

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

HEITOR OTACÍLIO NOGUEIRA ALTINO

SECAGEM EM LEITO FIXO DE MATERIAIS
GRANULARES COM DIFERENTES ESFERICIDADES

SÃO CARLOS - SP
2019

HEITOR OTACÍLIO NOGUEIRA ALTINO

SECAGEM EM LEITO FIXO DE MATERIAIS GRANULARES COM DIFERENTES
ESFERICIDADES

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

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Heitor Otacílio Nogueira Altino, realizada em 19/02/2019:

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira
UFSCar

Profa. Dra. Renata Nepomuceno da Cunha
UNIPAM

Prof. Dr. Gustavo Dias Maia
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Renata Nepomuceno da Cunha e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira

*Dedico este estudo à minha
família: Gilson, Cleonice e
Mísia, por tudo que vocês
fizeram por mim.*

“E não nos cansemos de fazer o bem, pois no tempo próprio ceifaremos, se não desfalecermos.” Gálatas 6.9

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado à vida, amor, força e as pessoas magníficas com quem eu convivo. Toda honra e glória seja dada a Ele.

A minha família, Gilson Altino da Fonseca, Cleonice Nogueira Altino e Mísia Nogueira Altino, pelo amor e suporte durante toda minha trajetória de vida. Sem vocês não seria possível realizar este trabalho.

A minha amada Sarah Arvelos, por todo amor, carinho, conselhos e suporte. Espero um dia poder retribuir tudo que você fez por mim.

A minha orientadora Prof^ª. Maria do Carmo Ferreira, pela orientação atenciosa e por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas. Obrigado pela confiança depositada em mim.

A Prof^ª. Renata Nepomuceno da Cunha do DEQ/UNIPAM por me iniciar e incentivar a prosseguir na carreira acadêmica.

Ao Prof. José Teixeira Freire pelos excelentes conselhos no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores da área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar, Fabio Bentes Freire, Rodrigo Bettega e Gustavo Dias Maia pelos conhecimentos compartilhados.

Aos técnicos Edilson Milare, Oscar da Silva e Samuel Ferreira dos Santos por toda ajuda na construção do sistema de secagem e auxílio na resolução de problemas. Sem vocês esse trabalho não seria possível.

Ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMa/UFSCar pelo auxílio nas análises de Microscopia Confocal de Varredura a Laser.

Ao Concelho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) (processo nº 131773/2018-6) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Aos amigos e colegas do Centro de Secagem e DEQ/UFSCar pelo companheirismo e momentos de descontração.

RESUMO

O processo de secagem de materiais particulados biológicos em leito fixo sofre influência de diversos fatores associados às partículas e ao empacotamento dos leitos. O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a secagem de materiais particulados com diferentes características internas e externas e investigar como tais características influenciam nas propriedades fluidodinâmicas do leito, perfis axiais de temperatura e cinética de secagem em camada fina. Pretende-se revisitar a análise da secagem de grãos com dados experimentais obtidos de forma padronizada e incorporando técnicas de aquisição *on-line* para medidas de temperatura e umidade. Os materiais selecionados foram: soja, lentilha verde, cevada, aveia e esferas de alumina. As propriedades físico-químicas das partículas bem como as características *bulk* e fluidodinâmicas dos leitos foram medidas em diferentes conteúdos de umidade da fase sólida. A espessura da camada fina, bem como a transferência de calor no leito, foi analisada por avaliação dos perfis axiais de temperatura ao longo do leito. A cinética de secagem dos materiais foi estudada em leito fixo em camada fina em condições operacionais constantes. Os resultados evidenciaram que as características dos leitos são fortemente dependentes de propriedades como tamanho, formato e rugosidade superficial das partículas, resultando em leitos com diferentes características de empacotamento, tais como densidade *bulk*, porosidade, permeabilidade e tortuosidade. O raio hidráulico e a permeabilidade dos materiais biológicos apresentaram a seguinte ordem decrescente de magnitude: soja, lentilha, cevada e aveia. Já a tortuosidade apresentou uma ordem inversa. O fator de resistência inercial apresentou valores semelhantes entre os materiais, com a exceção da lentilha. A queda de pressão foi maior nos leitos com menor permeabilidade e maior fator de resistência inercial. Os perfis axiais de temperatura mostraram que os materiais empacotados com umidade inicial de $0,24 \text{ g.g}^{-1} \text{ b.s.}$ apresentaram diferentes taxas de aquecimento, conforme a ordem decrescente: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. As curvas de taxa de secagem obtidas indicaram que a resistência interna ao transporte de umidade nos materiais controlou a cinética de secagem e que os materiais apresentaram diferentes taxas de secagem, em ordem crescente: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. As difusividades efetivas foram estimadas com base no ajuste da solução de um modelo difusivo aos dados experimentais, assumindo a condição de equilíbrio termodinâmico na saída do leito. O modelo previu com boa precisão as curvas cinéticas para todos os materiais.

