

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

**REUMIDIFICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE GRÃOS DE  
CEVADA EM LEITO FIXO**

**GEISA ALBINI**

São Carlos – SP

2015

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

**REUMIDIFICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE GRÃOS DE  
CEVADA EM LEITO FIXO**

**Geisa Albini**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

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

**Co-orientador:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos – SP

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

A336rc      Albini, Geisa.  
Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de  
cevada em leito fixo / Geisa Albini. -- São Carlos : UFSCar,  
2015.  
86 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2015.

1. Secagem. 2. Leito fixo. 3. Propriedades físicas. 4.  
Cinética de secagem. 5. Cevada. I. Título.

CDD: 660.28426 (20<sup>º</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE GEISA ALBINI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 04 DE MARÇO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
(Orientador), UFSCar

  
Hugo Perazzini  
UNIFEI

  
Gustavo Dias Maia  
UFSCar

*Este trabalho é dedicado aos meus pais,  
Aparecida e José.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre presente, me dando forças e guiando meus passos e me iluminando.

Aos meus pais Aparecida e José, referências mais importantes em minha vida e sempre meus incentivadores, colaboradores e admiradores, obrigada por estarem sempre presentes e participando de minha vida, faltam palavras para expressar o quanto são importantes para mim, meu amor e agradecimento eterno a vocês.

À minha avó Carmen, pelo apoio e incentivo.

Aos meus irmãos Giuliano e Giovane, pelo apoio e por ter vocês ao meu lado.

Às minhas sobrinhas, Catharina e Beatriz, por renovarem e alegrarem nossa família.

Aos meus familiares, que sempre estiveram na torcida.

Aos meus orientadores, Professor José Teixeira Freire e Professor Fábio Bentes Freire, pelos ensinamentos e dedicação que me ofereceram durante todo o mestrado.

Ao Professor José Teixeira Freire, um agradecimento especial, não só pela orientação, que foi fundamental, mas por todo carinho, incentivo e confiança.

Aos professores do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, Maria do Carmo Ferreira, Gustavo Dias Maia, Dermeval José Mazzini Sartori, Ronaldo Guimarães Corrêa, Rodrigo Béttega e Thiago Faggió de Pádua, pela atenção e interesse, sempre disponíveis para ajudar e contribuir ao nosso trabalho.

Ao Professor Hugo Perazzini, pela ajuda, ensinamentos e disponibilidade.

Às minhas amigas de infância, Ana Cristina, Larissa, Tatiane, Gabriela e Bruna, pelo apoio e amizade, e por compreenderem minha ausência.

À amiga de Tambaú, Mariela, pelo apoio, confiança e incentivo.

Às minhas amigas da FZEA, Cássia, Priscila e Danielle, pelo apoio, incentivo e amizade, que mesmo distantes se fizeram sempre presentes.

Aos amigos do PPGEQ/UFSCar, em especial, ao Felipe e a Ananda.

Aos amigos do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, pela amizade, ajuda e momentos de descontração.

Aos técnicos e funcionários do DEQ/UFSCar, pelo auxílio no desenvolvimento do projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da UFSCar, a CAPES e ao CNPq, pela oportunidade e apoio financeiro.

E a todos que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa etapa de minha vida, mesmo que seja impossível nomear a todos ou que me falhe a memória.

*“A tarefa não é tanto ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém pensou sobre algo que todos veem.”*  
*Arthur Schopenhauer*



## RESUMO

Visando contribuir para o desenvolvimento do processo de secagem, este trabalho teve por objetivo o estudo experimental sobre a secagem de grãos de cevada. Foram utilizadas neste estudo grãos de cevada (*Hordeum vulgare*) da variedade Cauê, material cujas informações na literatura são escassas, o que tornou necessária sua caracterização, pois é de grande importância o conhecimento das propriedades físicas do material como dimensões, forma, massa específica e porosidade, assim como sua dependência em relação a diferentes umidades iniciais. O estudo da cinética de secagem foi realizado em secador de leito fixo em camada fina com escoamento de ar ascendente. Ensaio preliminares foram realizados para determinação das condições operacionais do equipamento e para determinação da espessura da camada fina. Os experimentos de secagem consistiram na obtenção de dados de umidade e temperatura em função do tempo, avaliando a influência das principais variáveis operacionais de processo. A partir dos resultados obtidos nos experimentos de secagem, conduzidos com temperaturas de 40 a 50°C e velocidade do ar de 0,8 a 4,0 m/s, efetuou-se uma avaliação da influência da velocidade e da temperatura do ar de secagem, bem como, a maneira de reumidificação dos grãos de cevada sobre a cinética de secagem. Ajustaram-se modelos cinéticos (Modelo Difusivo, Page, Lewis, Herderson e Pabis e Overhults) aos dados experimentais. Embora os dados de coeficiente de determinação obtidos pelo Modelo Difusivo sejam maiores do que 0,9, os dados experimentais de umidade adimensional são subestimados na etapa intermédia até o final do processo de secagem. O Modelo de Page e o Modelo de Overhults são apropriados para representar a relação da umidade adimensional dos grãos em função do tempo de secagem, mas apresentaram uma superestimação dos dados ao final do processo.

## ABSTRACT

In order to contribute to the improvement of the drying process, the objective of this work was the experimental study on the drying of barley. Barley (*Hordeum vulgare*) grains of the variety Cauê have been used in this study, as consequence of the scarce information about this material, thus its characterization was necessary, due to the importance of the knowledge of the physical characteristics of the material, such as dimensions, shape, specific mass and porosity, as well as its dependence on different initial moisture contents. The study of the drying kinetics was carried out in a fixed bed dryer with upward air flow in a thin layer. Preliminary experiments were performed to determine the operating conditions of the equipment and to determine the thickness of the thin layer. Drying experiments consisted of obtaining moisture data and temperature versus time, evaluating the influence of the main process operating variables. Based on these data obtained in the drying experiments, carried out at temperatures from 40 to 50°C and air velocity from 0.8 to 4.0 m/s, the influence of the air velocity and temperature drying was evaluated, as well as the procedure of rehumidification of barley grains on the drying kinetics. Kinetic models (Diffusive, Page, Lewis, Herderson and Pabis and Overhults) were fit to drying experimental data. Although the determination coefficient data obtained by the diffusive model are higher than 0,9, experimental data of dimensionless moisture content are underestimated at the intermediate stage to the end of the drying process. The Page model and the Overhults model were appropriate to represent the grains dimensionless moisture content as a function of drying time, but showed an overestimation of the data at the end of the process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Grão de cevada, em corte longitudinal. (1) embrião, (2) ascopira rudimentar, (3) radícula rudimentares, (4) escutelo, (5) epitélio, (6) endosperma, (7) células vazias, (8) camada de aleurona, (9) testa, (10) pericarpo, (11) casca. ....	14
Figura 3. 1: Esquema da unidade experimental para estudo de secagem em leito fixo. ....	39
Figura 3. 2: Esquema da célula de medida. ....	41
Figura 3. 3: Célula de secagem. ....	42
Figura 4. 1: Fração mássica retida em cada peneira ....	49
Figura 4. 2: Disposição dos grãos de cevada para análise de imagem. ....	50
Figura 4. 3: Dimensões do grão (L, W, T' e B).....	51
Figura 4. 4: Área projetada em função da umidade em base seca. ....	52
Figura 4. 5: Área superficial em função da umidade em base seca. ....	53
Figura 4. 6: Perímetro em função da umidade em base seca. ....	54
Figura 4. 7: Volume em função da umidade em base seca.....	55
Figura 4. 8: Circularidade em função da umidade em base seca. ....	55
Figura 4. 9: Esfericidade em função da umidade em base seca. ....	56
Figura 4. 10: Massa de 1000 grãos de cevada em função da umidade em base seca.....	57
Figura 4. 11: Volume de 1000 grãos de cevada em função da umidade em base seca.....	58
Figura 4. 12: Massa específica real em função da umidade em base seca. ....	59
Figura 4. 13: Massa específica aparente em função da umidade em base seca. ....	59
Figura 4. 14: Densidade bulk em função da umidade em base seca. ....	60
Figura 4. 15: Porosidade da partícula em função da umidade em base seca. ....	61
Figura 4. 16: Porosidade bulk em função da umidade em base seca. ....	62
Figura 4. 17: Porosidade total em função da umidade em base seca. ....	62
Figura 4. 18: Temperatura em função do tempo para diferentes espessuras do meio. ....	64
Figura 4. 19: Umidade adimensional em função do tempo para espessuras diferentes.....	65

Figura 4. 20: Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na temperatura do ar: reumidificação lenta. ....	67
Figura 4. 21: Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na temperatura do ar: reumidificação rápida. ....	67
Figura 4. 22: Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na velocidade do ar: reumidificação lenta. ....	68
Figura 4. 23: Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na velocidade do ar: reumidificação rápida. ....	68
Figura 4. 24: Cinética de secagem para diferentes umidades iniciais: (a) T = 40°C; (b) T = 45°C; (c) T = 50°C. ....	69
Figura 4. 25: Cinética de secagem: (a) X1 = 0,36 (g <sub>água</sub> /g <sub>sól. seco</sub> ); (b) X2 = 0,27(g <sub>água</sub> /g <sub>sól. seco</sub> ) e (c) X3 = 0,16 (g <sub>água</sub> /g <sub>sól. seco</sub> ). ....	70
Figura 4. 26: Dados de cinética de secagem observados e preditos pelo modelo difusivo. ....	71
Figura 4. 27: Difusividade efetiva em função da temperatura para diferentes umidades iniciais. ....	73
Figura 4. 28: Correlação do tipo Arrhenius entre o coeficiente de difusividade efetiva e temperatura. ....	74
Figura 4. 29: Curvas de secagem ajustadas pelo Modelo de Page e Modelo de Overhults. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2 . 1: Composição do grão de cevada seco. ....	15
Tabela 2 . 2: Equações de cinética de secagem.....	30
Tabela 3. 1: Condições operacionais para a secagem em secador de leito fixo e camada fina. ....	44
Tabela 4. 1: Propriedades físicas dos grãos de cevada.....	48
Tabela 4. 2: Frações mássicas retidas nas peneiras .....	49
Tabela 4. 3: Resumo dos resultados do teste t de Student para as dimensões. ....	52
Tabela 4. 4: Resumo dos resultados do teste t de Student para a área projetada, área superficial, perímetro e volume. ....	53
Tabela 4. 5: Resumos dos resultados do teste t de Student para os fatores de forma. ....	56
Tabela 4. 6: Classificação dos grãos pela circularidade. ....	56
Tabela 4. 7: Resumo dos resultados do teste t de Student para a massa e o volume de 1000 grãos de cevada.....	58
Tabela 4. 8: Resumo dos resultados do teste t aplicado as médias das medidas de massa específica e densidade dos grãos de cevada. ....	60
Tabela 4. 9: Resumo dos resultados do teste t aplicado as médias calculadas de porosidade.....	63
Tabela 4. 10: Reprodutibilidade dos dados de cinética de secagem.....	66
Tabela 4. 11: Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo difusivo.....	72
Tabela 4. 12: Parâmetros da correlação do tipo Arrhenius. ....	75
Tabela 4. 13: Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Page.....	75
Tabela 4. 14: Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Lewis.....	76
Tabela 4. 15: Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Henderson e Pabis. ....	76
Tabela 4. 16: Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Overhults.....	77

## NOMENCLATURA

<i>a</i>	- parâmetro da equação de Henderson e Pabis	[ - ]
<i>B</i>	- diâmetro da parte esférica	[ mm ]
$\bar{D}$	- 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]
$Ea$	- energia de ativação	[ Jmol <sup>-1</sup> ]
$K_0$	- 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<sub>P</sub></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> ]
<i>L</i>	- espessura da célula de secagem [m]	[m]
$L'$	- comprimento	[ mm ]
$MR$	- 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	[ - ]
<i>R</i>	- constante universal dos gases ideais	[Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<i>S</i>	- área superficial	[ mm <sup>2</sup> ]
<i>T</i>	- tempo	[min]
<i>T</i>	- temperatura	[ °C ]
$\bar{T}$	- temperatura	[K]
$T'$	- espessura	[ mm ]
<i>V</i>	- volume	[ mm <sup>3</sup> ]

$W$	- largura	[ mm ]
$X$	- umidade do grão	[ - ]
$X_{eq}$	- umidade de equilíbrio	[ - ]
$\bar{X}$	- umidade média volumétrica do sólido	[ - ]

### Subscritos

F	- fluido
S	- sólido
bs	- base seca
bu	- base úmida

### Símbolos Gregos

$\varepsilon_b$	- 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	[-]
$\chi^2$	- chí-quadrado	[-]

### Abreviatura

b.s.	- base seca	[g <sub>água</sub> /g <sub>sólido seco</sub> ]
------	-------------	--

b.u.	- base úmida	[g <sub>água</sub> /g <sub>sólido úmido</sub> ]
C.C.	- condição de contorno	
C.I.	- condição inicial (t = 0)	
exp	- experimental	
MSE	- erro parcial médio	
pred	- predito	
RMSE	- raiz quadrada do erro médio	
R <sup>2</sup>	- coeficiente de determinação	



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1 Características do grão de cevada .....	13
2.2 Caracterização dos grãos .....	16
2.2.1 Dimensões características .....	16
2.2.2 Umidade .....	19
2.2.3 Massa específica .....	20
2.2.4 Porosidade.....	22
2.2.5 Reumidificação dos grãos .....	23
2.3 Secagem de grãos .....	23
2.3.1 Aspectos tecnológicos.....	23
2.3.2 Secador de leito fixo.....	24
2.4 Transferência de Calor e Massa: Cinética de Secagem.....	25
2.4.1 Secagem em camada fina .....	26
2.4.2 Equações para secagem em camada fina .....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Material e sua preparação.....	32
3.2 Caracterização.....	33
3.2.1 Determinação de umidade.....	34
3.2.2 Análise Granulométrica .....	34
3.2.3 Dimensões.....	35
3.2.4 Massa específica real.....	35
3.2.5 Massa específica aparente.....	36
3.2.6 Densidade do leito ( <i>bulk</i> ).....	37
3.2.7 Massa e Volume de 1000 grãos de cevada .....	37
3.2.8 Porosidades .....	37
3.3 Unidade Experimental de Secagem.....	38
3.3.1 Ensaio preliminares .....	42
3.3.2 Cinética de secagem.....	43
3.3.2.1 Determinação da espessura da camada fina .....	43
3.3.2.2 Secagem em leito fixo e camada fina .....	43
3.4 Reprodutibilidade .....	45

3.5 Estimativa dos Parâmetros.....	45
3.6 Análise Estatística.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
4.1 Características dos grãos de cevada.....	48
4.1.1 Análise Granulométrica .....	49
4.1.2 Análise de Imagens.....	50
4.1.3 Massa e Volume de 1000 grãos de cevada .....	57
4.1.4 Medidas de massa específica e densidade do leito (bulk) .....	59
4.1.5 Encolhimento .....	63
4.2 Cinética de Secagem .....	64
4.2.1 Determinação da camada fina.....	64
4.2.2 Secagem em leito fixo e camada fina .....	65
5 CONCLUSÕES .....	79
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	81
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

## 1 INTRODUÇÃO

A cevada (*Hordeum vulgare*) é um cereal de inverno e ocupa a quinta posição de importância econômica no mundo. O grão é utilizado na produção de bebidas, composição de farinhas e para fabricação de ração animal (BRASIL, 2013). A cevada é considerada o cereal mais adequado para a produção de malte e cervejas, pois apresenta um elevado conteúdo de amido, uma taxa elevada de enzimas e um teor adequado de proteínas, além de ter alta resistência a doenças e sua casca funcionar como proteção (PINTO, 2013).

No Brasil, a principal aplicação econômica é a produção de malte de cevada. O país produz apenas 38,20% da demanda nacional (DE MORI e MINELLA, 2013).

Segundo Kunze (2004), a umidade da cevada na colheita está sujeita a grandes variações, podendo variar de 12 % a mais de 20%. A cevada armazenada úmida perde sua capacidade germinativa e produz maltes de baixa qualidade. Assim, cevada com umidade superior a 12% deve passar pelo processo de secagem antes do armazenamento.

Para a secagem, a escolha de um equipamento e condições operacionais adequadas é de fundamental importância para a preservação das qualidades físicas e fisiológicas dos grãos. O secador de leito fixo minimiza impactos mecânicos, proporciona controle do processo, tem a vantagem de ser necessário um baixo investimento inicial e a secagem e armazenamento podem ser realizadas no mesmo silo, e ao final do processo de secagem, o material tem valor agregado, pois tem-se um produto com maior qualidade.

Dentro do contexto apresentado, o propósito deste trabalho é estudar os fenômenos de transferência de calor e massa que se estabelecem durante o processo de secagem dos grãos de cevada em um secador de leito fixo e camada fina.

Primeiramente, foram realizados ensaios de caracterização dos grãos de cevada, determinando-se propriedades físicas, como umidade, dimensões, massa, volume, forma, massa específica e porosidade.

Paralelamente, ensaios preliminares de secagem foram realizados no secador de leito fixo para conhecer as limitações do equipamento quanto a velocidade e temperatura do ar de secagem.

Finalmente, os estudos de secagem dos grãos de cevada realizados em secador de leito fixo e camada fina, forneceram as curvas experimentais de umidade e temperatura em função do tempo. Os dados experimentais foram simulados pelo modelo difusivo e por equações semi-empíricas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características do grão de cevada

A cevada (*Hordeum vulgare*) é um cereal de inverno e ocupa a quinta posição de importância econômica no mundo. O grão é utilizado na produção de bebidas, como cerveja e destilados, na composição de farinhas para panificação, na produção de medicamentos e nas fórmulas de produtos dietéticos. É também utilizada como alimentação animal, forragem verde e na fabricação de ração (BRASIL, 2013).

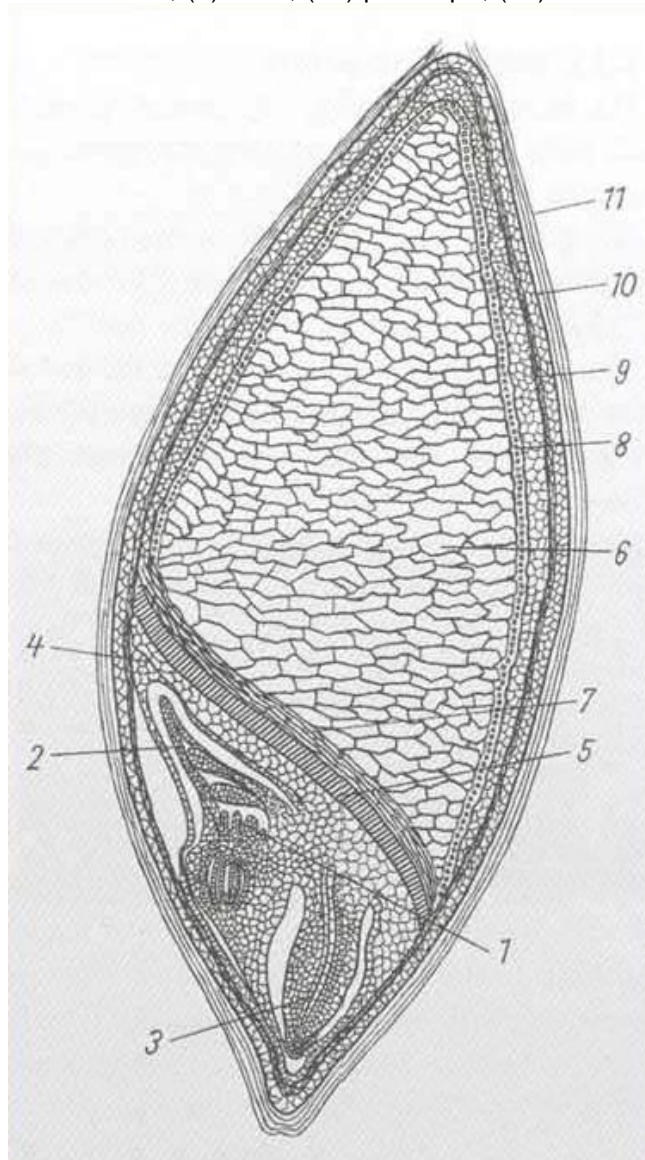
No Brasil, a produção concentra-se na Região Sul, mas há registros nos estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Atualmente, a cevada é cultivada em mais de 140 mil hectares, produzindo 380 mil toneladas (BRASIL, 2013). De acordo com De Mori e Minella (2013), a malteação é a principal aplicação econômica da cevada. Do total produzido anualmente, 75% é para fabricação de malte, e 95% deste é destinada a produção de cerveja. No país, há três maltarias (Agromalte – Agrária em Guarapuava – PR; ImBev – Maltaria Navegantes em Porto Alegre – RS e Maltaria do Vale em Taubaté – SP) com produção anual de 425mil toneladas de malte, que correspondem a apenas 38,20% da demanda nacional.

