o processo de secagem.

Mesmo com baixa temperatura e alta velocidade de secagem ao ar (4,0 m/s), no início do processo de secagem convencional, diferenças de até 6,8 °C foram observadas entre as camadas inferior (1 cm) e superior (10 cm) do leito para secagem a  $T = 50\text{ °C}$ ,  $X_0 = 25,4\%$  (Experimento 38).

Uma diferença de 16,7% nas taxas de secagem das camadas inferior e superior foi encontrada para secagem a  $T = 40\text{ °C}$ ,  $X_0 = 24,7\%$  (X1) e secagem convencional (Experiência 37). Esta diferença caiu para 3,9%, para secagem a  $T = 40\text{ °C}$ ,  $X_0 = 25,0\%$  (X1) e com reversão do escoamento de ar (Experiência 43). Para todos os experimentos com reversão do escoamento de ar, observou-se que a diferença entre as taxas de secagem na parte inferior e no topo do leito diminuiu com a reversão do escoamento de ar. Assim, a reversão do escoamento de ar causou uma diminuição nas taxas de secagem, mas aumentou a homogeneidade do processo. Para os Experimentos 37 e 43, as diferenças entre os conteúdos de umidade nas camadas superior (1 cm) e inferior (10 cm) do secador foram de 12,2% e 4,9%, respectivamente.

As eficiências de energia e secagem diminuem ao longo do tempo. Com relação à influência da temperatura, considerando as eficiências baseadas no tempo necessário para atingir o conteúdo final de umidade nas diferentes temperaturas utilizadas, obtiveram-se

---

maiores eficiências para o processo realizado a 50 °C, devido ao menor tempo total do processo.

Os resultados da análise energética indicaram que as eficiências de secagem foram ligeiramente menores na secagem da cevada usando a reversão do fluxo de ar do que na secagem convencional. No entanto, resultados experimentais demonstraram que a secagem utilizando reversões do escoamento de ar proporciona distribuições mais uniformes do conteúdo de umidade através do leito fixo e valores similares para consumo específico de energia (SEC) quando comparado com o método convencional. Portanto, a reversão do escoamento de ar oferece uma alternativa confiável para obter uma menor possibilidade de dano térmico dos grãos, com pequeno aumento no custo de operação.

Os resultados experimentais obtidos mostraram a necessidade de incluir o encolhimento e as propriedades físicas em função do conteúdo de umidade na modelagem e simulação da secagem em leito fixo e camada espessa, a fim de se obter uma representação física adequada do processo. A análise da secagem em leito fixo dos grãos de cevada com base no modelo a duas fases com a hipótese de que há encolhimento no leito e com um conjunto adequado de equações constitutivas, previu com sucesso a transferência de calor e massa em camada espessa em um secador de leito fixo. O modelo desenvolvido mostrou-se promissor para a predição das variáveis do processo de secagem, com uma boa concordância entre os dados preditos e os dados experimentais, mas o modelo deve ser aprimorado.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas neste trabalho, ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- Modelagem e simulação do secador de leito fixo e camada espessa, através da resolução numérica do sistema de equações do modelo a duas fases, descrito anteriormente, para o processo de secagem com reversão do escoamento de ar.

- Utilização de outros grãos, a fim de validar as metodologias utilizadas para investigação do encolhimento e da transferência de calor e massa em leito fixo e camada espessa.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINI, G. **Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leito fixo.** 2015. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2015.

ALBINI, G., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T. Caracterização de grãos de cevada em relação à umidade inicial obtida através do processo de reumidificação. In: **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015** [=Blucher Engineering Proceedings]. São Paulo: Blucher, 2015, p. 1893-1902 .

ALLEN, T. **Particle size measurement.** 4ed. New York: Chapman and Hall. 1990.

APPEL, M. T. **Transferência de calor em leito deslizante com escoamentos cruzados: obtenção do coeficiente de transferência de calor entre o fluido e o sólido.** 1996. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1996.

ARNOSTI JR, S. **Desenvolvimento de um secador transportador do tipo esteira com escoamento cruzado e caracterização de sementes de gramíneas.** 1997. 232 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1997.

ARRIECHE, L. S. **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada.** 2003. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 17 ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC, 2002, Vol. 2.