Palavras-chave: Secagem. Leito fixo. Materiais particulados. Transferência de calor. Fluidodinâmica.

ABSTRACT

The drying process of particulate biological materials in fixed bed is influenced by several factors associated with the particles and the bed packing. The main objective of this research was to evaluate the drying of particulate materials with different internal and external characteristics and to investigate how these characteristics influence the bed fluid dynamics, axial temperature profiles and thin layer drying kinetics. It is intended to revisit the analysis of grain drying with experimental data obtained in a standardized way and incorporating on-line acquisition techniques for temperature and humidity measurements. The selected materials were: soy, green lentil, barley, oats and spheres of alumina. The physicochemical properties of the particles as well as the bulk and fluid dynamics characteristics of the packed-beds were measured in different moisture contents of the solid phase. The thickness of the thin layer, as well as the heat transfer in the bed, was analyzed by evaluation of the axial temperature profiles along the bed. The drying kinetics of the materials was studied in a thin layer fixed bed under constant operating conditions. The results evidenced that the characteristics of the beds are strongly dependents of properties like size, shape and surface roughness of the particles, resulting in different bed packing characteristics, such as bulk density, porosity, permeability and tortuosity. The hydraulic radius and permeability of the biological materials presented the following decreasing order of magnitude: soy, lentil, barley and oats. On the other hand, the tortuosity exhibited an inverse order. The inertial resistance factor showed similar values among the materials, with the exception of lentils. The pressure drop was higher in the beds with lower permeability and higher inertial resistance factor. The axial temperature profiles revealed that packed materials with initial moisture of $0.24 \text{ g.g}^{-1} \text{ d.b.}$ had different heating rates, according to the descending order: soy, lentil, barley, oats and alumina. The effective diffusivities were estimated based on the fit of a diffusive model to the experimental data, assuming a condition of thermodynamic equilibrium at the exit of the bed. The model predicted with good accuracy the kinetic curves for all materials.

Keywords: Drying. Fixed bed. Particulate materials. Heat transfer. Fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sementes genéricas de cereal (a) e legume (b).	4
Figura 2 – Dimensões de uma partícula esferoide triaxial: comprimento (C_p), largura (L_p) e espessura (E_p).	6
Figura 3 – Ilustração da rugosidade média aritmética em relação ao perfil de rugosidade.....	9
Figura 4 – Processo de obtenção da densidade <i>bulk</i> de leitos empacotados.	11
Figura 5 – Ilustração das resistências envolvidas na queda de pressão em um meio poroso..	14
Figura 6 – Sistema de secagem de grãos em leito fixo e camada espessa.....	16
Figura 7 – Curvas de umidade em função do tempo (a) e taxa de secagem em função da umidade (b).	19
Figura 8 – Ilustração dos processos de transferência de massa interna e externa.	20
Figura 9 – Materiais particulados selecionados na umidade de 0,24 g.g ⁻¹ b.s.; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e).	26
Figura 10 – Sistema experimental para avaliação da queda de pressão em leitos empacotados com materiais particulados.	28
Figura 11 – Sistema experimental para a determinação da condição de camada fina em leitos empacotados com materiais particulados.	30
Figura 12 – Leito-fixo para obtenção dos dados de temperatura em função do tempo.....	31
Figura 13 – Leito fixo utilizado nos ensaios de secagem em camada fina.....	32
Figura 14 – Características das partículas com diferentes conteúdos de umidade; espessura (E_p) (a), largura (L_p) (b), comprimento (C_p) (c), diâmetro médio (D_m) (d), volume (V_p) (e), esfericidade (φ) (f), densidade aparente (ρ_a) (g) e rugosidade média aritmética (R_a) (h).	35
Figura 15 – Textura superficial das partículas com diferentes conteúdos de umidades; soja a 0,24 (a) e X^* (b), lentilha a 0,24 (c) e X^* (d), cevada a 0,24 (e) e X^* (f), aveia a 0,24 (g) e X^* (h) e alumina a 0,24 (i) e X^* (j) g.g ⁻¹ b.s..	36
Figura 16 – Características dos leitos com diferentes conteúdos de umidade; densidade <i>bulk</i> (ρ_b) (a) e porosidade <i>bulk</i> (ε_b) (b).	37
Figura 17 – Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos empacotado com diferentes umidades; raio hidráulico (R_h) (a), permeabilidade (κ) (b), fator de resistência (c) (c) e tortuosidade (τ) (d). ..	40
Figura 18 – Queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade superficial em diferentes conteúdos de umidade; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). ..	44
Figura 19 – Valores experimentais e preditos (Equação (38)) de $\Delta P/L$ versus velocidade em leitos de materiais biológicos; soja 7,9% b.u. (funil) (a), lentilha a 11,4% b.u. (leito disperso)	