A cevada é considerada o cereal mais adequado para a produção de malte e cervejas, pois apresenta um elevado conteúdo de amido, uma taxa elevada de enzimas e um teor adequado de proteínas, além de ter alta resistência a doenças e sua casca funcionar como proteção, pois é a camada mais externa, rígida e insolúvel, protegendo os grãos de danos mecânicos (PINTO, 2013).

As características organolépticas (cor, sabor, odor e textura) da cevada são atraentes. Suas espigas são semelhantes as do trigo, porém mais claras. O grão é composto basicamente por três porções: envoltório (pericarpo e testa, 10 e 9 na Figura 2.1, respectivamente), endosperma (6 na Figura 2.1) e embrião (1 na Figura 2.1). O objetivo do envoltório é proteger o grão durante o período de colheita até o final da malteação, pois possibilita que a parte interna do grão se mantenha úmida. O endosperma é a fonte de nutrientes do embrião, é a parcela com maior quantidade de carboidratos e proteínas e pequenas

quantidades de minerais e vitaminas. A principal substância de reserva hidrocarbonada é o amido. O embrião representa a parte viva do grão, é ele que irá germinar durante o processo de malteação e contém vitaminas do complexo B, proteínas, minerais e lipídeos (MAYER, 2007; PORTO, 2011).

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



Fonte: Kunze, 2004.

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 12% (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. Portanto, cevada contendo mais do que 12% de umidade deve passar pelo processo de secagem antes do armazenamento.

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 as paredes celulares. E existe cerca de 1,8 a 2,0% de açúcares, carboidratos de baixo peso molecular como sacarose, maltose, glicose e frutose, são normalmente usados no início do crescimento da planta (KUNZE, 2004).

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 e no Brasil o limite é de 11,5% em peso de substância seca (SANTOS, 1999; PORTO, 2011).

O material inorgânico encontrado no grão de cevada apresenta-se na forma de compostos inorgânicos, como fosfatos, silicatos e sais de potássio (KUNZE, 2004).

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 (PORTO, 2011).

O grão de cevada possui pequenas quantidades de enzimas, podem ser encontradas alfa e beta amilases. As enzimas exercem papel fundamental para a fabricação de cervejas, pois são responsáveis pela transformação das substâncias insolúveis estocadas no endosperma da cevada em substâncias solúveis durante o processo de malteação e de produção de cerveja. Essas enzimas produzem 75% dos açúcares fermentáveis e 25% de açúcares não fermentáveis, que é a composição ideal para a fabricação de cerveja (KUNZE, 2004; SANTOS, 1999).

## **2.2 Caracterização dos grãos**

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

### **2.2.1 Dimensões características**

Em muitas situações não é fácil definir as dimensões das partículas, devido à sua forma muito irregular. Quando as partículas possuem forma esférica é relativamente simples definir seu diâmetro, pois a esfera é uma forma geométrica que consegue ter seu volume descrito com apenas uma coordenada (SOUZA, 2007). Existem vários critérios e diversas formas de medir as dimensões das partículas, cada uma com suas vantagens e desvantagens.

Vários pesquisadores utilizam micrômetro e paquímetro para determinar o tamanho de grãos e sementes. Pereira (2010) utilizou um



paquímetro para as medidas de comprimento, largura e espessura de sementes de painço.

Quando se deseja obter dimensões representativas da amostra, como o tamanho das partículas, uma técnica comumente utilizada é o peneiramento por agitação mecânica. Esta técnica foi utilizada por Fumagalli (2007), Pereira (2010), Corrêa et al. (2013) e Felizardo (2014) com sementes de gramíneas, de painço, de cevada e de embaúba, respectivamente. A partir do peneiramento é possível realizar uma análise granulométrica das partículas, classificar as sementes em relação ao diâmetro e a partir da massa de sementes retirada em cada peneira é possível calcular o diâmetro médio de Sauter através da Equação 1.

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

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 de um material, segundo Arnosti Jr. (1997), pode ser determinado pela 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 de análise de imagens 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 (ARNOSTI JR, 1997). Para Allen (1990) não há uma vantagem definida para utilização de qualquer das dimensões analisadas, seja diâmetro de Feret, raio de Martin e diâmetro da área projetada.

Com a ampla disponibilidade de utilização de computadores e de *softwares* de análise de imagens, passou-se a utilizar fotografias digitais para

analisar tamanho e forma das partículas de maneira rápida e fácil (SOUZA, 2007).

Fumagalli (2007) utilizou o *software* de análise de imagens – *Image Pro Plus 6*, que forneceu a área projetada, o perímetro, o comprimento e a largura das sementes de gramíneas. Pereira (2010) utilizou para medidas de área e perímetro das sementes de painço. Prado (2004) utilizou o *software* para obter os dados de diâmetro linear máximo e diâmetro de partícula projetadas das sementes de mamão papaia com e sem mucilagem. Felizardo (2014) utilizou o *software* para obter dados da área projetada, perímetro e diâmetro de Feret mínimo, máximo e médio para sementes de embaúba. Corrêa et al. (2013) determinou o diâmetro médio, perímetro, comprimento, largura e área projetada dos grãos de cevada.

Obtidos os dados de comprimento ( $L'$ ), largura ( $W$ ) e espessura ( $T'$ ), pode-se calcular o diâmetro da parte esférica, volume, área superficial e esfericidade utilizando as seguintes equações (MOHSENIN, 1970):

- diâmetro da parte esférica:

$$B = \sqrt{W \cdot T'} \quad (2)$$

- volume:

$$V = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot L'^2}{6(2L' - B)} \quad (3)$$

- área superficial:

$$S = \frac{\pi \cdot B \cdot L'^2}{2L' - B} \quad (4)$$

- esfericidade:

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{W \cdot T' \cdot L'}}{L'} \quad (5)$$

Além da Equação 5, as técnicas de picnometria e de análise de imagens também são bastante utilizadas para determinação da esfericidade da partícula, que é um parâmetro para caracterizar a forma das partículas.

Sartori (1986), utilizando picnometria, determinou a esfericidade da soja, milho, arroz, vidro e areia com a Equação 6.

$$\phi = \frac{D_p}{D_l} \quad (6)$$

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

A circularidade ( $\vartheta$ ) é comumente utilizada para a determinação indireta da esfericidade, pois a análise de imagens fornece as medidas de circularidade, e uma vez conhecida a circularidade do material pode-se obter a esfericidade, conforme a Equação 7.

$$\phi = \frac{1}{\vartheta} = \frac{A_p 4 \pi}{P^2} \quad (7)$$

Appel (1996), Costa (1996) e Fumagalli (2007) determinaram a esfericidade de grãos de soja, areia e gramínea, respectivamente, com os dados da  $A_p$  (área projetada) e do  $P$  (perímetro) fornecidos pelo *software*, utilizando a Equação 7.

Os resultados obtidos por Appel (1996) foram muito próximos aos encontrados por Sartori (1986), mesmo utilizando técnicas diferentes.

### 2.2.2 Umidade

A quantidade de água e matéria seca contida no grão pode apresentar diferentes proporções. A umidade pode ser expressa em base úmida (b.u.), ou seja, é a relação da massa de água contida no grão em relação à massa total, ou em base seca (b.s.), que é a relação da massa de água contida no grão em relação à massa de matéria seca ( FELLOWS, 2006). Assim:

$$X_{bu} = \frac{m_A}{m_T} \cdot 100 = \frac{m_A}{m_A + m_{SS}} \cdot 100 \quad (8)$$

$$X_{bs} = \frac{m_A}{m_{SS}} \quad (9)$$

Em que,  $m_A$  é a massa de água,  $m_{SS}$  é a massa de sólido seco,  $m_T$  é a massa total do sistema (massa úmida),  $X_{bu}$  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 (básicos) ou métodos indiretos (práticos). Segundo Melo (2001), nos métodos diretos, a água contida no grão é retirada através da vaporização por aquecimento da amostra, sob 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, são baseados em propriedades dos grãos relacionados ao seu conteúdo de água, 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.

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 do material, entre eles, Barrozo (1995), Arnosti Jr. (1997), Prado (2000), Fumagalli (2007) e Corrêa et al. (2013).

### 2.2.3 Massa específica

Para materiais particulados, como grãos e sementes, existem três definições de massa específica.

- **Massa específica real ou absoluta:** dada pela razão entre a massa do material e o seu volume sólido, de acordo com a Equação 10. Em que 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).

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

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

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

- **Massa específica do leito ou densidade bulk:** dada pela razão entre a massa de partículas e o volume do leito empacotado, dado pela Equação 12.

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

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).

Os métodos utilizados na determinação da massa específica real de grãos e sementes variam de pesquisador para pesquisador.

Chang (1988), Prado (2004) e Pereira (2010) utilizaram picnometria gasosa a Hélio para determinar a massa específica real. A técnica de picnometria gasosa a Hélio é a mais utilizada, pois o gás Hélio é capaz de penetrar nos poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula e o que não é penetrado pelo gás é considerado como volume sólido, poucos poros fechados podem não ser atingidos pelas moléculas de Hélio (KARATHANOS et al., 1996).

Alguns pesquisadores utilizam picnometria líquida para determinar a massa específica real, mas esta técnica não é a mais indicada, pois o material pode absorver o líquido utilizado e líquidos que possuem alta tensão superficial podem ter dificuldades em penetrar os poros dos materiais (LIMA, 2013).

A massa específica aparente de grãos e sementes é comumente determinada pela técnica de picnometria líquida, que depende da imersão do sólido num líquido inerte de densidade conhecida. Geralmente utiliza-se água, hexano ou tolueno como líquido de referência, entretanto, o uso da água como líquido de referência para materiais altamente higroscópicos pode resultar em erros (MOHSENIN, 1970). Assim, a escolha do líquido deve levar em consideração a interação existente entre o sólido e o líquido, para evitar que este seja facilmente absorvido, influenciando a determinação da massa específica aparente do material. Solventes orgânicos têm sido utilizados como líquidos de referência, devido à baixa tendência de penetrar no interior dos sólidos (LIMA, 2013).

Fumagalli (2007) e Pereira (2010) determinaram a massa específica aparente de sementes de gramíneas e painço, respectivamente, por picnometria líquida com hexano. Vieira (2012) utilizou isopranoal nos grãos de linhaça e Corrêa et al. (2013) utilizou tolueno para determinar a massa específica de grãos de cevada.

#### 2.2.4 Porosidade

Com base nas definições de massa específica, podemos distinguir três tipos de porosidade: porosidade da partícula, porosidade bulk e porosidade total do leito (PRADO, 2004).

- **Porosidade da partícula:** dada pela relação entre o volume de poros abertos e o volume total de partículas.

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

- **Porosidade *bulk***: dada pela relação entre o volume de vazios de ar interpartículas e o volume total do leite.

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

- **Porosidade total**: dada pela relação entre o volume de poros abertos intrapartículas e de vazios de ar interpartículas e o volume total do leite.

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

### 2.2.5 Reumidificação dos grãos

A aquisição de grãos recém-colhidos seria o ideal para o estudo da secagem, porém muitas vezes torna-se inviável. Uma forma de reproduzir a umidade dos grãos logo após a colheita é a reumidificação dos grãos.

Barrozo (1995), Arnosti Jr, (1997), Fumagalli (2007), Pereira (2010) e Vieira (2012), utilizaram grãos reumidificados artificialmente em seus trabalhos.

## 2.3 Secagem de grãos

### 2.3.1 Aspectos tecnológicos

A secagem de grãos é feita com o intuito de se reduzir a atividade da água do material, para que o grão não sofra contaminações microbiológicas, tendo mais durabilidade após a colheita.

A secagem pode ser realizada de duas maneiras, natural ou artificial. A secagem natural é realizada no próprio campo, expondo o material aos raios solares, sujeita a todas as intempéries, principalmente as chuvas e contaminações microbiológicas. Já a secagem artificial utiliza-se de equipamentos, os secadores, para promover a secagem dos grãos, o que acelera e melhora o processo de secagem.

### 2.3.2 Secador de leito fixo

O secador de leito fixo é muito utilizado em regiões agrícolas, devido à necessidade de se secar os grãos após a colheita e armazená-los. A implantação desse tipo de secador é de baixo custo e de fácil construção, e sua operação também é simples.

Os secadores de leito fixo são constituídos por uma coluna cilíndrica, com a base de material perfurado, para que o ar possa passar. É acoplada a base perfurada um ventilador, responsável pela distribuição uniforme do gás na coluna. As partículas são depositadas 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 que se tem pouca informação, auxiliando no entendimento dos fenômenos de transferência de calor e massa. Segundo Prado (2000), a secagem em leito fixo e camada espessa é largamente utilizada devida sua simplicidade para construção e operação. Sendo assim, a modelagem desses sistemas torna-se imprescindível para projetos e construção de secadores de leito fixo, já que permitem dados mais próximos dos processos em grande escala.



Contudo, a secagem em secador de leito fixo é um processo complexo, que envolve a transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o produto. Um dos principais objetivos de se compreender este processo de secagem é ser capaz de prever as distribuições de umidade e temperatura dentro do leito (RUIZ-LÓPEZ et al., 2008).

#### **2.4 Transferência de Calor e Massa: Cinética de Secagem**

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. 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).

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 a taxa de secagem, que são utilizados na modelagem dos fenômenos de transferência (PRADO, 2000).

Quando as informações sobre o comportamento cinético da secagem de determinado material é escasso, 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).

Segundo Fellows (2006) e Prado (2000), observa-se em experimentos de secagem em camada fina, dois ou mais períodos distintos de secagem. Inicialmente, em materiais com elevada umidade, a água se movimenta do interior do alimento na mesma taxa em que é evaporada da superfície, período conhecido como período a taxa constante, que continua até uma dada umidade crítica. Quando a umidade do material cai além do valor crítico, a taxa de secagem decresce lentamente, até o material ficar em equilíbrio com o ar de secagem, período conhecido como período de taxa decrescente.

Materiais higroscópicos possuem dois ou mais períodos em que a taxa de secagem é decrescente.

Os cereais raramente apresentam o período de secagem à taxa constante, a menos que sejam colhidos imaturos ou sofram algum processo de umidificação excessiva. Sendo assim, é de se esperar que os mecanismos internos de transferência de umidade tenham bastante relevância na análise do processo de secagem (BARROZO, 1995)

A maioria dos danos causados pelo calor aos materiais acontece durante o período de taxa decrescente, assim, a temperatura do ar é controlada para equilibrar a taxa de secagem e diminuir os danos provocados pelo calor (FELLOWS, 2006).

#### **2.4.1 Secagem em camada fina**

Nos experimentos de secagem em camada fina, ar em condições constantes de umidade, temperatura e fluxo mássico atravessa uma fina camada do material úmido.

Equações para camada fina contribuem para entender os fenômenos de transferência de calor e massa em produtos agrícolas e na modelagem matemática para projetar novos secadores ou melhorar os já existentes (JAYAS et al., 1991).

O modelo de cinética de secagem em camada fina tem sido aplicado para (JAYAS et al., 1991):

- 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 assim:

- 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.

Então, 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.

#### **2.4.2 Equações para secagem em camada fina**

Para descrever a cinética de secagem em camada fina, na literatura, são encontrados diversos modelos, há os modelos difusivos fundamentais ou teóricos, os modelos empíricos e semi-empíricos, 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**

No processo de secagem, a umidade é removida do sólido e transferida para uma fase gasosa insaturada sob a ação de diferentes mecanismos de transporte de calor e massa. Para se obter informações quantitativas a respeito do transporte de umidade, é necessário a determinação dos parâmetros de transporte de massa. A difusividade efetiva, estimada a partir do modelo difusivo, é um parâmetro mássico tradicionalmente obtido com abordagem teórica do problema a partir de uma equação similar a da Segunda Lei de Fick (EFREMOV et al., 2008), tendo a  $D_{ef}$  no lugar da difusividade ordinária.

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, 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:

$$\text{C.I : } X = X_0 \text{ em } t = 0, 0 < z < L$$

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

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

Com respeito às condições de contorno, deve-se mencionar que:

- para a condição de contorno 1, fez-se uma analogia a simetria térmica utilizada em transferência de calor. Considerou-se uma placa plana infinita de espessura  $2L$ , que seca simetricamente, ou seja, o problema é considerado simétrico em relação ao plano central, em  $z = 0$ . Então por hipótese, para qualquer valor de  $-z$  para  $-L \leq z \leq 0$  a qualquer momento  $t$  dever ser igual ao valor de  $+z$  para  $0 \leq z \leq L$ , no mesmo tempo. Isso significa que pode-se formular e resolver o problema da transferência de massa no domínio positivo. Assim, o plano central é visto como uma superfície impermeável, e a condição de contorno em  $z = 0$  é expressa por C.C.1.

- e em estudos de secagem de material biológico, a resistência externa à transferência de massa é geralmente considerada desprezível, o coeficiente convectivo de transferência de massa é elevado o bastante para que uma

condição de contorno do tipo convectiva possa ser dispensada, o que implica que a superfície do sólido atinge instantaneamente o equilíbrio, isto é, 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, pois em estudos de camada fina o que se obtém 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:

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

## Modelos empíricos e semi-empíricos

Segundo Fumagalli (2007), os modelos empíricos são baseados em resultados experimentais e têm uma relação direta entre a umidade e o tempo de secagem, já os modelos semi-empíricos são análogos à lei de resfriamento de Newton e assumem que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre a umidade atual e a umidade de equilíbrio do material.

A Tabela 2.2, apresenta as principais equações de cinética de secagem utilizadas para grãos.

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

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
Page	$MR = \exp(-K_p t^{n_p})$
Lewis	$MR = \exp(-K_L t)$
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-K_{HP} t)$
Overhults	$MR = \exp[-(K_O t)^{n_o}]$

Fonte: Barrozo, 1995.

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).

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 21. 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 22 (BROKKER et al., 1992; BARROZO, 1995; VIEIRA, 2012).

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (21)$$

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

Explicitamente sobre a secagem de grãos de cevada, foram encontradas na literatura pesquisas que analisaram: as propriedades físicas dos grãos secos (JAYAS e CENKOWSKI, 2006; CORRÊA et al., 2013); as características bromatológicas e qualidade fisiológica dos grãos (MAYER, 2007; TUNES et al., 2010); aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada (DE MORI e MINELLA, 2013); a ciência e tecnologia da fabricação de malte de cevada e cerveja (SANTOS, 1999; BRIGGS et al., 2004; KUNZE, 2004; PORTO, 2011; PINTO, 2013); secagem de grãos e ajuste de modelos (BRUCE, 1985). Porém, a análise da influência de parâmetros, como umidade inicial do grão, temperatura do ar de secagem e velocidade do ar de secagem, sobre a cinética de secagem dos grãos de cevada não foi encontrada na literatura até o momento.

Assim, após a revisão bibliográfica relacionada ao processo de secagem de grãos, foi possível o desenvolvimento do presente trabalho, e no Capítulo 3 são apresentadas as metodologias empregadas para a caracterização em função da umidade e a secagem de grãos de cevada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e as metodologias experimentais que foram utilizadas neste trabalho.

#### 3.1 Material e sua preparação

O material utilizado no trabalho foram grãos de cevada (*Hordeum vulgare*), variedade Cauê. Os grãos foram adquiridos da Cooperativa Agrária Agroindustrial, localizada no Distrito de Entre Rios – Guarapuava/Paraná. Os grãos utilizados pertenciam ao mesmo lote.

Uma vez que é difícil obter grãos recém-colhidos, os grãos adquiridos já haviam sido submetidos à secagem prévia. Assim, para obter a relação das propriedades físicas dos grãos em função da sua umidade foi feita a reumidificação dos grãos.