AZEVEDO, E. G. de, ALVES, A. M. Secagem de Sólidos. In: \_\_\_\_\_. **Engenharia de Processos de Separação.** 1 ed. Lisboa: IST Press, 2009. p. 667-777.

BAIK, B. K.; ULLRICH, S.E. Barley for food: characteristics, improvement and renewed interest. **Journal of Cereal of Science**, 2008, Vol. 48, p. 233-242.

BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains.** 2ª Edição. Chichester: John Wiley & Sons. 2016. p. 352.

BALA, B. K., WOODS, J. L. . Simulation of deep bed malt drying. **Journal of agriculture Engineering Research**, 1984, Vol. 30, p. 235-244.

BALASUBRAMANIAN, D. Physical properties of raw cashew nut. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 2001, Vol. 78(3), p. 291-297.

BARROZO, M. A. S., MUJUMDAR, A., FREIRE, J. T. Air – drying of seeds: a review. **Drying Technology**. 2014, Vol. 32, p. 1127 – 1141.

BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados**. 1995. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1995

BHANDARI, B.R., ADHIKARI, B. P. Water activity in food processing and preservation. In: CHEN, X. D., MUJUMDAR, A. S. (Eds.). **Drying Technologies in Food Processing**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, p. 55 – 89.

BERBERT, P. A., QUEIROZ, D. M., SILVA, J. S., PINHEIRO FILHO, J. B. Drying of coffee (*Coffea arabica* L.) in a fixed bed with a simulated periodic airflow reversal. **Journal of agriculture Engineering Research**, 1994, Vol. 59, p. 195-202.

BERBERT, P. A., QUEIROZ, D. M., SILVA, J. S., PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of agriculture Engineering Research**, 1995, Vol. 60, p. 167-173.

BOYCE, D. S. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. **Journal of agriculture Engineering Research**. 1965, Vol. 10, p. 333 – 341.

BORGNAKKE, C., SONNTAG, R.E. **Fundamentals of Thermodynamics**. Wiley, 2009.

BRAGANTINI, C. Secagem e beneficiamento de sementes. In: SANTOS, A. B., STONE, L. F., VIEIRA, N. R. A. **A cultura de arroz no Brasil**. 2 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 2006. p. 813 – 842.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria n. 691 de 22 de novembro de 1996. **Diário Oficial da União**, 25 novembro 1996, seção I, p. 24751-24752.

BRASIL. **Embrapa Trigo**. Cevada. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/cevada>>. Acesso em: 08 out. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cultivares de cevada**. Comunicação empresarial da Embrapa Trigo. Colaborador: Euclides Minella. Passo Fundo, 2005. 20 p.

BRAVI, E., MARCONI, O., PERRETTI, G., FANTOZZI, P. Influence of barley variety and malting process on lipid content of malt. **Food Chemistry**. 2012. Vol. 135. p. 1112-1117.

BRIGGS, D. Malt modification – A century of evolving views. **Journal of the Institute of Brewing**. 2002, Vol. 108, p. 395-405.

BRIGGS, D. E., BOULTON, C. A., BROOKES, P. A., STEVES, R. **Brewing: Science and Practice**. New York: CRC Press, 2004.

BRITO, R. C. de, PÁDUA, T. F. de, FREIRE, J. T., BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [ *Sorghum bicolor* (L) moench]. **Chemical Engineering Processing: Process Intensification**. 2017. Vol. 117, p. 95–105.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Connecticut: The AVI Publishing Company, INC., 1974, p. 265.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 450.

BRUIN, S., LUYBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: a review of recent developments. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in Drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 1980, Vol. 1, p. 155 – 215.

CARVALHO, G. R. de, POLACHINI, T. C., FILHO, J. F. L., TELIS-ROMERO, J. Caracterização física do leito de sementes de cevada brasileira em função de sua umidade. In: **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015 [Blucher Engineering Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2015. . São Paulo: Blucher, 2015. p. 121-127 .

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2. ed. rev. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003. p. 207.

CENKOWSKI, S., JAYAS, D.S., HAO, D. Latent heat of vaporization for selected foods and crops. **Can. Agric. Eng.** 1992, Vol. 34, p. 281–286.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMAGH, 2012. p. 904.

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.

CLEMENTE, G., SANJUÁN, N., CÁRCEL, J. A., MULET, A. Influence of Temperature, air velocity, and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds. **Drying Technology**. 2014, Vol. 32, n. 1, p. 68-76.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira. Grãos**. Safra 2014/2015, n.6 – Sexto levantamento, Brasília, p. 1-103, mar. 2015a. Disponível em:  
[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_03\\_11\\_14\\_07\\_48\\_boletim\\_graos\\_marco\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_03_11_14_07_48_boletim_graos_marco_2015.pdf). Acesso em: 26 mar.2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira. Grãos**. Safra 2015/2016, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-140, outubro 2015b. Disponível em:  
[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_10\\_09\\_09\\_03\\_07\\_boletim\\_graos\\_outubro\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_10_09_09_03_07_boletim_graos_outubro_2015.pdf). Acesso em: 01 dez.2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira. Grãos**. Safra 2016/2017, n.6 – Sexto levantamento, Brasília, p. 1-176, março 2017a. Disponível em:  
[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_03\\_14\\_15\\_28\\_33\\_boletim\\_graos\\_marco\\_2017bx.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_03_14_15_28_33_boletim_graos_marco_2017bx.pdf). Acesso em: 04 abr. 2017.

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira. Grãos.** Safra 2016/2017, n.12 – Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-158, setembro 2017b. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_09\\_12\\_10\\_14\\_36\\_boletim\\_graos\\_setembro\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_09_12_10_14_36_boletim_graos_setembro_2017.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2017.
- CORRÊA, C.S., GOUVÊA, L.F.C., FREIRE, J.T., MAIA, G.D. Caracterização física e fisiológica de sementes de cevada brasileira para fins de produção de malte cervejeiro. **Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP)**. 2013.
- COSTA, R. S. **Influência do diâmetro de partícula sobre o coeficiente de transferência de calor entre o sólido e o fluido em leito deslizante e escoamentos cruzados.** 1996. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1997.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. Claredon Press: Oxford, 1975.
- DAVILA, S. I., CHEN, L. H., WELCH, G. B. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. **Trans. ASAE**. 1983. p. 1842–1848.
- FARONI, L. R.D. **Fatores que influenciam a qualidade dos grãos armazenados.** 1998. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/citations?user=EgQ6JjUAAAAJ&hl=pt-BR>. Acessado em: 26 mar.2015.
- FELIZARDO, M. P. **Caracterização física e de secagem em sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Sneathlge).** 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2014.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas.** 2.ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.
- FENACELBRA (Federação Nacional das Associações de Celíacos do Brasil). **Guia orientador para celíacos.** São Paulo: Escola Nacional de Defesa do Consumidor, Ministério da Justiça, 2010. p. 48. Disponível em: <[http://www.fenacelbra.com.br/arquivos/guia/guia\\_orientador\\_para\\_celiacos.pdf](http://www.fenacelbra.com.br/arquivos/guia/guia_orientador_para_celiacos.pdf)>. Acessado em: 23 nov.2017.
- FUMAGALLI, F. **Estudo da secagem das sementes de *Brachiaria brizantha*.** 2007. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007.
- GORZOLKA, K., LISSEL, M., KESSLER, N., LOCH-AHRING, S., NIEHAUS, K. Metabolite fingerprints of barley whole seed, endosperms, and embryos during industrial malting. **Journal of Biotechnology**. 2012. Vol. 159, p. 177-187.
- HERMAN-LARA, E., SALGADO-CERVANTES, M.A., GARCÍA-ALVARADO, M.A. Mathematical simulation of convection food batch drying with assumptions of plug flow and complete mixing of air. **Journal of Food Engineering**, 2005, Vol. 68, p. 321-327.