#### ***Ensaio preliminares de reumidificação***

Antes de reumidificar as amostras que seriam utilizadas nos experimentos, um ensaio preliminar foi realizado para verificar o comportamento dos grãos após a reumidificação.

Este ensaio consistiu em verificar se a umidade do grão se manteria constante com o passar dos dias e se o armazenamento em geladeira era apropriado.

Uma quantidade de grãos de massa e umidade iniciais conhecidas foi colocada dentro de um pote plástico e foi adicionada a massa calculada de água, através de um balanço de massa (VIEIRA, 2012), de modo que a umidade final fosse pré-estabelecida. Após aproximadamente 2 horas a água adicionada foi absorvida. Os grãos foram então separados em oito amostras, destas, sete foram colocados dentro de potes hermeticamente fechados e armazenados em geladeira. Ao final do processo de reumidificação já foi realizada a primeira medida de umidade pelo método da estufa e novas medidas de umidade foram realizadas após 24 horas, 48 horas, 72 horas, 7 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias.



Ao final das oito medidas chegou-se a conclusão que o valor da umidade dos grãos mantinha-se constante.

### ***Reumidificação***

Como o valor da umidade após a reumidificação e depois de armazenada em geladeira mantinha-se constante, para verificar se o tempo após a reumidificação altera as características de cinética de secagem foram utilizados dois procedimentos para reumidificar os grãos, que chamaremos de reumidificação lenta e reumidificação rápida.

#### *Reumidificação lenta*

Seguiu o procedimento descrito anteriormente, baseado em Vieira (2012) e os potes foram mantidos em geladeira doméstica por 24 horas para distribuição da umidade. Posteriormente, três amostras de grãos em posições diferentes foram retiradas e foram analisadas quanto à umidade através do método de estufa, verificando assim que as umidades nas três posições eram iguais à calculada previamente. As amostras permaneceram armazenadas em geladeira até serem utilizadas nos experimentos.

#### *Reumidificação rápida*

Também seguiu o procedimento descrito anteriormente, mas na reumidificação rápida os grãos foram utilizados após total absorção, não havendo a etapa de armazenamento dos grãos em geladeira.

## **3.2 Caracterização**

Os grãos foram adquiridos com umidade inicial ( $X_{bu}$ ) de 10%. Em seguida, foram reumidificados em três umidades diferentes, que foram escolhidos com base no fato que a umidade da cevada sofre variações devido a

fatores climáticos, temporais e genéticos, podendo variar de 12% a 25% (base úmida) (KUNZE, 2004; TUNES et al., 2010).

As umidades escolhidas foram: X1 = 26% (b.u.), X2 = 21% (b.u.) e X3 = 13% (b.u.), valores que estão na faixa de variação da umidade descrito na literatura.

As propriedades medidas em função da umidade são descritas a seguir.

### **3.2.1 Determinação de umidade**

A umidade dos grãos foi determinada pelo método da estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24 horas.

O método de referência é o da AOAC (2002), em que amostras com peso de aproximadamente 3,00 g, em triplicata, foram pesadas em placa de petri previamente seca e tarada. O transporte da placa de petri sempre foi feito com papel para não passar a umidade da mão para a placa. As amostras foram então colocadas na estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, tempo suficiente para ter peso constante, ou seja, para que toda água seja evaporada. Após 24 horas, as placas de petri foram retiradas da estufa e colocadas em um dessecador para esfriar. As placas com as amostras foram pesadas depois de frio. O peso da água evaporada é igual à diferença entre o peso da amostra úmida e o peso da amostra seca.

### **3.2.2 Análise Granulométrica**

A análise granulométrica para determinar o diâmetro médio de Sauter ( $\bar{D}$ ) foi realizada utilizando um agitador da marca Retsch AS 200 Control com peneiras de 5, 6, 7, 8 e 10 mesh para medidas de aberturas de malha de 4,00 mm, 3,35 mm, 2,80 mm, 2,36 mm e 2,00 mm, respectivamente, da marca Retsch.

Amostras de aproximadamente 300,0 gramas de grãos de cevada foram peneiradas por 20 minutos. Realizaram-se os experimentos em triplicata

para cada umidade inicial ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ). Com a massa de grão retida em cada peneira foram calculadas suas respectivas frações mássicas e obtida uma média de cada fração calculada. Com este valor foi calculado o diâmetro médio de Sauter ( $\bar{D}$ ) pela Equação 1.

### 3.2.3 Dimensões

As dimensões e a circularidade das partículas foram determinadas por análise de imagens com auxílio do *software* Image Pro Plus 6®. As imagens dos grãos de cevada foram obtidas com uma câmera digital Samsung com definição de 12.2 megapixels. Os grãos foram dispostos, em arranjos de 5x5 grãos (25 grãos por amostra), sobre um fundo preto com uma régua. A medida da régua foi referência para relação de pixel da imagem e medida em milímetros pelo *software*. Para cada umidade inicial foram realizadas análise de imagens em triplicatas.

Os parâmetros determinados pelo *software* foram a área projetada, o perímetro, a largura, o comprimento, espessura e a circularidade dos grãos. E com os dados obtidos foi possível calcular o diâmetro da parte esférica (Equação 2), o volume (Equação 3), a área superficial (Equação 4) e a esfericidade (Equação 7).

### 3.2.4 Massa específica real

A massa específica real foi determinada por picnometria gasosa a Hélio em picnômetro Ultracycrometer 1000 Quantachrome Instruments, cujo princípio de operação baseia-se no deslocamento de gás pelo sólido (Princípio de Arquimedes).

As amostras preenchem 2/3 do copo de medida do aparelho, aproximadamente 4,5 gramas de amostra. O equipamento foi programado para realizar 10 corridas simultâneas com a mesma amostra e ao final do processo apresentava o volume médio e a massa específica real média. Foram realizadas triplicatas para cada umidade inicial.

### 3.2.5 Massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada por picnometria líquida com hexano. Foram realizadas triplicatas para cada umidade inicial.

Primeiramente, o picnômetro, limpo e seco, foi pesado vazio e sua massa anotada. Para calibrar o picnômetro, ele foi completado com água destilada, de modo que não houvesse bolhas de ar aprisionadas em seu interior. O líquido externo presente no picnômetro foi seco com papel e o picnômetro foi pesado novamente. Após a pesagem verifica-se a temperatura da água no interior do picnômetro. Com a massa do picnômetro com água e a massa do picnômetro vazio obteve-se a massa de água, e com a temperatura da água obteve-se a densidade absoluta da água. Assim, o volume do picnômetro foi determinado.

Como o hexano foi utilizado como líquido de referência, sua densidade foi determinada. Para isso, encheu-se o picnômetro com hexano, com atenção para não haver bolhas de ar, enxugou-se o excesso externo e pesou-se. Assim, com massa de hexano e o volume do picnômetro, obteve-se a densidade.

O picnômetro, limpo e seco, foi pesado e sua massa anotada. Aproximadamente 11,0 gramas de grãos de cevada foram colocadas no picnômetro e novamente pesou-se (picnômetro + grãos). O picnômetro foi completado com hexano, verificando-se para não haver bolhas de ar. Enxugou-se o excesso externo e pesou-se a massa total. Assim, obteve-se o valor da massa de hexano ( $m_{\text{hex}} = m_{\text{total}} - m_{(\text{picnômetro} + \text{cevada})}$ ) e calculou-se o volume de hexano ( $V_{\text{hex}} = m_{\text{hex}} / \rho_{\text{hex}}$ ). Com o volume do picnômetro e volume de hexano temos o volume dos grãos de cevada ( $V_{\text{grãos}} = V_{\text{picnômetro}} - V_{\text{hex}}$ ). Este procedimento foi realizado em triplicata.

Deste modo, tem-se o valor da massa de grãos de cevada e o volume dos grãos, e com a Equação 11, calculou-se a massa específica aparente.

### 3.2.6 Densidade do leite (*bulk*)

Utilizando uma proveta de 100 mL, amostras de aproximadamente 100 gramas de grãos de cevada foram empacotadas no leite com o auxílio de um funil para derramar os grãos no interior do recipiente (ZOTIN, 1985). Através da razão entre a massa de partículas e o volume preenchido da proveta foi possível determinar a densidade volumétrica (*bulk*), Equação 12.

### 3.2.7 Massa e Volume de 1000 grãos de cevada

Segundo RAS – Regra de Análise de Sementes, desenvolvida pelo Ministério da Agricultura (BRASIL, 2009), o peso de mil grãos é uma medida que fornece uma melhor percepção sobre o tamanho dos grãos.

Em triplicatas, para cada umidade inicial ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ), manualmente, foram separados 1000 grãos de cevada. Foram pesados, obtendo-se a massa. Posteriormente, utilizando uma proveta de 100 mL a amostra foi empacotada e foi feita a leitura do volume de 1000 grãos de cevada (ZOTIN, 1985).

### 3.2.8 Porosidades

A porosidade da partícula ( $\varepsilon_p$ ) foi estimada através da Equação 13, que relaciona a massa específica aparente com a real. A porosidade *bulk* ( $\varepsilon_b$ ), ou fração de vazios do leite fixo constituídos pelos grãos, foi estimado pela Equação 14. A porosidade total do leite ( $\varepsilon_t$ ), ou frações de vazios total do leite de grãos, foi estimada pela Equação 15.

Como a estimativa das porosidades são indiretas, Equações 13, 14 e 15, para determinação indireta do desvio padrão das porosidades propaga-se os erros da determinação da massa específica real, massa específica aparente e densidade *bulk*, segundo Goldemberg (1977), obtendo as equações:

*Porosidade da partícula*

$$\sigma_{\varepsilon_p} = (1 - \varepsilon_p) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_p}}{\rho_p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_s}}{\rho_s}\right)^2} \quad (23)$$

*Porosidade do leito*

$$\sigma_{\varepsilon_b} = (1 - \varepsilon_b) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_b}}{\rho_b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_p}}{\rho_p}\right)^2} \quad (24)$$

*Porosidade total do leito*

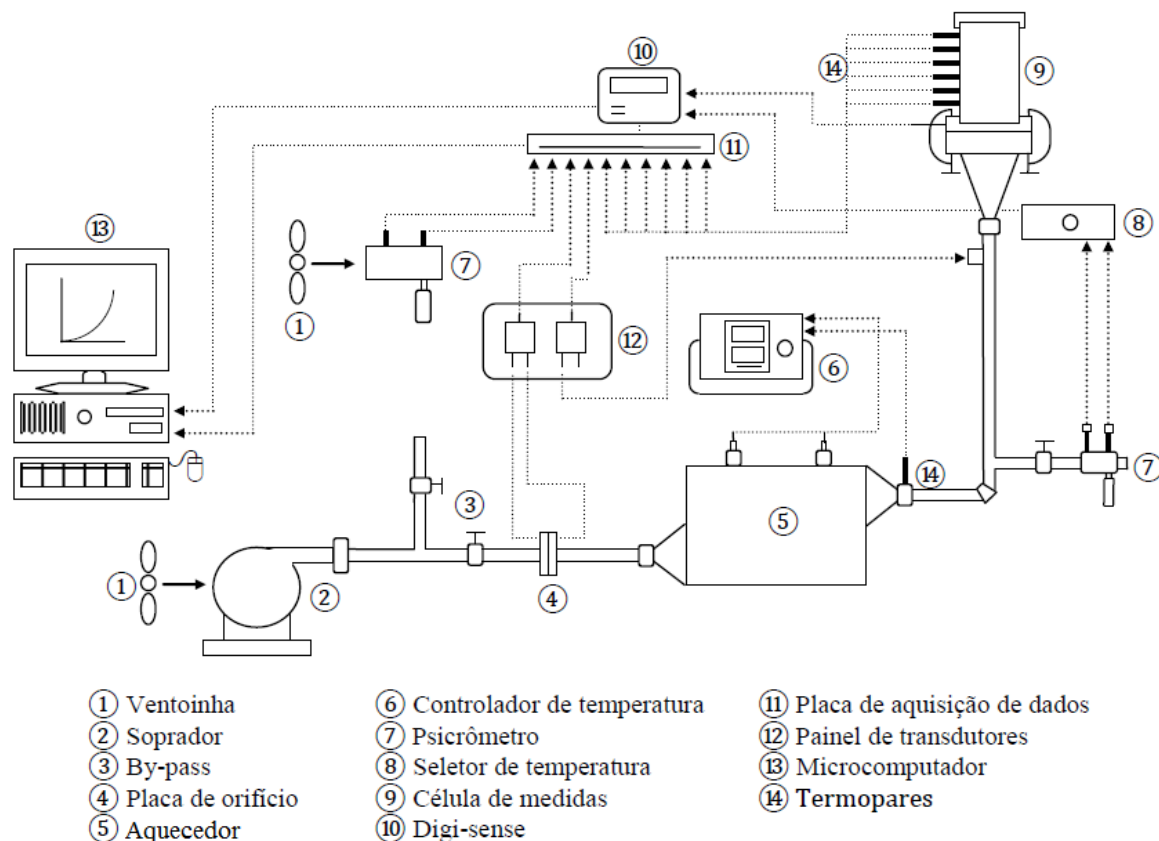
$$\sigma_{\varepsilon_t} = (1 - \varepsilon_t) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_b}}{\rho_b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_s}}{\rho_s}\right)^2} \quad (25)$$

### 3.3 Unidade Experimental de Secagem

Para a realização deste trabalho foi utilizada a unidade de secagem em leito fixo existente no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar. A Figura 3.1 apresenta o equipamento utilizado para os experimentos de secagem em camada fina.

No equipamento utilizado (Figura 3.1), temos uma ventoinha (1) que direcionou ar adicional ao soprador radial IBRAM com 3,5 HP de potência (2) que forneceu ar para o aquecedor (5). O aquecedor, com controle de temperatura, aqueceu 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 permitiu alterar a potência de aquecimento e obter a temperatura de entrada desejada.

**Figura 3. 1:** Esquema da unidade experimental para estudo de secagem em leito fixo.



Fonte: Perazzini, 2014.

A vazão de entrada de ar foi ajustada com o auxílio de um sistema by-pass (3), constituído de duas válvulas do tipo gaveta de 2 polegadas de diâmetro que direciona 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 existente durante o 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 polegada de água modelo 600D-014 que forneceu os dados de pressão da placa de orifício, e o outro, com faixa de 0-5 polegada de água modelo 600D-5 forneceu os dados de pressão relativos a queda de pressão do leito de secagem,

ambos transdutores são da marca Auto Tran Incorporated e suportam uma corrente com voltagem máxima de 5V.

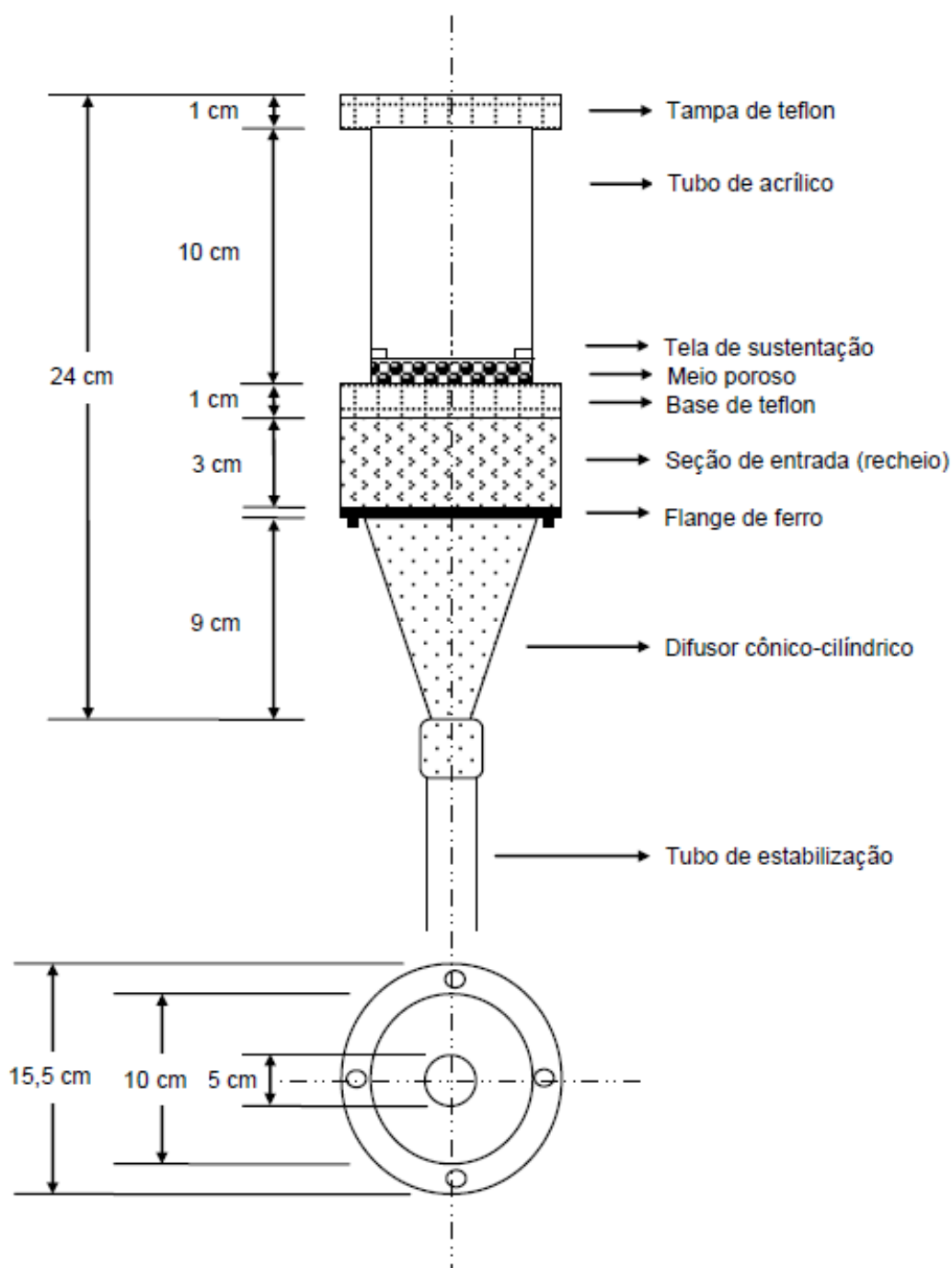
Os dados de temperatura foram determinados por termopares inseridos em diferentes posições axiais. Os termopares são constituídos de termoelementos de ferro-constantan revestidos por bainha de aço inox, tendo os termopares uma espessura de 1,5 mm, espessura que proporciona boa resistência aos sensores, sem grandes interferências no leito. Os cinco termopares de 5,2 cm foram dispostos nas posições axiais de 1, 2, 3, 4 e 5 cm e um termopar foi disposto próximo à base do secador (0,3 cm). Os termopares do psicrômetro, que não continham nem cabeçote e nem bainha, constituídos apenas de termoelementos, foram ligados a uma chave seletora (8) com saída para um digi-sense (Coleparmer). Um termopar do tipo J (ferro-constantan) de 6 cm de comprimento e 3 mm de espessura foi inserido na base da célula para determinar a temperatura de entrada 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 anteriormente por Perazzini (2014) em um poço de calibração (Block Calibrator DB-35L) obtendo um desvio médio de  $\pm 0,3$  °C entre as medidas de temperaturas fornecidas pelo calibrador e aquelas medidas pelos termopares.

A placa de aquisição de dados (11) Lynx ADS2000 recebeu os 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 (National Instruments, versão 7.0) os dados foram lidos e armazenados.

A célula de medida (9) foi constituída de duas seções, uma seção de entrada, para o desenvolvimento do perfil de velocidade do fluido e uma seção de secagem, onde os dados de temperatura e umidade foram obtidos. Um esquema da célula de medida é apresentado na Figura 3.2.



**Figura 3. 2:** Esquema da célula de medida.



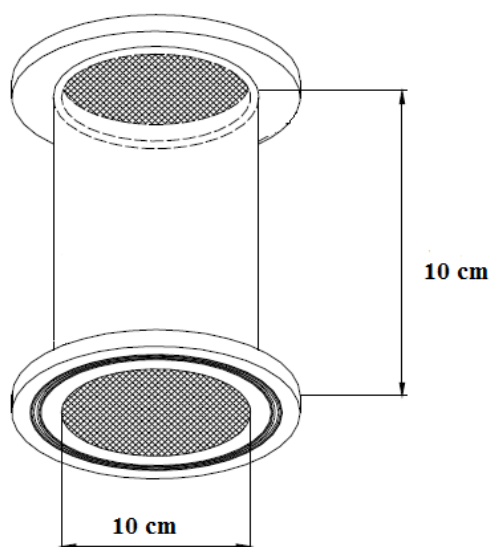
Fonte: Adaptada de Perazzini, 2014.