- 
- HERMAN-LARA, E., MARTINEZ-SANCHEZ, C. E., AMADOR-MENDOZA, A.; RUIZ-LÓPEZ, I. I. Effect of airflow reversal on packed-bed drying of carrots.. **Journal of Food Process Engineering**, 2010, Vol. 33, p. 684-700.
- IGLESIAS, H. A., CHIRIFE, J. **Handbook of foods isotherms: Water sorption parameters for food and food components**. Orlando: Academic Press. 1982, p. 354.
- JADHAV, S.J., LUTZ, S.E., GHORPADE, V.M., SALUNKHE, D.K. Barley: chemistry and value-added processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 1998, Vol. 38, p. 123–171.
- JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; RIBEIRO, J. P. Viabilidade econômica de aquisição de um silo-secador para pequenas áreas de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 795-803, set/dez, 2006.
- JAYAS, D. S., CENKOWSKI, S., PABIS, S., MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**. Vol. 9, n. 3, 1991, p. 551 – 558.
- KARATHANOS, V. T., KANELLOPOULOS, N. K., BELESSIOTIS, V. G. Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. **Journal of Food Engineering**. Vol.29. 1996. p. 167-183.
- KUDRA, T. Energy Performance of Convective Dryers Energy Performance of Convective Dryers. **Dry. Technol.** Vol. 30, 2012, p. 1190–1198.
- KUNZE, W. Technology Brewing and Malting. Berlin: Versuchs und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB). 2004.
- LEWIS, M. J., YOUNG, T. W. **Brewing**. New York: Aspen Publishers. 2001.
- LIMA, A.C.C., ROCHA, S.C.S. Bean drying in fixed, spouted and spout-fluid beds: a comparison and empirical modelin. **Dry. Technol.** Vol. 16, 1998, p. 1881–1901.
- LIMA, R. A. B. **Análise da secagem convectiva de folhas de manjericão (*Ocimum basilicum* L.)**. 2013. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2013.
- LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E., URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. **Journal of Food Science**. 1983, Vol. 48, n. 5, p. 1497 – 1502.
- MADAMBA, P.S., DRISCOLL, R. H., BUCKLE, K. A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. **Journal of Food Engineering**. Vol. 23, 1994, p. 309 – 319.
- MAIA, G. D., ALBINI, G., FREIRE, J. T. Thermodynamic analysis for the hygroscopic behavior of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.). **Japan Journal of Food Engineering**, 2016, Vol. 17 (4), p. 131-138.

MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992, p. 3-39.

McMINN, W. A., MAGEE, T. R. A. Principles, Methods and Applications of the convective drying of foodstuffs. **Trans IChemE**. Part C. 1999. p. 175-193.

MELO, L. A. de . **Análise da homogeneização da umidade de *Brachiaria brizantha* em secador de leite fixo**. 2001. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2001.

MOHSEIN, N. N. **Physical Properties of plant and animal materials**: structure, physical characteristics and mechanical properties. New York: Gordon and Breach Scientific Publishers, 1970. p. 734 .

MOLINA-CANO, J. L., FRANCESCH, M., PEREZ-VENDRELL, A. M., RAMO, T., VOLTAS, J., BRUFAU, J. Genetic and environmental variation in malting and feed quality of barley. **Journal of cereal Science**. 1997. Vol. 25, p. 37-47.

MOTEVALI, A., MINAEI, S., BANAKAR, A., GHOBADIAN, B., KHOSHTAGHAZA, M.H., Comparison of energy parameters in various dryers. **Energy Convers. Manag.** 2014. Vol. 87, p. 711–725.

MUJUMDAR, A. S. Principles, classification and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. CRC Press / Taylor & Francis Group. 2006, p. 3 – 30.

NOVACK, M. M. E. **Avaliação nutricional de grãos de cevada submetidos a diferentes processamentos**. 2010. 124 p. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria,RS, 2010.

OETERRER, M., ALCARDE, A. R. Tecnologia da fabricação de cerveja. In: OETTERER, M.; REGITANO-d'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. Barueri, SP: Manole, 2006, p. 51-98.

PARRY, J.L. Mathematical modeling and computer simulation in agricultural grain drying – A review. **Journal of Agriculture Engineering Research**, 1985, Vol. 32, p. 1-29.

PAULSEN, M. R.; THOMPSON, T. L. Effects of reversing airflow in a crossflow grain dryer. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph,1973, Vol. 16 (3), p. 541-545.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. 2014. 170p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2014.

PEREIRA, A. V. **Caracterização e secagem de sementes de painço (*Setaria italica* L.)**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

PINTO, A. R. M. **Avaliação do processo de secagem no fabrico de malte**. 2013. 81 p. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013.

PINTO, J.C., LAGE, P.L.C. **Métodos numéricos em problemas de Engenharia Química**. Série – Escola Piloto de Engenharia Química. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro: E-papers. 2001, p. 316.

POLACHINI, T. C., CARVALHO, G. R. de, FILHO, J. F. L., ROMERO, J. T. Efeito da umidade nas propriedades físicas de sementes de cevada brasileira. In: **Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015 [=Blucher Engineering Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2015. . São Paulo: Blucher, 2015. p. 99-104.

PORTO, P. de D. **Tecnologia de fabricação de malte: uma revisão**. 2011. 58p. Monografia (Graduação em Engenharia de alimentos) – Instituto de Ciências e Tecnologia de alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, SP, 2011.

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.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

PRADO, M. M., FERREIRA, M. M. P., SARTORI, D. J. M. Drying of seeds and gels. **Drying Technology**. 2006, Vol. 24, p. 281 – 292.

PRADO, M. M., SARTORI, D. J. M. Heat and Mass Transfer in Packed Bed Drying of Shrinking Particles. In: EL-AMIM, M. **Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications**. 2011. p. 621- 648. InTech, Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/masstransfer-in-multiphase-systems-and-its-lications/heat-and-mass-transfer-in-packed-bed-drying-ofshrinking-particles>>.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, 1994, Vol. 23, p. 91-105.

RATTI, C., MUJUMDAR, A.S. Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, 1995, Vol. 26, p. 259-271.

RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of food in dehydration. In: RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering Properties of Foods**. New York: Academic Press. 1986, p. 155 – 165.

RUIZ-LÓPEZ, I. I., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E., COBOS-VIVALDO, R., HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, 2008, Vol. 89, p. 310-318.

SABBAH, M.A., MEYER, G.E., KEENER, H.M., ROLLER, W.L. Reversed-Direction-Air-Flow Drying for Soybean Seed, **Transactions of the ASAE**. 1977. Vol. 20, p. 0562–0566.

SABBAH, M.A., MEYER, G.E., KEENER, H.M., ROLLER, W.L. Simulation studies of reversed direction airflow drying method for soybean seed in a fixed bed. **Transactions of the ASAE**. 1979. Vol. 22 (5), p. 1162-1166.

SANTOS, I. J. **Efeito da temperatura de secagem nas atividade da alfa e beta-amilase durante o processo de malteação de cevada (*Hordeum vulgare*) para produção de cerveja**. 1999. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

SARTORI, D. J. M. **Transferência de calor em leito deslizante**. 1986. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

SDEPANIAN, V. L., MORAIS, M. B. de, FAGUNDES-NETO, U. Doença celíaca: características clínicas e métodos utilizados no diagnóstico de pacientes cadastrados na Associação dos Celíacos do Brasil. **Jornal de Pediatria**. 2001. Vol. 77, n. 2, p. 131-138.

SILVA TELLES, A., MASSARANI, G. Sistemas particulados a duas fases multicomponentes. In: **XIX Encontro Nacional sobre escoamento em meios porosos**. 1991. ANAIS Campinas, SP: UNICAMP, SP, p. 91-101.

SOLOGUBIK, C. A., CAMPAÑONE, L. A., PAGANO, A. M., GELY, M. C. Effect of moisture content on some physical properties of barley. **Industrial Crops and Products**. 2013, Vol. 43, p. 762-767.

SOUZA, D. O. C. **Granulação de alimentos: caracterização morfológica das partículas e modelagem matemática do processo**. 2007. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), FEA/UNICAMP, Campinas, SP, 2007.

SOUSA, J.S.I. Malte. In: \_\_\_\_\_. **Enciclopédia agrícola brasileira**. São Paulo: Edusp, 2004. v.4. p. 359 – 367.

SOKHANSANJ, S., LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal of Agriculture Engineering Research**, 1996, Vol. 63, p. 129-136.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science. 1986, p. 448.

SUZUKI, K., KUBOTA, K., HASEGAWA, T., HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**. 1976, Vol. 41, p. 1189 – 1193.