A seção de entrada foi constituída por um tubo de teflon com diâmetro interno igual a 10 cm e com altura de 3 cm. O 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. O tubo foi unido a um

difusor (cabecote) de 9 cm de comprimento por uma flange de ferro. O ar de secagem antes de atingir a célula de medida percorreu uma tubulação de ferro, de 1m de comprimento, com placas defletoras em seu interior que permitiu uma estabilização prévia e homogeneização do escoamento do fluido.

A seção de secagem consistiu de um tubo cilíndrico de acrílico de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Como variou-se a altura do leito de grãos para os diferentes experimentos realizados, 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 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. Uma tampa construída de tela metálica e arco de teflon auxiliava na minimização da troca térmica pela extremidade da célula. Um esquema pode ser visto na Figura 3.3.

**Figura 3. 3:** Célula de secagem.



Fonte: Adaptada de Lima, 2013.

### 3.3.1 Ensaios 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 para não afetar a capacidade germinativa dos grãos.

Com relação à velocidade do ar de secagem, devido também a limitações do equipamento, a faixa operacional escolhida foi um valor mínimo de 0,8 m/s e um máximo de 4,0 m/s.

### **3.3.2 Cinética de secagem**

#### **3.3.2.1 Determinação da espessura da camada fina**

Para determinar a espessura da camada fina, os experimentos foram realizados na unidade experimental apresentada na Figura 3.1.

Como descrito em Perazzini (2014), um das maneiras de verificar a aproximação da camada fina é efetuar estudos de transferência de calor, obtendo dados de temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais. Assim, as medidas da temperatura foram feitas em um leito espesso de 5 cm para obter o perfil de temperatura.

Utilizou-se também uma metodologia que consiste em verificar a aproximação da camada delgada a partir de dados de umidade em função do tempo para diferentes alturas de leito (PERAZZINI, 2014). Com este intuito, foram realizados experimentos de secagem com alturas de leitos de 2 cm e 1 cm.

#### **3.3.2.2 Secagem em leito fixo e camada fina**

Para a realização dos ensaios de secagem em camada fina, foi utilizada a célula de medida apresenta na Figura 3.2.

O equipamento foi ligado com a célula de medida para atingir o regime permanente, ou seja, quando a temperatura e a vazão do ar não apresentaram variação dentre os valores pré-estabelecidos. Sob condições operacionais constantes de temperatura, umidade e vazão do ar de secagem, a umidade das partículas foi observada e avaliada por 720 minutos. Nos intervalos de tempo de 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660 e 720 minutos, a célula de secagem com a amostra de grãos era pesada com auxílio de uma balança semi-analítica Marte com precisão de  $1 \times 10^{-2}$ g. A célula de secagem com a amostra de grãos de cevada foi novamente acoplada ao leito para continuar a secagem. As condições operacionais de cada experimento estão descritas na Tabela 3.1. Para cada condição operacional foi realizado a repetição do experimento para verificar reprodutibilidade dos dados.

**Tabela 3. 1:** Condições operacionais para a secagem em secador de leito fixo e camada fina.

Experimento	Reumidificação	Velocidade [m/s]	Temperatura [°C]	Umidade inicial [g <sub>água</sub> /g <sub>sólido seco</sub> ]
3	Rápida	4,00	45	0,27
4	Rápida	4,00	50	0,27
5	Rápida	0,80	50	0,27
6	Lenta	4,00	40	0,36
7	Rápida	4,00	40	0,27
8	Lenta	4,00	40	0,36
10	Lenta	4,00	40	0,36
11	Lenta	4,00	45	0,36
12	Lenta	4,00	50	0,36
13	Lenta	4,00	40	0,27
14	Lenta	4,00	45	0,27
15	Lenta	4,00	50	0,27
16	Lenta	4,00	40	0,16
17	Lenta	4,00	45	0,16
18	Lenta	4,00	50	0,16
20	Lenta	0,80	50	0,27

Fonte: Acervo pessoal.

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

$$MR = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (26)$$

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

### 3.4 Reprodutibilidade

Para verificação da reprodutibilidade estatística dos dados obtidos, realizou-se a linearização dos dados obtidos através da Equação 27.

$$MR = a MR_{(\text{repetição})} \quad (27)$$

Esta equação foi utilizada para a verificação da reprodutibilidade de repetições, substituindo MR por variáveis a serem determinadas no processo.

O melhor ajuste foi comprovado pelo parâmetro  $a$  próximo a 1,0, assegurado estatisticamente pela variância explicada (% de pontos explicados pelo modelo), desvio padrão (entre pontos experimentais e modelo) e teste t (razão entre o padrão  $a$  e o desvio padrão) (ARRIECHE, 2003).

### 3.5 Estimativa dos Parâmetros

Para a estimativa dos parâmetros que constituem os modelos matemáticos utilizados neste trabalho foi empregado um pacote computacional que leva a uma melhor aproximação entre as curvas teóricas e experimentais através da minimização de uma função objetivo. Utilizou-se a minimização do quadrado dos desvios como critério para todas as estimativas, implementadas em rotina computacional desenvolvida em linguagem MatLab® (R2007b, Mathworks).

Os critérios estatísticos utilizados para avaliar os ajustes foram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro parcial médio ( $MSE$ ), raiz quadrada do

erro médio ( $RMSE$ ) e chi-quadrado ( $\chi^2$ ), os três últimos são determinados pelas equações a seguir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{pred,i} - x_{exp,i})^2 \quad (28)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{pred,i} - x_{exp,i})^2} \quad (29)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (x_{pred,i} - x_{exp,i})^2 \quad (30)$$

### 3.6 Análise Estatística

Foi empregado o teste t de Student a fim de se verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das medidas e dos cálculos das características físicas quando a umidade inicial variasse.

As umidades iniciais foram comparadas dois a dois. As hipóteses testadas foram:

- Hipótese nula ( $H_0$ ): não há diferença significativa entre as médias das amostras em relação à umidade inicial.
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): há diferença significativa entre as médias das amostras em relação à umidade inicial.

Aceita-se  $H_0$  quando:  $-t_{\text{crítico}} < t_{\text{calculado}} < t_{\text{crítico}}$

Rejeita-se  $H_0$  quando:  $t_{\text{calculado}} < -t_{\text{crítico}}$

$t_{\text{calculado}} > t_{\text{crítico}}$

Onde  $t_{\text{calculado}}$  foi o valor calculado a partir do teste, e  $t_{\text{crítico}}$  foi o valor de  $t$  determinado a partir da tabela  $t$  de Student, em que o nível de significância do teste é de 5%.

Os cálculos foram realizados utilizando-se o programa computacional Microsoft Excel®.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, seguindo a metodologia proposta neste trabalho.

### 4.1 Características dos grãos de cevada

Na Tabela 4.1 estão apresentadas as propriedades físicas dos grãos de cevada após passarem pelo processo de reumidificação lenta.

**Tabela 4. 1:** Propriedades físicas dos grãos de cevada.

Propriedades Físicas		Dados		
		X1	X2	X3
Umidade em base úmida	$X_{bu}$ [%]	26,5±0,3	21,1±0,4	13,6±0,4
Umidade em base seca	$X_{bs}$	0,36±0,01	0,27±0,01	0,16±0,01
Diâmetro médio de Sauter	$\bar{D}$ [mm]	3,75	3,65	3,62
Comprimento	L [mm]	8,75±0,16	8,43±0,09	8,38±0,05
Largura	W [mm]	4,30±0,14	4,06±0,16	3,99±0,09
Espessura	T' [mm]	6,70±0,13	6,43±0,04	6,39±0,03
Diâmetro da parte esférica	B [mm]	5,37±0,14	5,11±0,11	5,05±0,07
Área superficial	S [mm <sup>2</sup> ]	106,51±5,06	97,10±2,67	95,11±1,89
Volume	V [mm <sup>3</sup> ]	95,39±7,04	82,72±4,00	80,04±2,67
Perímetro	p [mm]	21,27±0,41	20,49±0,10	20,31±0,07
Área projetada	A [mm <sup>2</sup> ]	27,49±1,19	24,82±0,85	24,23±0,59
Circularidade	$\vartheta$	1,31±0,01	1,35±0,05	1,36±0,02
Esfericidade	$\phi$	0,76±0,01	0,74±0,02	0,74±0,01
Massa (1000 sementes)	m [g]	53,51±0,45	50,45±0,37	46,89±0,19
Volume (1000 sementes)	V [cm <sup>3</sup> ]	77±2	72±2	65±1
Massa específica real	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,337±0,006	1,345±0,003	1,371±0,001
Massa específica aparente	$\rho_p$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,220±0,002	1,229±0,002	1,261±0,004
Densidade do leito (bulk)	$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,701±0,006	0,718±0,001	0,750±0,001
Porosidade da partícula	$\epsilon_s$	0,088±0,008	0,086±0,002	0,080±0,008
Porosidade do leito (bulk)	$\epsilon_b$	0,425±0,005	0,416±0,001	0,405±0,002
Porosidade total	$\epsilon_t$	0,476±0,007	0,466±0,001	0,453±0,001

Fonte: Acervo pessoal.

No trabalho de Jayas e Cenkowski (2006) foram apresentados dados de algumas das propriedades apresentadas na Tabela 4.1. Os dados apresentados pelos autores são de grãos de cevadas de cultivares e umidades iniciais diferentes, porém é possível uma comparação. Para o comprimento, a



largura, a área projetada e o perímetro foram apresentados os valores de, respectivamente,  $(8,3 \pm 0,8)$  mm,  $(3,4 \pm 0,3)$  mm,  $(23,0 \pm 2,9)$  mm<sup>2</sup> e  $(20,5 \pm 1,7)$  mm. Os dados de porosidade de leitos para diferentes cultivares de grãos de cevada estão entre 40% a 58% e de massa específica aparente estão entre 1,13 g/cm<sup>3</sup> a 1,33 g/cm<sup>3</sup>, variando conforme o cultivar e umidade dos grãos de cevada. Assim, os valores apresentados na Tabela 4.1 se mostram condizentes com os apresentados na literatura.

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

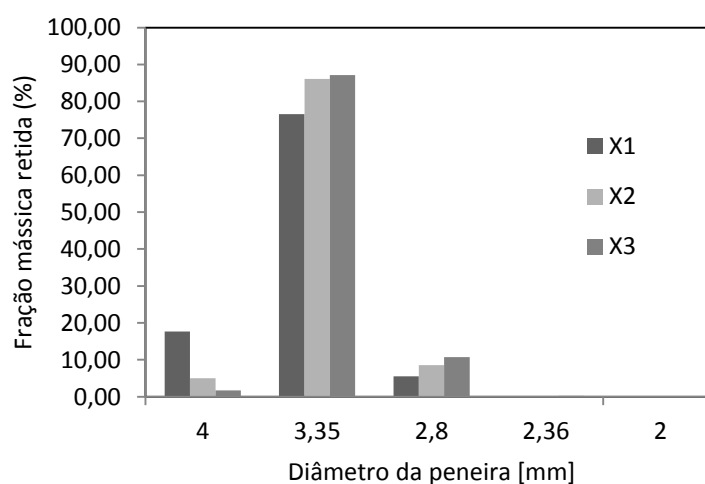
Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados das frações mássicas obtidos da distribuição granulométrica dos grãos de cevada. Com estes dados obteve-se o histograma, apresentado na Figura 4.1.

**Tabela 4. 2:** Frações mássicas retidas nas peneiras

Diâmetro médio [mm]	Fração em massa retida (%)		
	X1	X2	X3
4	17,70	4,98	1,70
3,35	76,50	86,05	87,09
2,8	5,55	8,57	10,70
2,36	0,05	0,09	0,22
2	0,00	0,00	0,02
fundo	0,19	0,30	0,27

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 1:** Fração mássica retida em cada peneira



Fonte: Acervo pessoal.

Pode-se observar que mais de 90% dos grãos, para as três umidades, apresentaram diâmetro maior que 2,8 mm. O diâmetro médio de Sauter para cada umidade, calculado através da Equação 1, está apresentado na Tabela 4.1.

Segundo Kunze (2004), a classificação por tamanho é o exame físico mais importante da cevada e quando os grãos retidos na peneira acima de 2,36mm representam mais de 95%, estes grãos são classificados como cevada de qualidade *premium*.

#### 4.1.2 Análise de Imagens

Foram obtidas imagens, em triplicata, de 25 grãos para cada umidade inicial. A Figura 4.2 ilustra a disposição dos grãos de cevada para análise de imagem. Foram utilizados os dados de umidade em base seca para cada amostra.

**Figura 4. 2:** Disposição dos grãos de cevada para análise de imagem.



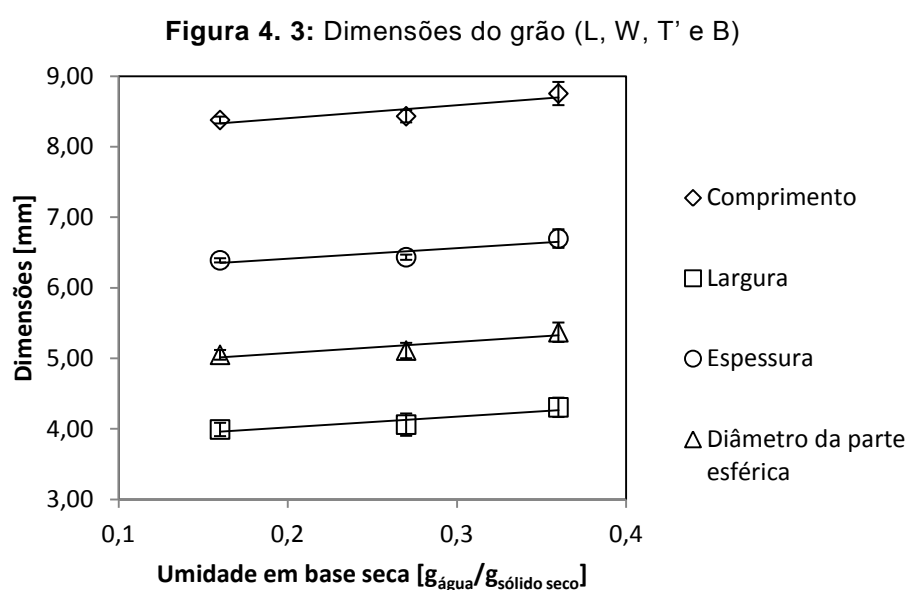
Fonte: Acervo pessoal.

#### Dimensões

Os dados das dimensões (comprimento, largura e espessura) dos grãos de cevada obtidos pela técnica de análise de imagens e do diâmetro da

parte esférica, calculado pela Equação 2, são apresentados na Figura 4.3. As barras verticais indicam o desvio padrão relativo de cada medida.

De acordo com a Figura 4.3, pode-se observar uma leve tendência de aumento das dimensões com o aumento da umidade. Essas propriedades apresentaram uma variação de 4,5%, 7,9%, 4,8% e 6,3% entre a maior e a menor medida, para o comprimento, largura, espessura e diâmetro da parte esférica, respectivamente.



Foi aplicado o teste t de Student com nível de significância de 5% para as médias das medidas das dimensões. Os testes t de Student, Tabela 4.3, confirmaram que houve diferença significativa entre as médias das medidas apenas para as medidas de largura e do diâmetro da parte esférica, quando comparamos as umidades extremas (X1 e X3).

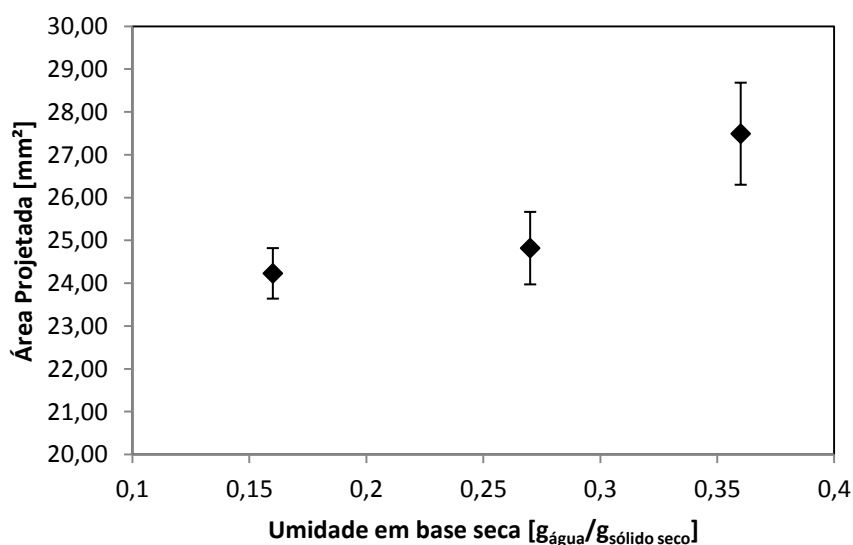
**Tabela 4. 3:** Resumo dos resultados do teste t de Student para as dimensões.

	Comparação	$t_{\text{calculado}}$	$t_{\text{crítico}}$	Decisão
Comprimento	X1 e X2 = X2 e X1	2,99	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,79	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	0,93	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Largura	X1 e X2 = X2 e X1	2,03	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,26	2,78	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	0,65	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Espessura	X1 e X2 = X2 e X1	3,35	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,96	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	1,61	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Diâmetro da parte esférica	X1 e X2 = X2 e X1	2,56	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,60	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	0,81	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$

Fonte: Acervo pessoal.

## Área, Perímetro e Volume

A Figura 4.4 apresenta as medidas da área projetada dos grãos, obtida por análise de imagens, em função da umidade. Observa-se uma tendência de aumento de 13,5%. E os testes t de Student, aplicado com nível de significância de 5%, Tabela 4.4, confirmaram que há diferença entre as médias das áreas projetadas quando comparamos X1(0,36 b.s.) com X2(0,27 b.s.) e X3(0,16 b.s.).

**Figura 4. 4:** Área projetada em função da umidade em base seca.

Fonte: Acervo pessoal.

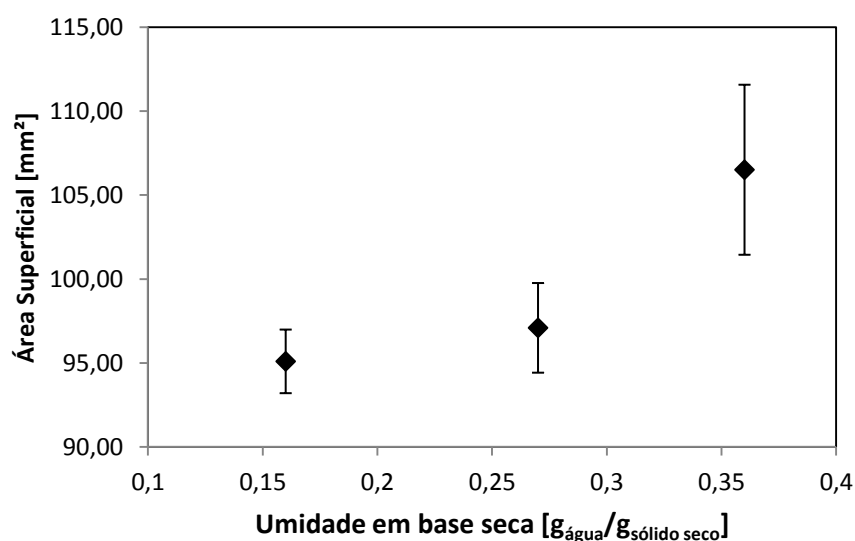
**Tabela 4. 4:** Resumo dos resultados do teste t de Student para a área projetada, área superficial, perímetro e volume.