TAVAKOLI, M., TAVAKOLI, H., RAJABIPOUR, A., AHMADI, H., GHARIB-ZAHEDI, S. M. T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 2009, Vol. 2, n. 4, p. 84 – 91.

TOHIDI, M., SADEGHI, M., TORKI-HARCHEGANI, M. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. **Renew. Sustain. Energy Rev**. 2017. Vol. 70, p. 519–528.



---

TUNES, L. M. de., BARROS, A. C. S. A., BADINELLI, P. G., GARCIA, D. C. Diferentes épocas de colheita e qualidade fisiológica de sementes de cevada. **Revista Brasileira de Sementes**. Vol. 32, n. 2, p. 042-048, 2010.

TRUESDEL, C. Sulle basi della Termodinâmica. 1957. Citado por MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992, p. 3-39.

VERMUGANTI, G. R., PFOST, H. B., CHUNG, D. S., BURROUGHS, R. Some properties of cereal grains, food legumes and oilseeds (hygroscopic , thermal , physical) affecting storage and drying. **Food & Feed Grain Institute**, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 1980, p. 39.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**. 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

VIEIRA, M.G.A., ESTRELLA, L., ROCHA, S.C.S. Energy Efficiency and Drying Kinetics of Recycled Paper Pulp. **Dry. Technol.** Vol. 25, 2007, p. 1639–1648.

ZOTIN, F. M. Z. **Efeito de parede em colunas de recheio**. 1985. 85 p. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1985.

## APÊNDICE A

### PROGRAMA EM MATLAB

A seguir o programa em Matlab desenvolvido para o modelo descrito nesta tese. O programa foi modificado para se adequar a cada caso em estudo.

```

%-----%
% Modelo a duas fases para secagem em leito fixo e camada %
% espessa %
% Secagem de Grãos de Cevada %
% %
%-----%
clc
close all
clear all
tic

% Parâmetros do modelo
Epsilon = 0.40; %POROSIDADE DO LEITO (ADIMENSIONAL)
Rho = 1.24; % DENSIDADE DA CEVADA (g/cm^3)
dp = 0.365; % 0.365 0.64 DIÂMETRO DA CEVADA (cm)
Rds = 5.0; % DIÂMETRO DO SECADOR (cm)
Fhi = 0.72; % ESFERICIDADE (ADIMENSIONAL)
Visc = 0.185e-3; %VISCOSIDADE (g/cm.s)
Rkf = 0.637e-4; %CONDUTIVIDADE TERMICA DO AR (cal/cm.s.°C)
Cpf = 0.25; % CALOR ESPECÍFICO DO AR SECO (cal/g.°C)
Cpv = 0.28; % CALOR ESPECÍFICO DO VAPOR DE ÁGUA (cal/g.°C)
Cps = 0.35; % CALOR ESPECÍFICO DO SÓLIDO (cal/g.°C)
Cpl = 1.0; % CALOR ESPECÍFICO DA ÁGUA LÍQUIDA (cal/g.°C)
lambda = 573; %CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO (cal/g)
Ral = 10.0; % ALTURA DO SECADOR (cm)

% Parâmetros do Método Numérico
N =11;
hyaux=linspace(0,10,N);
hy=hyaux(2)-hyaux(1);

%Experimento - Condições: Experimento 19 e 37 T = 40 °C X1
Ufo = 0.0059; % umidade inicial do ar
Uso = 0.3274; % conteúdo de umidade inicial do grão
Tfo = 41.0; % temperatura do ar de secagem
Tmo = 19; % temperatura inicial na entrada do leito
W0=Ufo;