	Comparação	$t_{\text{calculado}}$	$t_{\text{crítico}}$	Decisão
Área Projetada	X1 e X2 = X2 e X1	3,17	2,78	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	4,25	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	0,99	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Área Superficial	X1 e X2 = X2 e X1	2,85	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,66	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	1,06	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Perímetro	X1 e X2 = X2 e X1	3,18	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,99	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	2,50	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Volume	X1 e X2 = X2 e X1	2,71	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	3,53	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	0,96	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.5 apresenta os dados da área superficial, calculada pela Equação 4, em função da umidade. Comprova-se um aumento da área superficial com o aumento da umidade, uma variação de 12,0% entre a menor e a maior medida. E os testes t de Student, Tabela 4.4, confirmaram que há diferença significativa entre as médias de X1 (0,36 b.s.) e X3 (0,16 b.s.)

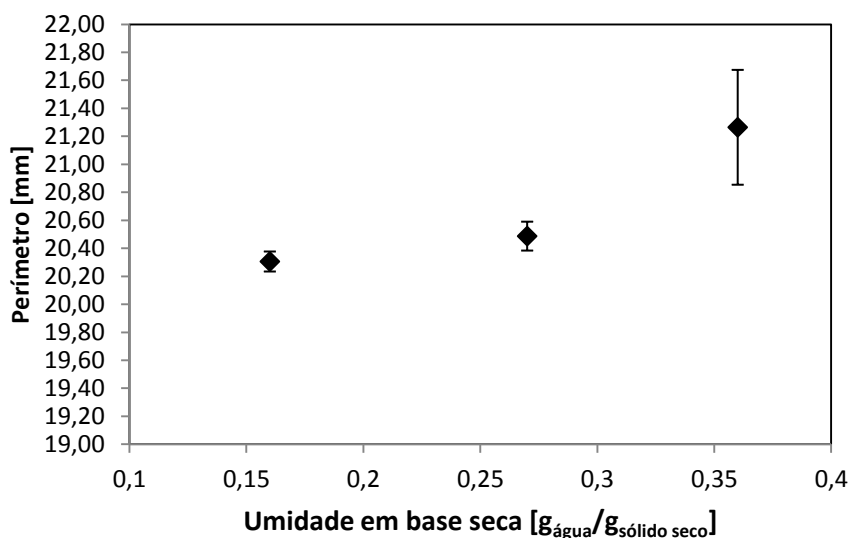
**Figura 4. 5:** Área superficial em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

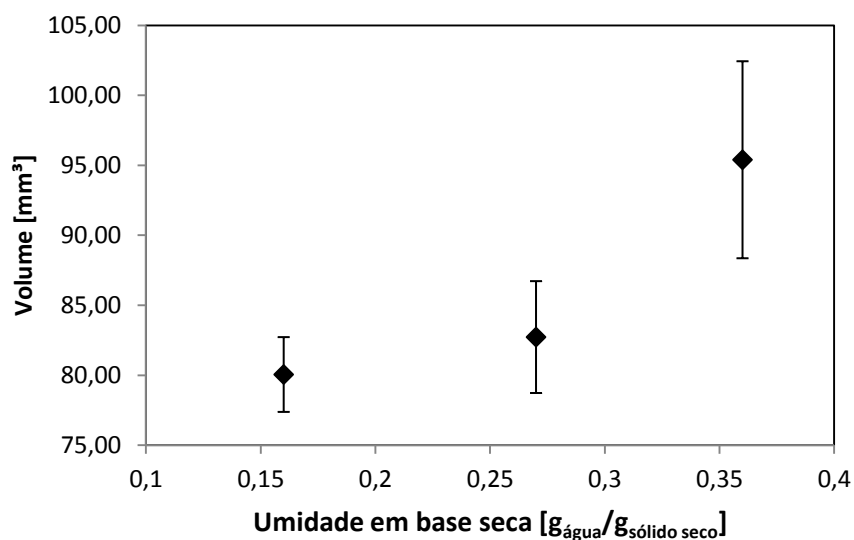
Na Figura 4.6 temos os dados do perímetro, obtido por análise de imagem, em função da umidade. Houve uma variação de 4,7% nesta medida, e os testes t de Student, Tabela 4.4, confirmaram que não há diferença significativa entre as médias.

**Figura 4. 6:** Perímetro em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

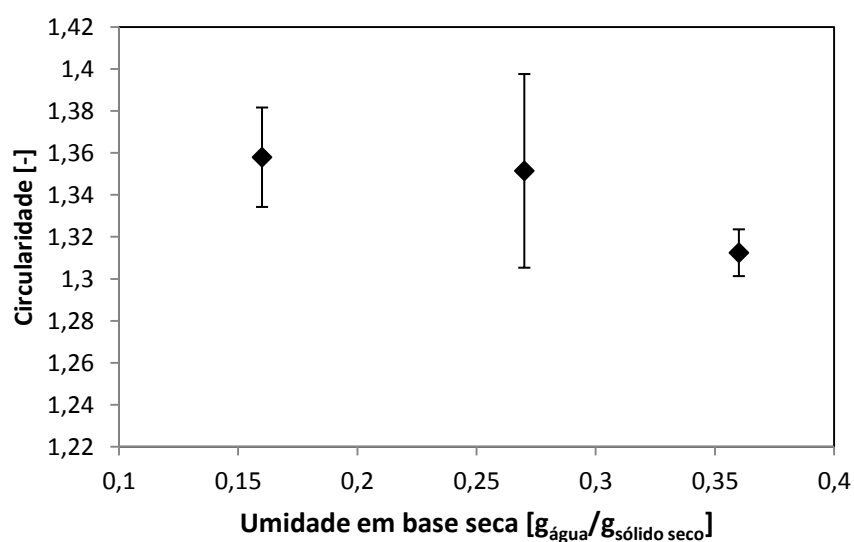
A Figura 4.7 apresenta os dados do volume, calculado pela Equação 3, em função da umidade. Há uma tendência de aumento do volume com a umidade, uma variação de 19,2% entre a menor e a maior medida é observada. Os testes t de Student, Tabela 4.4, com nível de 5% de significância confirmaram que há diferença significativa entre as médias das umidades X1 (0,36 b.s.) e X3 (0,16 b.s.).

**Figura 4. 7:** Volume em função da umidade em base seca.

Fonte: Acervo pessoal.

### Fator de forma

A circularidade foi calculada pela técnica de análise de imagens. A relação da circularidade com a umidade é apresentada na Figura 4.8. Observa-se uma redução de 3,7%. Os testes t de Student, Tabela 4.5, confirmaram que a redução na circularidade não é estatisticamente significativa.

**Figura 4. 8:** Circularidade em função da umidade em base seca.

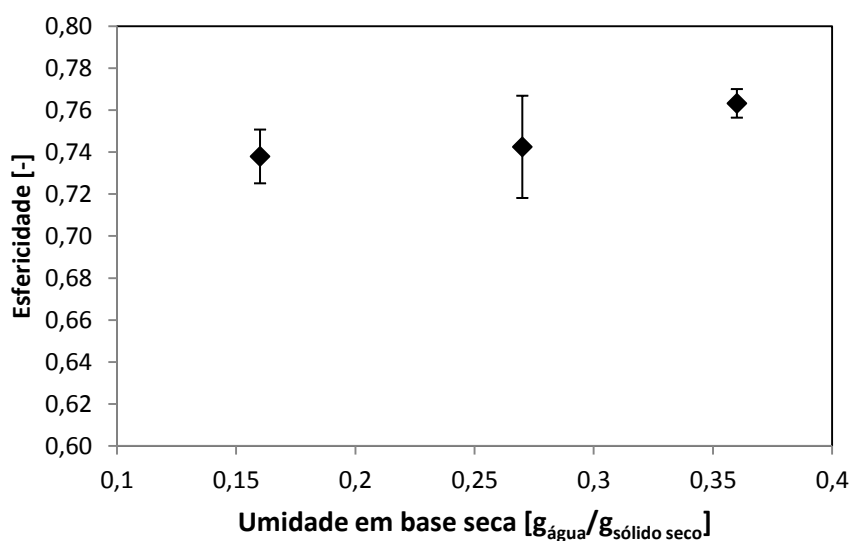
Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 4. 5:** Resumos dos resultados do teste t de Student para os fatores de forma.

	Comparação	t <sub>calculado</sub>	t <sub>crítico</sub>	Decisão
Circularidade	X1 e X2 = X2 e X1	-1,42	4,30	t <sub>calc</sub> > -t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>
	X1 e X3 = X3 e X1	-3,01	3,18	t <sub>calc</sub> > -t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>
	X2 e X3 = X3 e X2	-0,22	3,18	t <sub>calc</sub> > -t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>
Esfericidade	X1 e X2 = X2 e X1	1,42	4,30	t <sub>calc</sub> < t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>
	X1 e X3 = X3 e X1	3,02	3,18	t <sub>calc</sub> < t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>
	X2 e X3 = X3 e X2	0,29	3,18	t <sub>calc</sub> < t <sub>crit</sub> : Aceita-se H <sub>0</sub>

Fonte: Acervo pessoal.

A esfericidade foi calculada pela Equação 7. Na Figura 4.9 está apresentada os dados de esfericidade em função da umidade. Observa-se pouca variação da esfericidade, 2,7%. Os testes t, Tabela 4.5, aplicadas as medidas mostrou que não há diferença significativa entre as medidas.

**Figura 4. 9:** Esfericidade em função da umidade em base seca.

Fonte: Acervo pessoal.

Segundo Turchiuli et al. (2005), os grãos podem ser classificados pela circularidade conforme a Tabela 4.6.

**Tabela 4. 6:** Classificação dos grãos pela circularidade.

Valor da circularidade	Classificação
< 1,25	circular
1,25 < $\vartheta$ < 2,00	angular
> 2,00	comprida

Fonte: Adaptada de Turchiuli et al. (2005).



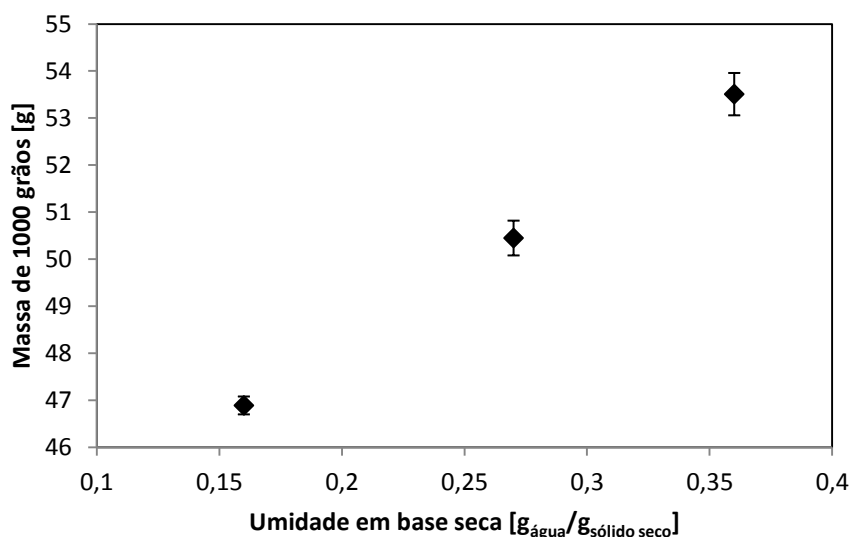
Quanto mais irregular for o grão, ou mais alongado, maior o valor de  $\vartheta$ . Na faixa de umidade estudada, a classificação dos grãos é angular.

Os fatores de forma permaneceram praticamente constantes com o aumento da umidade. Estes resultados indicam que o aumento das dimensões foi proporcional, resultando em variação desprezível na forma das sementes. Fato também observado por Arnosti Jr. (1997) para sementes de gramíneas e por Pereira (2010) para sementes de painço.

#### 4.1.3 Massa e Volume de 1000 grãos de cevada

Na Figura 4.10 está apresentada a massa de 1000 grãos de cevada em função da umidade. Observa-se um aumento linear de 14,1% com a umidade. Os testes t de Student, Tabela 4.7, com nível de 5% de significância, confirmaram que há diferença significativa entre as medidas das massas dos grãos de cevada.

**Figura 4. 10:** Massa de 1000 grãos de cevada em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

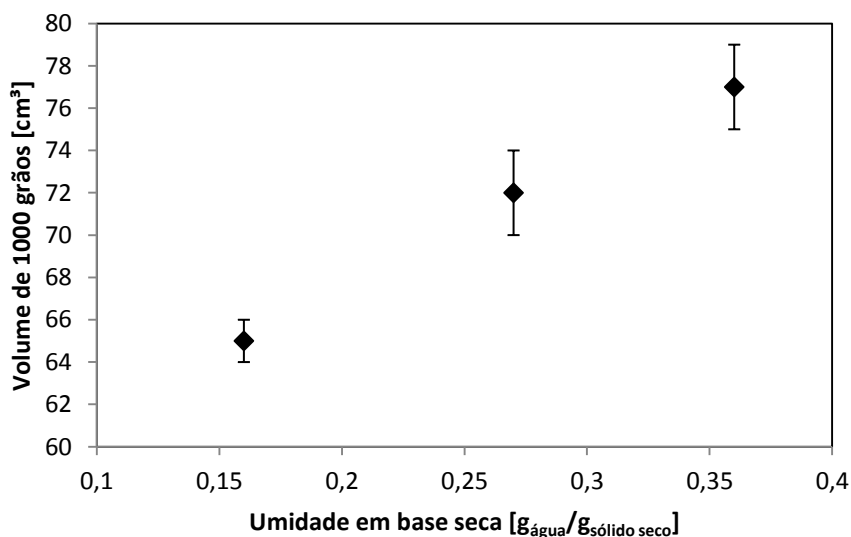
**Tabela 4. 7:** Resumo dos resultados do teste t de Student para a massa e o volume de 1000 grãos de cevada.

	Comparação	t calculado	t crítico	Decisão
Massa 1000 grãos	X1 e X2 = X2 e X1	9,10	2,78	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	23,60	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	14,65	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
Volume 1000 grãos	X1 e X2 = X2 e X1	3,13	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	8,05	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	6,33	2,78	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$

Fonte: Acervo pessoal.

O volume de 1000 grãos de cevada em função da umidade está apresentado na Figura 4.11. As barras verticais indicam o desvio padrão das medidas. O volume de 1000 grãos de cevada apresentou um aumento linear de 18,6% para a faixa de umidade de 0,16 a 0,36  $\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{sólido seco}}$ . Os testes t de Student, Tabela 4.7, confirmaram que há diferença significativa entre as medidas do volume dos grãos.

**Figura 4. 11:** Volume de 1000 grãos de cevada em função da umidade em base seca.

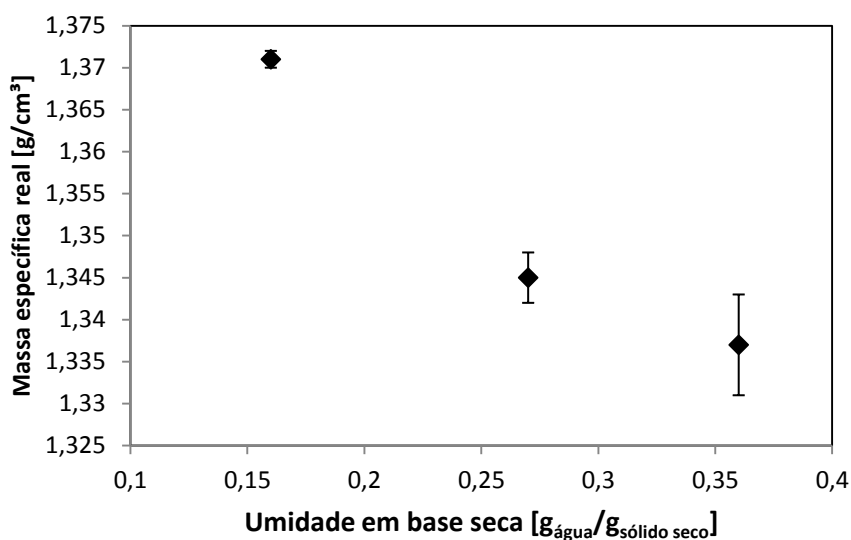


Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.1.4 Medidas de massa específica e densidade do leito (bulk)

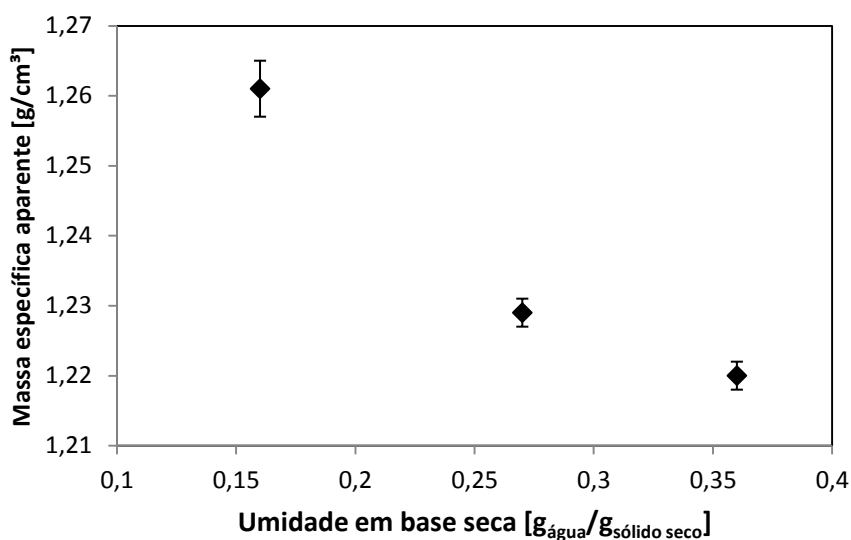
Observando os dados de massa específica real, massa específica aparente e densidade do leito (bulk), apresentados nas Figuras 4.12 a 4.14, observa-se que os valores destas medidas aumentam com a diminuição da umidade.

**Figura 4. 12:** Massa específica real em função da umidade em base seca.

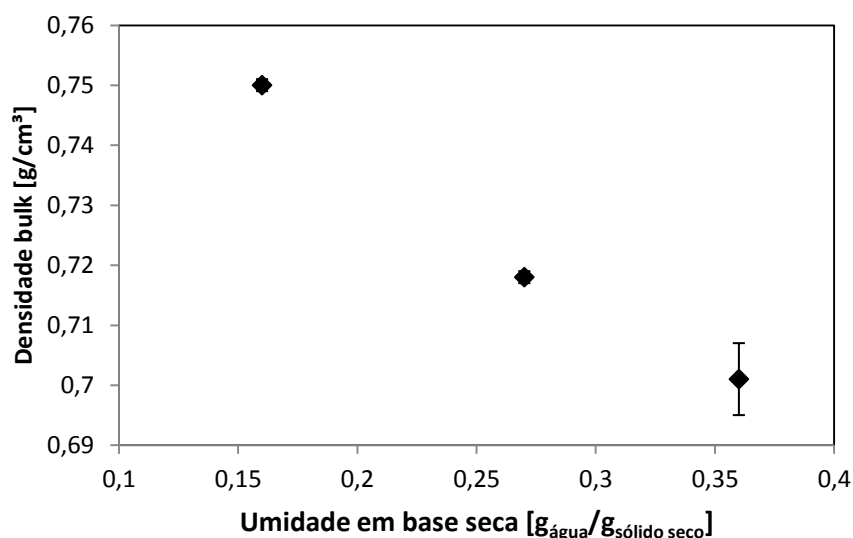


Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 13:** Massa específica aparente em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 14:** Densidade bulk em função da umidade em base seca.

Fonte: Acervo pessoal.

Para confirmar essa variação entre as densidades, a Tabela 4.8 mostra um resumo dos resultados estatísticos obtidos, em que foi aplicado o teste t de Student com nível de significância de 5% para as médias das medidas da massa específica real, massa específica aparente e densidade do leite (bulk), em que definimos quais medidas tem ou não diferença significativa entre suas médias em relação à umidade inicial.

**Tabela 4. 8:** Resumo dos resultados do teste t aplicado as médias das medidas de massa específica e densidade dos grãos de cevada.

	<b>Comparação</b>	<b>t<sub>calculado</sub></b>	<b>t<sub>crítico</sub></b>	<b>Decisão</b>
Massa específica real	X1 e X2 = X2 e X1	-1,14	4,30	$t_{\text{calc}} > -t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	-5,10	4,30	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	-20,68	2,78	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
Massa específica aparente	X1 e X2 = X2 e X1	-5,93	2,78	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	-14,35	3,18	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	-11,55	3,18	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
Densidade Bulk	X1 e X2 = X2 e X1	-4,55	4,30	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	-12,81	4,30	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	-36,15	3,18	$t_{\text{calc}} < -t_{\text{crit}}$ : Rejeita $H_0$

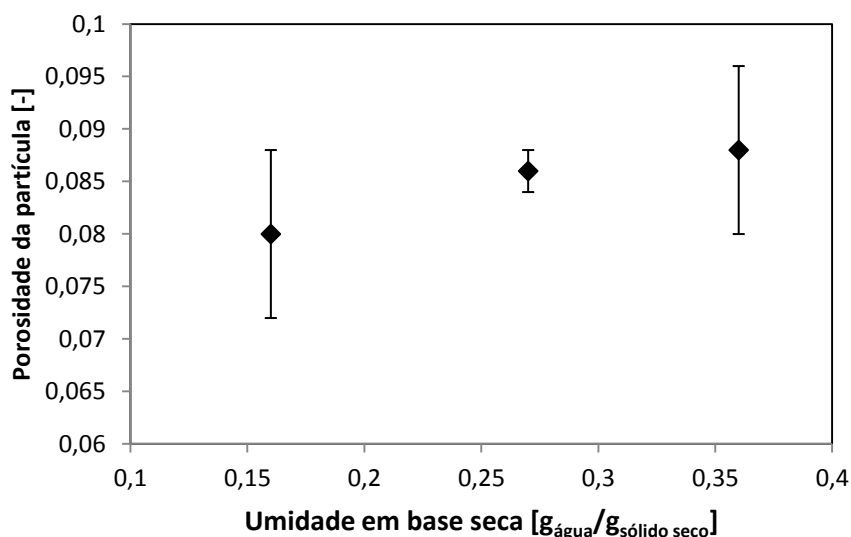
Fonte: Acervo pessoal.

Portanto, os testes t de Student confirmaram que houve diferença significativa entre as médias das medidas da massa específica real, massa específica aparente e densidade bulk. Apenas para as medidas de massa específica real entre X1 e X2 não houve diferença significativa entre as médias das medidas.

Assim, os valores da massa específica aparente e massa específica real diminuem com o aumento da umidade dos grãos. Brooker et al. (1992) afirma que a massa específica aparente de grãos agrícolas diminui com o aumento da umidade do produto. Bruswitz (1975), investigando diversos grãos reumidificados, também constatou que os valores da massa específica real decresceram com o aumento da umidade do produto.

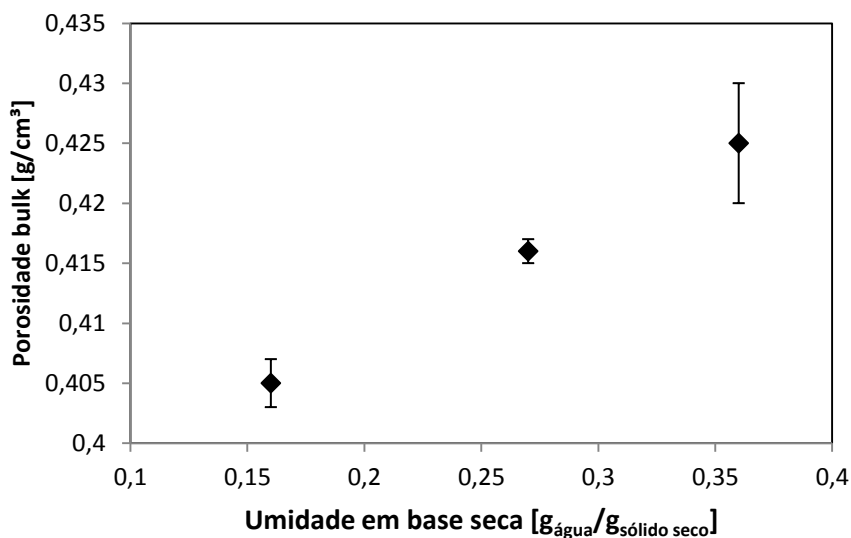
Com as medidas de massa específica real, massa específica aparente e densidade do leito foi possível calcular a porosidade da partícula (Equação 13), a porosidade bulk (Equação 14) e a porosidade total (Equação 15). Observando os dados apresentados nas Figuras 4.15 a 4.17, nota-se que os valores das porosidades aumentaram com o aumento da umidade.

**Figura 4. 15:** Porosidade da partícula em função da umidade em base seca.



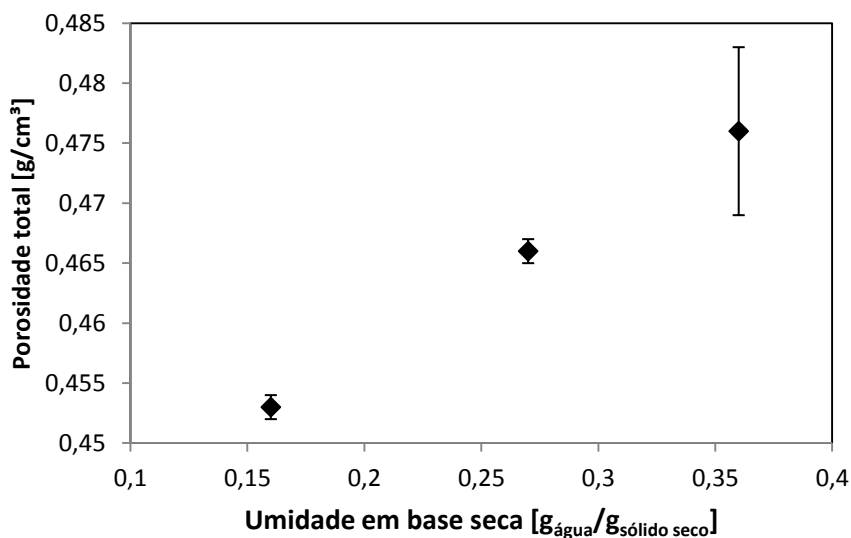
Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 16:** Porosidade bulk em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 17:** Porosidade total em função da umidade em base seca.



Fonte: Acervo pessoal.

Para confirmar essa variação entre os cálculos, a Tabela 4.9 mostra um resumo dos resultados estatísticos obtidos, em que foi aplicado o teste t de Student com nível de significância de 5% para as médias das porosidades dos grãos de cevada, onde definimos quais medidas tem ou não diferença significativa entre suas médias em relação à umidade inicial.

**Tabela 4. 9:** Resumo dos resultados do teste t aplicado as médias calculadas de porosidade.

	<b>Comparação</b>	<b>t calculado</b>	<b>t crítico</b>	<b>Decisão</b>
Porosidade da partícula	X1 e X2 = X2 e X1	0,43	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	1,54	3,18	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	2,47	2,78	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
Porosidade do leito	X1 e X2 = X2 e X1	2,57	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	5,08	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	5,89	3,18	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
Porosidade Total	X1 e X2 = X2 e X1	1,95	4,30	$t_{\text{calc}} < t_{\text{crit}}$ : Aceita-se $H_0$
	X1 e X3 = X3 e X1	4,54	4,30	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$
	X2 e X3 = X3 e X2	27,57	4,30	$t_{\text{calc}} > t_{\text{crit}}$ : Rejeita-se $H_0$

Fonte: Acervo pessoal.

Assim, o teste t de Student confirmaram que para a porosidade da partícula não houve diferença significativa entre as médias. E para a porosidade bulk e porosidade total apenas quando comparamos as amostras X1(0,36) e X2(0,27) não há diferença significativa entre as médias.

#### 4.1.5 Encolhimento

Considerando o encolhimento um fenômeno físico caracterizado pela contração de volume do material durante o processo de secagem, após a análise das propriedades físicas apresentadas na Tabela 4.1, tem-se um indicativo de que os grãos de cevada sofrem encolhimento.

Com a análise de imagens foram obtidos dados individuais dos grãos de cevada, que apesar da pouca variação observada para as dimensões lineares, como descritas anteriormente, as variações tornam-se mais significativas quando foram calculadas áreas e volumes, o que pode ser explicado matematicamente, já que a área e o volume são obtidos, respectivamente, pelo quadrado ou cubo das dimensões lineares.

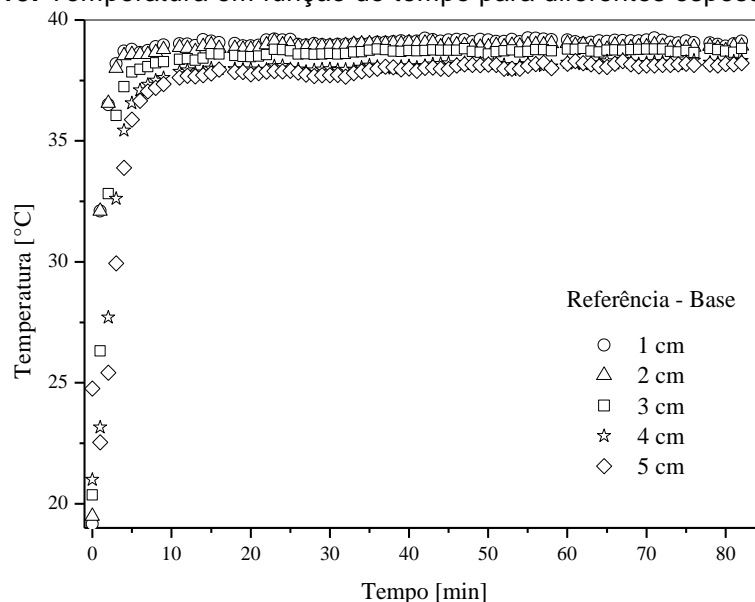
Observou-se também a diminuição da massa específica real, massa específica aparente e densidade bulk, com o aumento da umidade. Este fato ocorre devido, principalmente, ao maior aumento no volume dos grãos em comparação com o aumento de massa dos grãos (TAVAKOLI et al., 2009).

## 4.2 Cinética de Secagem

### 4.2.1 Determinação da camada fina

A Figura 4.18 apresenta os dados de temperatura em função do tempo para o meio constituído de grãos de cevada. O experimento foi realizado a  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 4,0 \text{ m/s}$  e umidade inicial de 0,36 b.s.. Foi escolhido a velocidade de 4,0 m/s devido a alta velocidade do ar diminuir a resistência externa com o aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor, o que contribui para a redução de gradientes elevados de temperatura no interior do leito. No início, a temperatura é a mesma em todos os pontos medidos. Com a entrada de ar aquecido pela base inferior do leito, inicia-se a transmissão de calor. É possível observar que os dados de temperatura em função do tempo para as diferentes posições axiais se estabelecem com comportamentos semelhantes. Observa-se ainda uma desprezível diferença entre os valores de temperaturas para 1 e 2 cm.

**Figura 4. 18:** Temperatura em função do tempo para diferentes espessuras do meio.



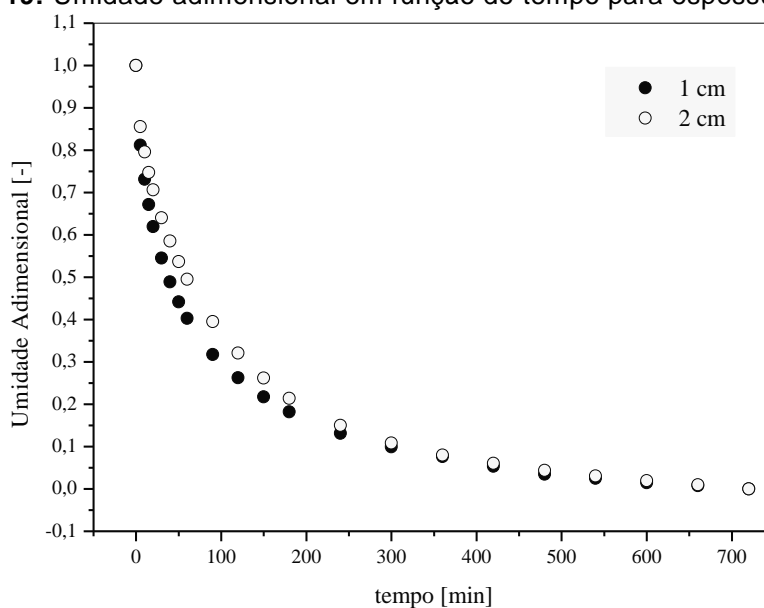
Fonte: Acervo pessoal.

Ainda com o intuito de verificar a aproximação da camada fina, a Figura 4.19 apresenta os dados de umidade adimensional em função do tempo para diferentes espessuras de leito (1 e 2 cm), nas mesmas condições operacionais ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $v=4,0 \text{ m/s}$  e umidade inicial de 0,36 b.s.). Podemos observar que as curvas de umidade em função do tempo são distintas entre si



para as diferentes espessuras. Em  $t = 0$ , os leitos apresentam umidade inicial semelhante. A partir de  $t = 5$  minutos, a umidade do leito de 1 cm de espessura diminui mais rapidamente que o leito de 2 cm até  $t = 300$  minutos, quando as curvas tornam-se semelhantes. Estes resultados sugerem que, para o leito de espessura de 2 cm o gradiente de umidade em seu interior é muito mais significativo quando comparado ao leito de 1 cm.

**Figura 4. 19:** Umidade adimensional em função do tempo para espessuras diferentes



Fonte: Acervo pessoal.

Logo, como base nos resultados das metodologias de determinação da temperatura e umidade do meio, o valor de 1 cm foi utilizado, neste trabalho, como a espessura da camada fina do leito de grãos de cevada.

#### 4.2.2 Secagem em leito fixo e camada fina

Com os resultados experimentais de umidade e tempo obtidos ao longo de cada experimento, traçaram-se as curvas de umidade adimensional ( $MR$ ) em função do tempo de secagem. As condições operacionais de cada ensaio experimental são apresentadas na Tabela 3.1. Como foram realizadas repetições dos experimentos, na Tabela 4.10 são apresentados os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear, Equação 27, para verificação da reprodutibilidade dos dados.

**Tabela 4. 10:** Reprodutibilidade dos dados de cinética de secagem.

Experimento	Parâmetro <i>a</i> (adimensional)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de Correlação	Variância explicada (%)
3 e 3R	0,9862	0,0176	56,1752	0,99685	99,37
4 e 4R	1,0005	0,0044	228,1258	0,99981	99,96
5 e 5R	1,0092	0,0085	118,2753	0,99929	99,86
6 e 6R	1,0498	0,0177	59,4457	0,99718	99,44
7 e 7R	1,0238	0,0317	32,3088	0,99056	98,12
8 e 8R	0,9796	0,0049	201,3596	0,99975	99,95
10 e 10R	1,0038	0,0017	589,4418	0,99997	99,99
11 e 11R	1,0012	0,0029	340,1695	0,99991	99,98
12 e 12R	1,0195	0,0044	229,7075	0,99981	99,96
14 e 14 R	1,0218	0,0056	183,9332	0,99970	99,94
15 e 15R	1,0091	0,0029	353,4274	0,99992	99,98
16 e 16R	1,0292	0,0088	117,0085	0,99991	99,98
17 e 17R	1,0119	0,0101	100,2859	0,99901	99,80
18 e 18R	1,0225	0,0045	229,1712	0,99981	99,96
20 e 20R	1,0051	0,0057	175,1430	0,99967	99,93

\*R = repetição

Fonte: Acervo pessoal.

Na Tabela 4.10, os valores estimados para o parâmetro *a* são aproximadamente igual à unidade, sendo a validade estatística deste parâmetro assegurada pelos baixos valores de desvio padrão e altos valores de teste t. O alto índice de variância explicada, mostra que a porcentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico foi excelente, apenas para o experimento 7 ficou abaixo de 99,0%. Logo, com base nesta análise estatística, tem-se que os dados são reprodutíveis e assim, adequados para este estudo.

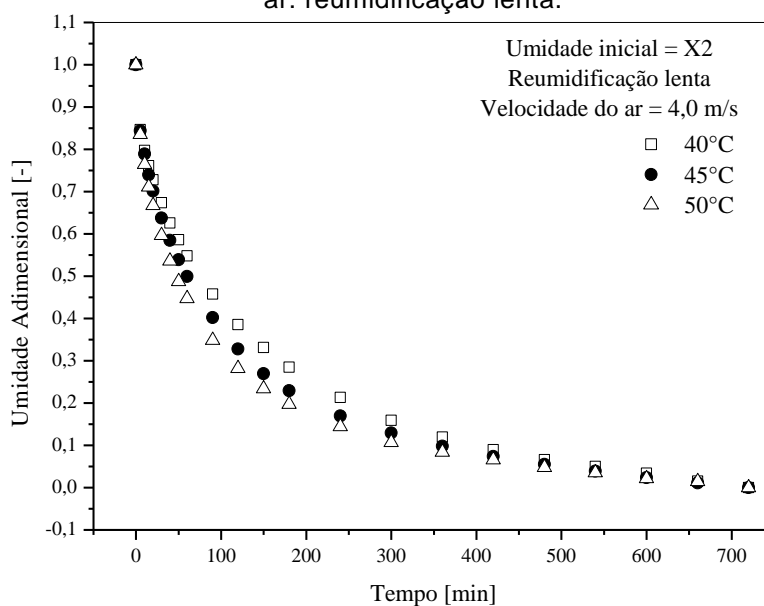
As curvas de secagem apresentadas nas Figuras 4.20 a 4.23 foram construídas de tal forma que fosse possível visualizar os efeitos isolados do método de reumidificação, da temperatura e velocidade do ar de secagem. Nas Figuras 4.20 e 4.22, as amostras de grãos de cevada passaram pelo processo de reumidificação lenta e nas Figuras 4.21 e 4.23, as amostras passaram pelo processo de reumidificação rápida.

Verificam-se nas Figuras 4.20 e 4.21 os dados experimentais da cinética de secagem de grãos de cevada nas temperaturas de 40°C, 45°C e 50°C, expressos pela umidade adimensional em função do tempo de secagem.

Observa-se na Figura 4.20 que o efeito da temperatura é significativo no tempo de secagem, entre 50 – 350 minutos, na redução de

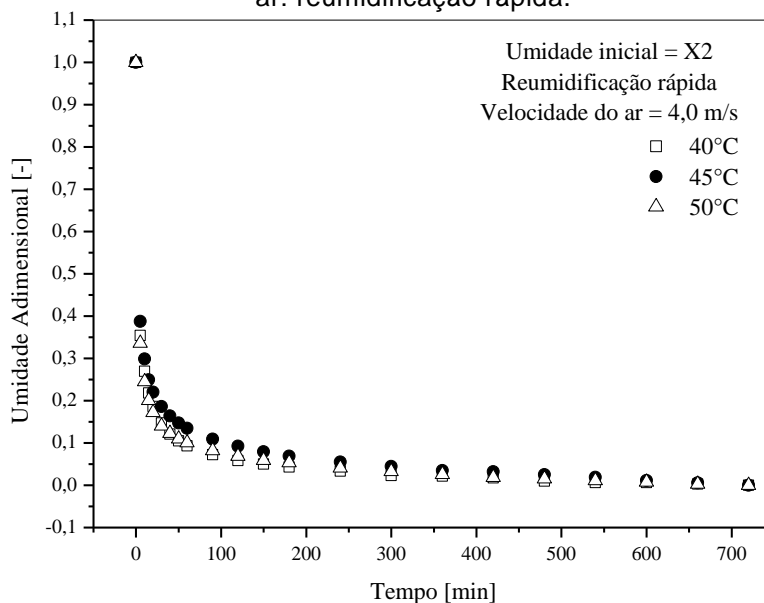
umidade do material. A variação de 5°C na temperatura de entrada do ar foi suficiente para observar a influência da temperatura na secagem do material através de diferenças visíveis entre as curvas. Já na Figura 4.21 o efeito da temperatura é pouco significativo. A variação de 5°C não foi suficiente para observar a influência da temperatura na secagem do material através de diferenças significativas entre as curvas.

**Figura 4. 20:** Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na temperatura do ar: reumidificação lenta.



Fonte: Acervo pessoal.