```

```

Tf0=Tfo;
M0=Uso;
Vsuperficial= 1.1236e2; [cm/s]
Rhof =1.2e-3*293.15/(Tfo+273.15)*(1/(1+Ufo)); % DENSIDADE DO
FLUIDO (g/cm^3)
Gf=Vsuperficial*Rhof; % [g/cm^2.s]

a = 6*(1-Epsilon)/(Phi*dp);
Pr=Visc*Cpf/Rkf;
Re=Gf*dp/Visc;
h= (Cpf*Gf/Epsilon)*((2.876/Re)+(0.302/Re^0.35))*Pr^(-
2/3);%Geankoplis

options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',1e-4);
[T,Y] = ode23s(@fixo_encolhimento_exp19_exp37,[1e-
3:20:91*60],[Uso*ones(1,N) Ufo*ones(1,N)Tmo*ones(1,N)],
options, Epsilon,Rho,dp,Rds,Phi, Visc,Rkf,Cpf,Cpv,Cps,Cpl,
lambda,Ral,N,hy,Ufo,Uso,Tfo,Tmo,W0, Tf0,Vsuperficial,Gf,
Rhof,a,Pr,Re,h,M0);

figure(1)
hold on
plot(T,Y(:,2),'r.-',T,Y(:,6),'g.-',T,Y(:,11),'m.-.')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura do sólido (bs)')
title('Exp37 T=40°C V= 4 m/s ')
legend('0.01m sim','0.05m sim','0.10m sim')
hold off

figure(2)
hold on
plot(T,Y(:,2*N+2),'r.-',T,Y(:,2*N+6),'g.-',T,Y(:,2*N+11),'m.-
.')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura da mistura (°C)')
title('Exp19 T=40°C V=4m/s')
legend('0.01m sim','0.05m sim','0.10m sim')
hold off

disp ('tempo X_1cm X_5cm X_10cm')
disp([T Y(:,2) Y(:,6) Y(:,11)])

disp ('tempo T_1cm T_5cm T_10cm')
disp([T Y(:,2*N+2) Y(:,2*N+6) Y(:,2*N+11)])

toc

```

---

```

function dY =
fixo_encolhimento_exp53_exp13(t,Y,Epsilon,Rho,dp,Rds,Fhi,Visc,
Rkf,Cpf,Cpv,Cps,Cpl,lambda,Ral,N,hy,Ufo,Uso,Tfo,Tso,W0,Tf0,Vsu
perfcial,Gf,Rhof,a,Pr,Re,h,M0,Sb,Ep,Meq_30,Meq_50)

dY = zeros(3*N,1);
for i=1:N
M(i)=Y(i);
W(i)=Y(N+i);
Tm(i)=Y(2*N+i);
end
for i=1:N
if i==1
dWdy(i)=(W(i)-W0)/hy;
dTmdy(i)=(Tm(i)-Tf0)/hy;
else
dWdy(i)=(W(i)-W(i-1))/hy;
dTmdy(i)=(Tm(i)-Tm(i-1))/hy;
end

K(i)=(exp(7.8119-4403.7/(Tm(i)+273.15)));

Pab(i)=(28.97/18*W(i))/(1+28.97/18*W(i))*(695.1/760);
Psat(i)=exp(18.3036-3816.44/(Tm(i)+227.02))/760;
UR(i)= Pab(i)/Psat(i);
Meq_30(i) =1/100*(.67*.080*30*UR(i))/((1-.67*UR(i))*(1-
.67*UR(i))+(.67*30*UR(i)));
Meq_50(i) =1/100*(0.73*0.067*9.35*UR(i))/((1-0.73*UR(i))* ...
((1-0.73*UR(i))+0.73*9.35*UR(i)));
Meq(i) = Meq_30(i)+(((Tm(i)-30)/(50-30))*(Meq_50(i)-
Meq_30(i)));

Rho(i)= 0.0998*(M(i)/M0) + 1.3104;%rho real
Ep(i)=-0.0968*(M(i)/M0)+0.4459; %porosidade vs M/M0
Sb(i)= (0.2619*(M(i)/M0) + 0.7912);% encolhimento

dMdt(i)= (-.66*K(i)*(M0-Meq(i))*exp(-K(i)*(t)^.66))/((t)^.34);

f(i)=- (1-Ep(i))*Rho(i)*dMdt(i);
dY(i)= dMdt(i); % Balanço de massa para o sólido
dY(i+N)=(f(i)-(Gf/Sb(i))*dWdy(i))/(Ep(i)*Rhof);% Balanço de
massa para o fluido
dY(i+2*N)=(-f(i)*(lambda)-
((Gf/Sb(i))*(Cpf+W(i)*Cpv)*dTmdy(i)))/(((1- Ep(i))*Rho(i)
*(Cps+M(i)*Cpl))+ (Ep(i)*Rhof*(Cpf+W(i)*Cpv)));%mistura

end

```