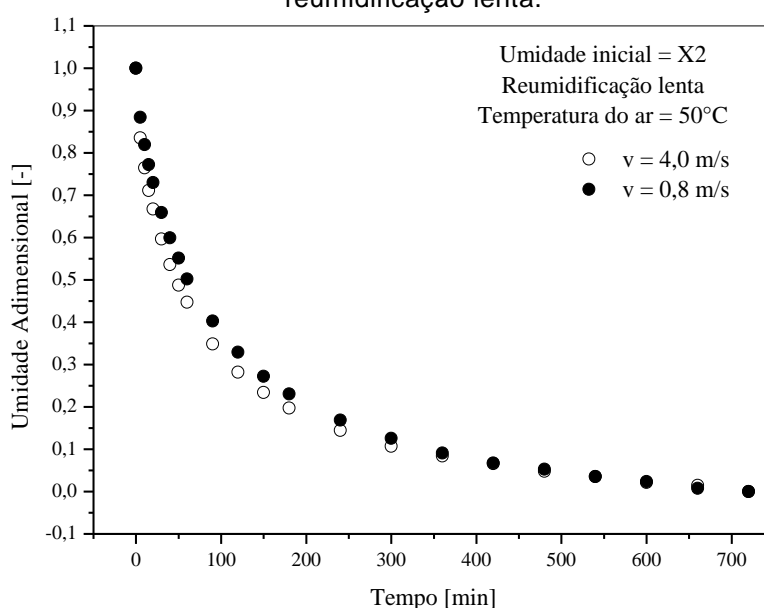
**Figura 4. 21:** Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na temperatura do ar: reumidificação rápida.



Fonte: Acervo pessoal.

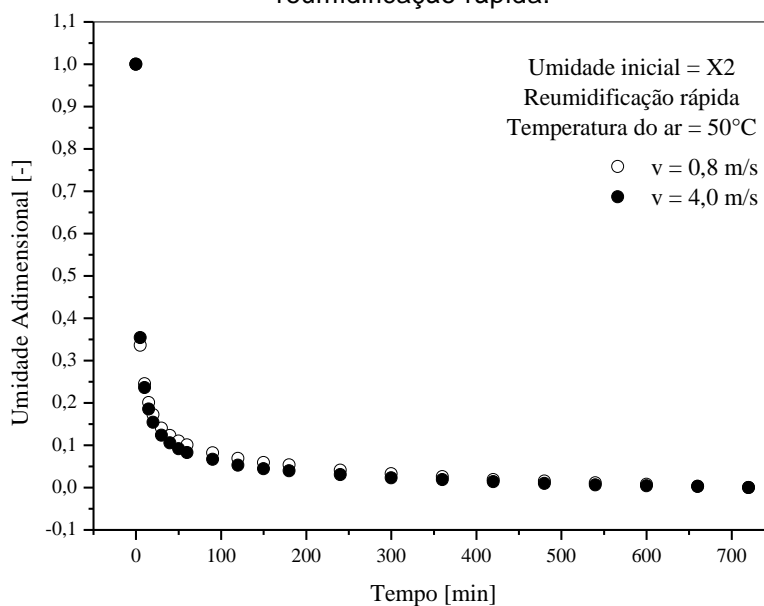
Nas Figuras 4.22 e 4.23, os dados experimentais de cinética de secagem foram expressos também através da umidade adimensional em função do tempo de secagem, mas com temperatura constante e velocidades do ar de secagem de 0,8 m/s e 4,0 m/s. Pode-se observar que a velocidade do ar de secagem não exerce influência significativa, indicando que a transferência de massa no interior dos grãos de cevada (difusão) corresponde à etapa limitante do processo de secagem, sendo o efeito convectivo desprezível.

**Figura 4. 22:** Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na velocidade do ar: reumidificação lenta.



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 4. 23:** Dados experimentais de cinética de secagem parametrizados na velocidade do ar: reumidificação rápida.

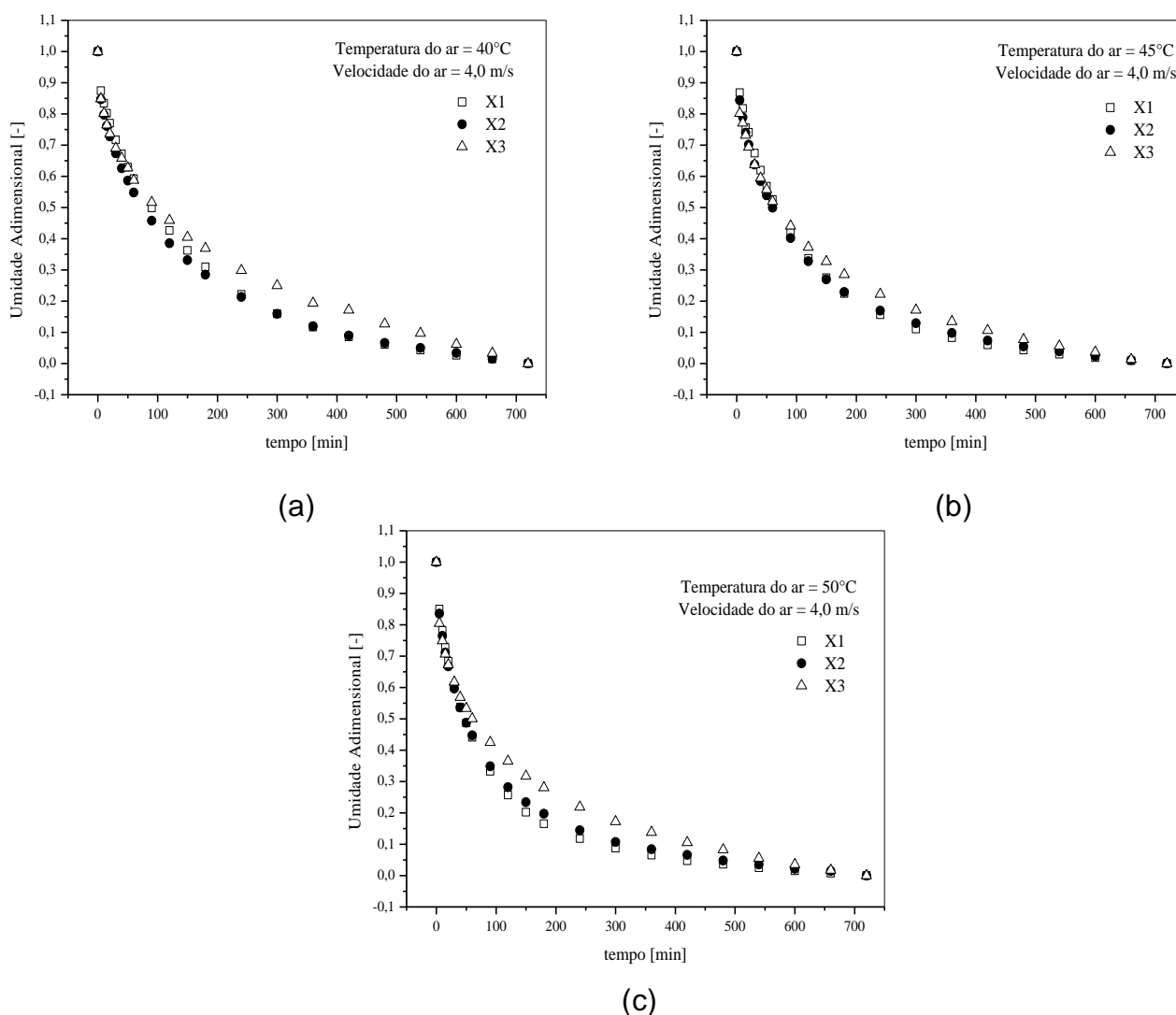


Fonte: Acervo pessoal.

Ao observar as Figuras 4.20 a 4.23 quanto à forma de reumidificação das amostras, verifica-se que a cevada reumidificada pelos métodos de reumidificação lenta e rápida, apresenta cinética de secagem diferente. O método de reumidificar altera a cinética de secagem dos grãos pelo fato de que ao se realizar uma reumidificação rápida e em seguida realizar o processo de secagem, a umidade do grão é mais superficial, quando comparado a uma reumidificação lenta, em que houve tempo para homogeneizar a umidade no interior dos grãos.

Na Figura 4.24 são apresentados os dados experimentais da cinética de secagem de grãos de cevada com diferentes umidades iniciais que passaram pelo processo de reumidificação lenta.

**Figura 4. 24:** Cinética de secagem para diferentes umidades iniciais: (a)  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $T = 50^{\circ}\text{C}$ .

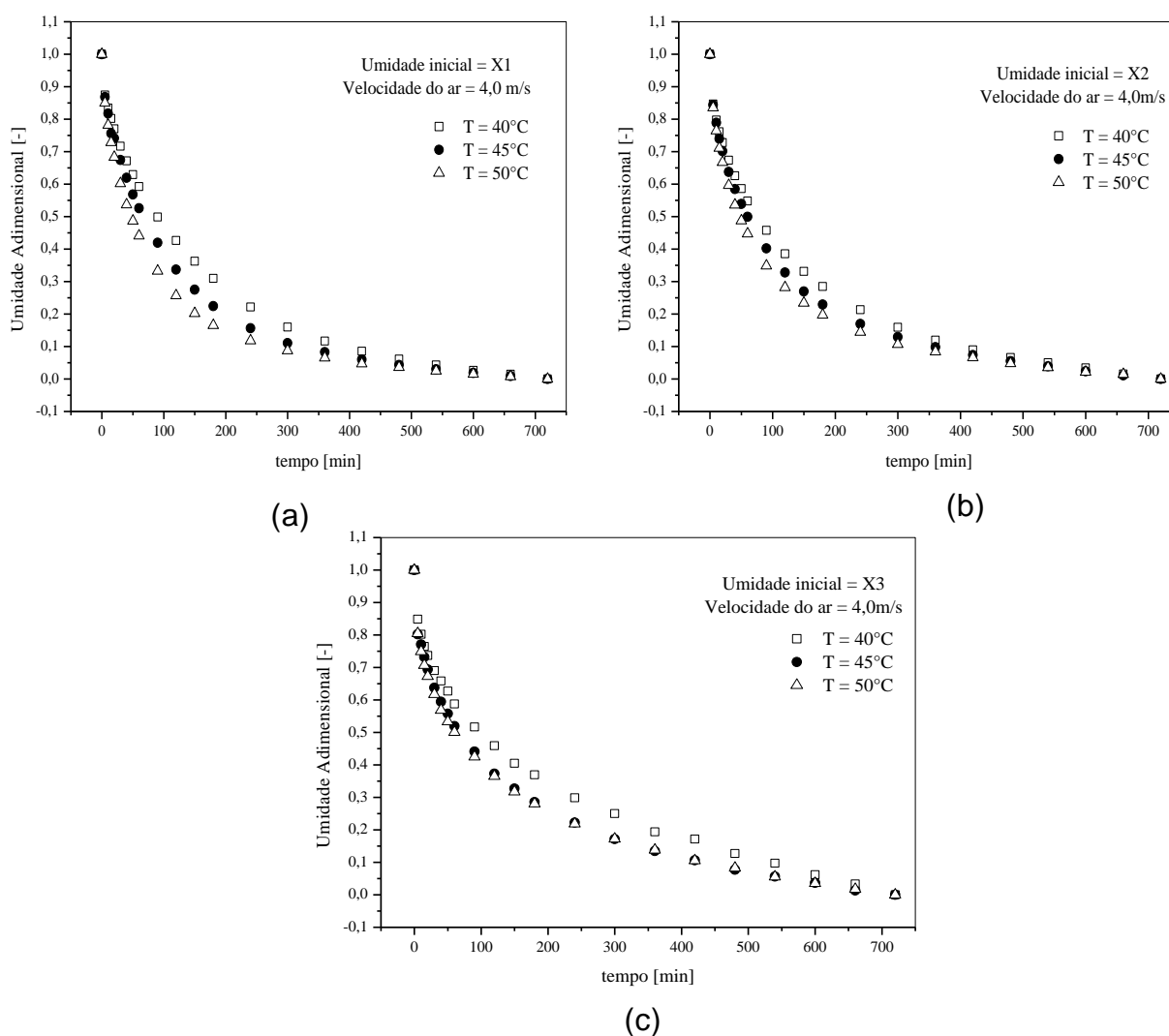


Fonte: Acervo pessoal.

Verifica-se nas Figuras 4.24 (a) a 4.24 (c) que o efeito das diferentes umidades iniciais é mais significativo na região intermediária, sendo observado que para a menor umidade inicial ( $X_3 = 0,16$  b.s.) é mais lenta a remoção de umidade quando comparado com  $X_1$  ( $0,36$  b.s.) e  $X_2$  ( $0,27$  b.s.), para as três temperaturas. Isto se deve ao fato de que quanto menor a quantidade de água no grão, mais ligada ela está, conseqüentemente é necessário empregar mais energia para removê-la do que em ocasiões com umidade maior.

Na Figura 4.25 são apresentados os dados experimentais da cinética de secagem de grãos de cevada parametrizados na temperatura do ar.

**Figura 4. 25:** Cinética de secagem: (a)  $X_1 = 0,36$  ( $\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{sól. seco}}$ ); (b)  $X_2 = 0,27$  ( $\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{sól. seco}}$ ) e (c)  $X_3 = 0,16$  ( $\text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{sól. seco}}$ ).

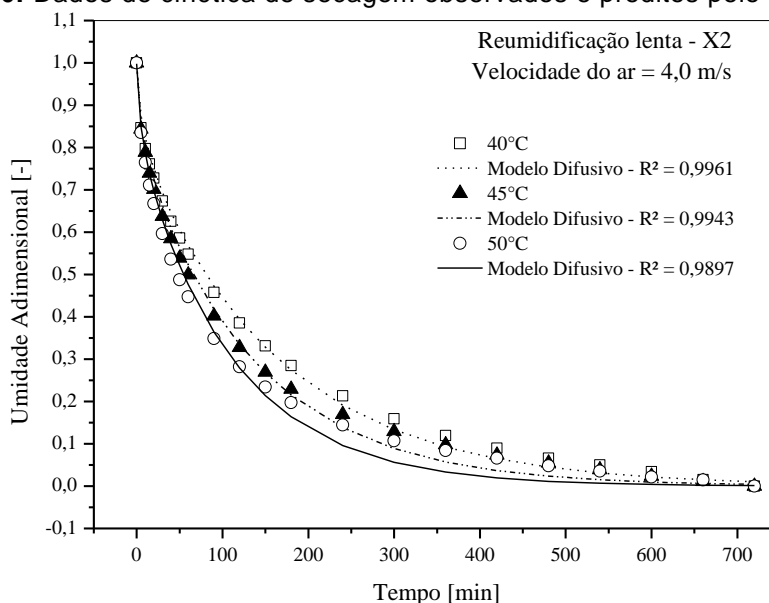


Fonte: Acervo pessoal.

Fica claro ao observar a Figura 4.25 (a) a 4.25 (c) que o aumento da temperatura influencia o processo de secagem, observa-se que o aumento da temperatura de 40°C para 50°C promoveu a diminuição da umidade em um tempo menor, pois ocorre um aumento na quantidade de energia térmica transferida do ar para o sólido, facilitando a transferência de umidade do sólido para o ar.

Na Figura 4.26 é apresentada uma comparação típica entre os dados observados e os preditos pelo Modelo Difusivo. O Modelo Difusivo foi resolvido pelo método de separação de variáveis (CRANK, 1975). Foram utilizados 100 termos na série, Equação 20, o que proporciona um erro de 0,01% no instante inicial de secagem ( $t=0$ ). A difusividade efetiva foi estimada com base nos critérios dos mínimos quadrados.

**Figura 4. 26:** Dados de cinética de secagem observados e preditos pelo modelo difusivo.



Fonte: Acervo pessoal.

Com base nos resultados apresentados, observa-se que apesar dos valores para o coeficiente de determinação serem superiores a 0,9, o ajuste proporcionado pelo Modelo Difusivo com  $D_{ef}$  constante não é satisfatório, subestimando os dados na etapa intermediária até o término do processo de secagem. Possivelmente, os desvios encontrados entre os dados observados e preditos podem estar relacionados com as considerações feitas para solução do

modelo. Dentre as considerações temos: encolhimento dos grãos desprezível e difusividade efetiva como constante. Com a caracterização física do material em função da umidade temos um indicativo de que ocorre encolhimento e no Modelo Difusivo com  $D_{ef}$  constante, os dados experimentais são ajustados considerando um valor médio do coeficiente difusivo, mas este parâmetro pode assumir diferentes comportamentos, sendo uma função, principalmente, da umidade e da temperatura do material (PERAZZINI et al., 2013).

Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores estimados de difusividade efetiva para cada experimento, em que o processo de reumidificação foi lento e a velocidade do ar de secagem foi de 4,0 m/s, e os respectivos valores das inferências estatísticas.

**Tabela 4. 11:** Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo difusivo.

Experimento	$D_{ef}$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	MSE	RMSE	$\chi^2$
10	9,1E-10	0,9997	0,0035	0,0052	2,84E-05
10R	9,2E-10	0,9997	0,0043	0,0056	3,30E-05
11	1,2E-09	0,9991	0,0082	0,0095	9,52E-05
11R	1,2E-09	0,9991	0,0084	0,0098	1,01E-04
12	1,6E-09	0,9960	0,0157	0,0198	4,11E-04
12R	1,6E-09	0,9976	0,0127	0,0156	2,55E-04
13	1E-09	0,9961	0,0175	0,0194	3,93E-04
13R	9,5E-10	0,9988	0,0096	0,0108	1,23E-04
14	1,2E-09	0,9943	0,0203	0,0233	5,70E-04
14R	1,2E-09	0,9956	0,0174	0,0207	4,51E-04
15	1,5E-09	0,9897	0,0269	0,0308	9,91E-04
15R	1,5E-09	0,9904	0,0252	0,0298	9,30E-04
16	7,6E-10	0,9872	0,0295	0,0295	1,20E-03
16R	8,8E-10	0,9908	0,0256	0,0289	8,77E-04
17	1,1E-09	0,9828	0,0338	0,0387	1,60E-03
17R	9,1E-10	0,9885	0,0283	0,0321	1,10E-03
18	1,1E-09	0,9731	0,0415	0,0473	2,30E-03
18R	1,1E-09	0,9809	0,0356	0,0408	1,70E-03

\* R : repetição

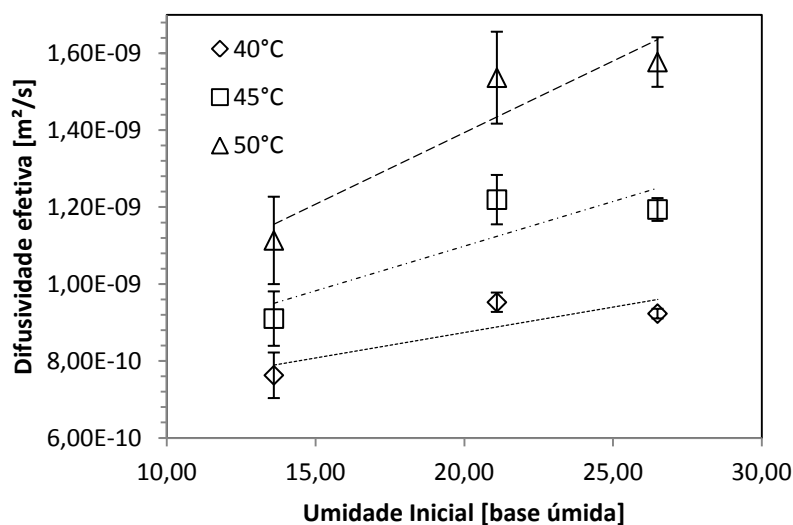
Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.27 mostra a dependência da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) com a temperatura e a umidade inicial dos grãos de cevada. Khatchaturian



(2012) verificou para grãos de soja que o valor da difusividade efetiva eleva-se quando os valores de temperatura e umidade inicial também são elevados e Doymaz (2005) estudando a cinética de secagem de feijão verde, verificou que a difusividade efetiva possui um comportamento linear crescente com a temperatura.

**Figura 4. 27:** Difusividade efetiva em função da temperatura para diferentes umidades iniciais.



Fonte: Acervo pessoal.

Assim, temos que difusividade efetiva dos grãos de cevada aumenta quando a temperatura e a umidade inicial aumentam. Mas, ao ajustar um comportamento linear crescente com a temperatura para os valores de  $D_{ef}$  estimados pelo Modelo Difusivo, Figura 4.27, observa-se que este ajuste não é satisfatório, pois os valores de  $D_{ef}$  para X1 (26,5 b.u.) decrescem quando comparados aos valores de  $D_{ef}$  para X2 (21,1 b.u.). Fato que pode ser explicado devido ao encolhimento que ocorre no leito de material durante o processo de secagem ser mais significativo para X1 que para X2. O encolhimento é considerado desprezível pelo Modelo Difusivo utilizados para nas estimativas de  $D_{ef}$ .

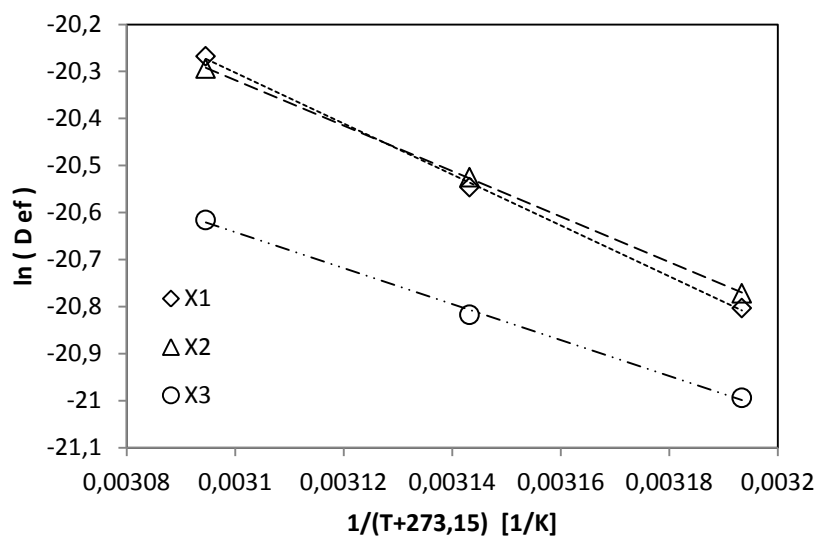
Neste trabalho, como o coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ) é tratado como uma difusividade efetiva, esta consideração permite avaliar a dependência da

difusividade efetiva com a temperatura através de uma correlação do tipo Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{Ea}{R\bar{T}}\right) \quad (31)$$

A Figura 4.28 apresenta a linearização da Equação 31, a inclinação da curva de correlação do tipo Arrhenius fornece a relação  $(Ea/R)$  enquanto sua intersecção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ . Segundo Kashaninejad et al. (2007), termodinamicamente, a energia de ativação ( $Ea$ ) representa a energia necessária para o rompimento da barreira que as moléculas de água encontram, durante o processo de secagem, ao migrarem do interior para a superfície do produto.

**Figura 4. 28:** Correlação do tipo Arrhenius entre o coeficiente de difusividade efetiva e temperatura.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os resultados dos ajustes mostrados na Figura 4.28, menos energia de ativação é necessária para menor umidade inicial. Os valores da energia de ativação se mostram condizentes com

a literatura. Segundo Zogzas et al. (1996) os valores da energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 13 e 110 kJ/mol.

**Tabela 4. 12:** Parâmetros da correlação do tipo Arrhenius.

Parâmetros	X1	X2	X3
$D_0$ [m <sup>2</sup> /s]	3,00E-02	4,87E-03	1,53E-04
$E_a$ [J/mol]	45045,47	40215,57	31807,12
$R^2$	0,999	0,9999	0,9978

Fonte: Acervo pessoal.

Além do Modelo Difusivo, os dados de umidade adimensional em função do tempo foram ajustados às equações semi-empíricas apresentadas na Tabela 2.2.

Nas Tabelas 4.13 a 4.16 são apresentados os resultados da estimação dos parâmetros dos modelos por mínimos quadrados para cada experimento.

**Tabela 4. 13:** Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Page.

Experimento	$k_p$ (s <sup>-1</sup> )	$n_p$ (-)	$R^2$	MSE	RMSE	$\chi^2$
10	0,0012	0,7446	0,9962	0,0169	0,0199	4,38E-04
10R	0,0012	0,7480	0,9958	0,0181	0,0210	4,83E-04
11	0,0017	0,7266	0,9986	0,0094	0,0120	1,59E-04
11R	0,0017	0,7294	0,9990	0,0080	0,0104	1,19E-04
12	0,0029	0,6888	0,9997	0,0048	0,0056	3,39E-05
12R	0,0022	0,7227	0,9995	0,0062	0,0074	6,03E-05
13	0,0026	0,6682	0,9963	0,0155	0,0188	3,90E-04
13R	0,0018	0,7028	0,9962	0,0160	0,0194	4,16E-04
14	0,0033	0,6583	0,9987	0,0083	0,0111	1,37E-04
14R	0,0028	0,6727	0,9989	0,0072	0,0104	1,19E-04
15	0,0046	0,6328	0,9996	0,0041	0,0061	4,09E-05
15R	0,0043	0,6419	0,9996	0,0047	0,0062	4,23E-05
16	0,0032	0,6259	0,9896	0,0242	0,0299	9,80E-04
16R	0,0030	0,6433	0,9912	0,0233	0,0283	8,79E-04
17	0,0048	0,6043	0,9938	0,0179	0,0231	5,88E-04
17R	0,0036	0,6273	0,9932	0,0204	0,0246	6,68E-04
18	0,0064	0,5758	0,9942	0,0176	0,0220	5,31E-04
18R	0,0052	0,5998	0,9952	0,0165	0,0204	4,56E-04

\* R : repetição

Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 4. 14:** Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Lewis.

Experimento	$k_L(s^{-1})$	$R^2$	MSE	RMSE	$\chi^2$
10	1,25E-04	0,9709	0,0468	0,0553	3,20E-03
10R	1,27E-04	0,9716	0,0453	0,0548	3,10E-03
11	1,66E-04	0,9723	0,0456	0,0537	3,00E-03
11R	1,68E-04	0,9736	0,0451	0,0525	2,90E-03
12	2,26E-04	0,9672	0,0479	0,0567	3,40E-03
12R	2,22E-04	0,9762	0,0414	0,0492	2,50E-03
13	1,44E-04	0,9453	0,0618	0,0723	5,50E-03
13R	1,33E-04	0,9582	0,0550	0,0645	4,40E-03
14	1,78E-04	0,9487	0,0602	0,0698	5,10E-03
14R	1,74E-04	0,9549	0,0575	0,0662	4,60E-03
15	2,17E-04	0,9432	0,0618	0,0721	5,40E-03
15R	2,22E-04	0,9484	0,0591	0,0691	5,00E-03
16	1,07E-04	0,9052	0,0778	0,0903	8,50E-03
16R	1,23E-04	0,9219	0,0720	0,0844	7,50E-03
17	1,54E-04	0,9058	0,0773	0,0905	8,60E-03
17R	1,29E-04	0,9148	0,0755	0,0871	8,00E-03
18	1,65E-04	0,8847	0,0846	0,0980	1,01E-02
18R	1,62E-04	0,9045	0,0785	0,0912	8,70E-03

\* R : repetição

Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 4. 15:** Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Henderson e Pabis.

Experimento	$k_B(s^{-1})$	a (-)	$R^2$	MSE	RMSE	$\chi^2$
10	1,03E-04	0,8951	0,9803	0,0190	0,0279	8,56E-04
10R	1,05E-04	0,8956	0,9926	0,0183	0,0276	8,40E-04
11	1,35E-04	0,8940	0,9928	0,0231	0,0312	1,00E-03
11R	1,37E-04	0,8965	0,9907	0,0231	0,0307	1,00E-03
12	1,80E-04	0,8872	0,9909	0,0305	0,0384	1,60E-03
12R	1,84E-04	0,9016	0,9850	0,0255	0,0327	1,20E-03
13	1,08E-04	0,8600	0,9895	0,0283	0,0390	1,70E-03
13R	1,04E-04	0,8768	0,9841	0,0240	0,0339	1,30E-03
14	1,33E-04	0,8617	0,9885	0,0321	0,0423	2,00E-03
14R	1,33E-04	0,8705	0,9812	0,0310	0,0405	1,80E-03
15	1,59E-04	0,8554	0,9831	0,0383	0,0477	2,50E-03
15R	1,66E-04	0,8630	0,9751	0,0378	0,0470	2,40E-03
16	7,63E-05	0,8383	0,9761	0,0334	0,0457	2,30E-03
16R	8,90E-05	0,8436	0,9757	0,0314	0,0440	2,10E-03
17	1,03E-04	0,8222	0,9788	0,0339	0,0490	2,60E-03
17R	9,11E-05	0,8370	0,9724	0,0335	0,0464	2,40E-03
18	1,04E-04	0,8055	0,9758	0,0393	0,0548	3,30E-03
18R	1,08E-04	0,8218	0,9682	0,0388	0,0526	3,00E-03

\* R : repetição

Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 4. 16:** Resultados estatísticos da estimação por mínimos quadrados para o modelo de Overhults.

Experimento	$k_0(s^{-1})$	$n_0 (-)$	$R^2$	MSE	RMSE	$\chi^2$
10	1,23E-04	0,7446	0,9962	0,0169	0,0199	4,38E-04
10R	1,25E-04	0,7480	0,9958	0,0181	0,0210	4,83E-04
11	1,59E-04	0,7267	0,9986	0,0094	0,0120	1,59E-04
11R	1,60E-04	0,7294	0,9990	0,0080	0,0104	1,19E-04
12	2,11E-04	0,6888	0,9997	0,0048	0,0056	3,39E-05
12R	2,10E-04	0,7227	0,9995	0,0062	0,0074	6,03E-05
13	1,38E-04	0,6682	0,9963	0,0155	0,0188	3,90E-04
13R	1,29E-04	0,7028	0,9962	0,0160	0,0194	4,16E-04
14	1,68E-04	0,6583	0,9987	0,0083	0,0111	1,37E-04
14R	1,64E-04	0,6727	0,9989	0,0072	0,0104	1,19E-04
15	2,00E-04	0,6328	0,9996	0,0041	0,0061	4,09E-05
15R	2,04E-04	0,6419	0,9996	0,0047	0,0062	4,23E-05
16	1,05E-04	0,6259	0,9896	0,0242	0,0299	9,80E-04
16R	1,21E-04	0,6433	0,9912	0,0233	0,0283	8,79E-04
17	1,47E-04	0,6043	0,9938	0,0179	0,0231	5,88E-04
17R	1,25E-04	0,6273	0,9932	0,0204	0,0246	6,68E-04
18	1,56E-04	0,5758	0,9942	0,0176	0,0220	5,31E-04
18R	1,53E-04	0,5998	0,9952	0,0165	0,0204	4,56E-04

\* R : repetição

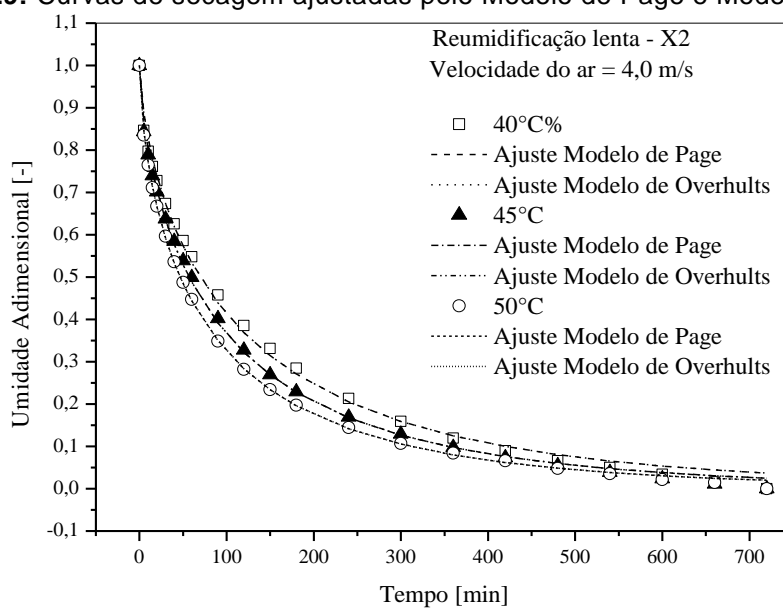
Fonte: Acervo pessoal.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi o primeiro critério estatístico para selecionar a melhor correlação. Além do  $R^2$ , o erro parcial médio (MSE), definido pela Equação 28, a raiz quadrada do erro médio (RMSE), definida pela Equação 29 e o chi-quadrado ( $\chi^2$ ) definido pela Equação 30, foram usados para indicar um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais de secagem. Quanto maior o valor de  $R^2$  e menores os valores de MSE, RMSE e  $\chi^2$ , melhor o ajuste (PEREIRA, 2010).

Com os dados apresentados nas tabelas, verifica-se que o Modelo de Page e o Modelo de Overhults apresentam os mesmos valores para o parâmetro  $n$ , para o coeficiente de determinação, para o erro parcial médio, para a raiz quadrada do erro médio e para o chi-quadrado, sendo os modelos indicados para representar a cinética de secagem dos grãos de cevada. Segundo Vieira (2012), este resultado era esperado, pois com um simples rearranjo das equações e uma parametrização permitem verificar que as equações são equivalentes. Na literatura, o Modelo de Overhults é também denominado como Modelo de Page Modificado.

A Figura 4.29 apresenta, como exemplo, resultados da comparação da resposta fornecida pelo Modelo de Page e Modelo de Overhults confrontados com os dados de secagem obtidos experimentalmente. Observa-se que o Modelo de Page e o Modelo de Overhults coincidem e representam bem os dados experimentais, ocorrendo uma superestimação pelos modelos ao final da secagem.

**Figura 4. 29:** Curvas de secagem ajustadas pelo Modelo de Page e Modelo de Overhults.



Fonte: Acervo pessoal.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos dados experimentais apresentados neste trabalho, foi possível obter as seguintes conclusões.

As técnicas de picnometria líquida e gasosa, análise granulométrica, empacotamento e análise de imagens foram adequadas para a determinação das características dos grãos.

Com os valores calculados para o diâmetro médio de Sauter, 3,75 mm, 3,65 mm e 3,62 para X1, X2 e X3, respectivamente, podemos concluir que a variedade de cevada estudada é do tipo *premium*.

Na faixa de umidade estudada, 0,36 (b.s.) a 0,16 (b.s.), as medidas obtidas por análise de imagens para o comprimento, espessura, perímetro e circularidade não apresentaram variação significativa. Houve diferença significativa entre as médias das medidas de largura e área. Para as medidas calculadas a partir das medidas obtidas pela análise de imagens, há diferença significativa entre os valores do diâmetro da parte esférica, área superficial e volume para as comparações entre X1(0,36 b.s.) e X3(0,16 b.s.). Não há diferença entre as médias calculadas para esfericidade pela Equação 7.

Para as massas específicas, os testes t de Student confirmam que houve diferença significativa entre as médias das medidas. Apenas para as medidas de massa específica real entre X1 e X2 não houve diferença significativa entre as médias das medidas. Os valores da massa específica aparente e massa específica real diminuem com o aumento da umidade dos grãos de cevada.

Ao calcular as porosidades da partícula, bulk e total, o teste t de Student confirma que não há diferença entre as médias da porosidade das partículas. Já para a porosidade bulk e total há diferença entre as médias, apenas quando comparamos X2 (0,27 b.s.) e X3 (0,16 b.s.) não há diferença entre as médias.

Há um aumento nos valores da massa e volume de 1000 grãos de cevada com o aumento da umidade e foi confirmado pelo teste t de Student que a diferença entre as médias das medidas é significativa.

As características físicas do material em função da umidade apresentaram variação significativa, o que implicou em mudanças externas, sendo um indicativo do encolhimento durante a secagem.

A metodologia experimental empregada mostrou-se adequada para a determinação da espessura da camada fina (1 cm) e para o estudo da cinética de secagem em leito fixo.

Os experimentos de cinética de secagem em secador de leito fixo e camada fina forneceram dados de umidade em função do tempo, em que se verificou que a temperatura do ar tem influência significativa na secagem dos grãos de cevada e a velocidade do ar de secagem não exerce influência significativa, indicando que a transferência de massa no interior dos grãos de cevada corresponde à etapa limitante durante o processo de secagem, sendo o fenômeno convectivo desprezível.

A cinética de secagem ajustada pelo Modelo Difusivo apresentou coeficiente de determinação superior a 0,9, mas o ajuste não foi satisfatório, pois subestimou os resultados da etapa intermediária ao término do processo. Estes desvios, possivelmente, estão relacionados ao fato de existir encolhimento do grão e não ser considerado no modelo e por considerar a difusividade efetiva constante. O Modelo Difusivo, nesta abordagem, ajusta-se aos dados experimentais considerando um valor médio do coeficiente difusivo, mas durante a secagem, este parâmetro pode assumir diferentes comportamentos, sendo uma função, principalmente, da umidade e da temperatura do material.

A partir da discriminação das principais equações de secagem semi-empíricas, com a aplicação de inferências estatísticas, o Modelo de Page e de Overhults apresentaram o melhor ajuste aos dados de umidade em função do tempo.

Portanto, o estudo possibilitou a caracterização dos grãos de cevada em função da umidade, inclusive quanto ao seu comportamento durante a secagem. Permitiu uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem em leito fixo e camada fina dos grãos de cevada, o que contribui para o desenvolvimento de projetos e controle de novos secadores, como também para a otimização de secadores já existentes.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros com grãos de cevada são apresentadas algumas sugestões:

- fazer um estudo das isotermas de equilíbrio;
- estudo da transferência simultânea de calor e massa em leito fixo e camada espessa, com e sem reversões do escoamento do ar de secagem;
- realizar ensaios de análise de qualidade após o processo de secagem para saber se as condições operacionais e o modo de secagem são adequados para os grãos de cevada quando a germinação é um dos objetivos pretendidos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 (AOAC). **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 17 ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC, 2002, Vol. 2.

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

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. **Regras para Análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

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

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.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C. **Journal Agriculture Engineering Research**. 1985. Vol. 32. p. 337-347.

BRUSEWITZ, G. H. Density of rewetted high moisture grains. **Transactions of the ASAE**. 1972, Vol. 15, n. 2, p. 320-323. Citado por COUTO, S. M.,

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

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

CHANG, S. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer. **Cereal Chemistry**. 1988. Vol. 65(1), p. 13-15.

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.

DE MORI, C. de, MINELLA, E. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada**. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do139.pdf](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do139.pdf)>. Acesso em: 08 out. 2013.

DOYMAZ, I. Drying behavior of green beans. **Journal of Food Engineering**. 2005. Vol. 69, p. 161-165.

EFREMOV, G., MARKOWSKI, M., BIALOBRZEWSKI, I., ZIELINSKA, M. Approach to calculation time-dependent moisture diffusivity for thin layered biological materials. **Int. Commun. Heat Mass Transf.**, 2008. Vol. 35, p. 1069-1072.

FELIZARDO, M. P. **Caracterização física e de secagem em sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage)**. 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.

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.

GOLDEMBERG, J. **Física Geral e Experimental**. 3 ed. São Paulo: Nacional, 1977. 528 p.

JAYAS, D. S., CENKOWSKI, S., PABIS, S., MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**. Vol. 9 (3), 1991. p. 551 – 558.

JAYAS, D. S., CENKOWSKI, S. Grain property values and their measurement. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3<sup>a</sup> ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. Cap. 24, p. 575 – 603.

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.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**. 2007. Vol. 78, p. 98 – 108.

KHATCHATOURIAN, O. A. Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. **Biosystems engineering**. Vol. 113. 2012. p. 54 - 64.  
KUNZE, W. Technology Brewing and Malting. Berlin: Versuchs und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB). 2004.

LIMA, R. A. B. **Análise da secagem convectiva de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)**. 2013. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2013.

MAYER, E. T. **Caracterização bromatológica de grãos de cevada e efeito da fibra alimentar na resposta biológica de ratos**. 2007. 75p. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007. 75 p.

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 leito fixo**. 2001. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2001.

MOHSENIN, 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 .

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.

PERAZZINI, H., FREIRE, F. B., FREIRE, J.T. Estudo da difusividade efetiva na secagem de meios porosos como parâmetro constante ou como variável. **Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP)**. 20013.

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.

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. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

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.

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.

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.

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.

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.

TURCHIULI, C.; ELOUALIA, Z.; MANSOURI, N.E.; DUMOULIN, E. Fluidised bed agglomeration: agglomerates shape and end-use properties. **Powder Technology**, 2005, Vol. 157, p. 168 – 175.

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.

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

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