(b), cevada a 17,0% b.u. (leito com 6,2 cm) (c), e aveia a 14,0% b.u. (dia 0, 0 kPa) (d).....	45
Figura 20 – Temperatura em função do tempo para os leitos empacotados; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g.g}^{-1} \text{ b.s.}$, $UR = 13,0\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$.	48
Figura 21 – Temperatura em função do tempo nos leitos empacotados: soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = X^*$, $UR = 13,0\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$	51
Figura 22 – Taxas de aquecimento nos leitos com $X_i = 0,24$ (a) e $X_i = X^*$ (b) $\text{g.g}^{-1} \text{ b.s.}$	53
Figura 23 – Distribuições de temperatura para os leitos com partículas na umidade X^* para os tempos de 50 s (a), 100 s (b), 150 s (c) e 200 s (d) do início da secagem.	54
Figura 24 – Taxas de secagem em função da umidade dos materiais; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g.g}^{-1} \text{ b.s.}$, $UR = 13,2\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$	56
Figura 25 – Curvas de cinética de secagem dos materiais particulados; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g.g}^{-1} \text{ b.s.}$, $UR = 13,2\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$	59
Figura 26 – Resposta típica de D_{eff} (a) e R^2 (b) em função de Bi_m obtida na Abordagem II. ...	60
Figura 27 – Valores da razão L/D_{eff} para os diferentes materiais.	62

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante empírica da Equação (38)	$[L^{-2} \cdot \%^{-1} \text{ b.s.}]$
A_e	Área superficial da esfera equivalente	$[L^2]$
A_p	Área superficial do esferoide triaxial	$[L^2]$
A_r	Área superficial real	$[L^2]$
A_s	Área superficial da fase sólida	$[L^2]$
B	Constante empírica da Equação (38)	$[L^{-2}]$
Bi_m	Número de Biot mássico	$[-]$
C	Constante empírica da Equação (38)	$[T.L^{-3} \cdot \%^{-1} \text{ b.s.}]$
c	Fator de resistência inercial	$[T.L^{-3}]$
$C_{A,i}$	Conteúdo de água no interior do solido	$[M.L^{-3}]$
$C_{A,s}$	Conteúdo de água na superfície do solido	$[M.L^{-3}]$
$C_{A,\infty}$	Conteúdo de água na corrente de ar livre	$[M.L^{-3}]$
C_p	Comprimento da partícula	$[L]$
D	Constante empírica da Equação (38)	$[T.L^{-3}]$
D_A	Coefficiente de difusividade de água	$[L.T^{-2}]$
D_{eff}	Coefficiente de difusividade efetiva	$[L.T^{-2}]$
D_c	Diâmetro da vazo cilíndrico	$[L]$
D_e	Diâmetro da esfera	$[L]$
D_m	Diâmetro principal da partícula	$[L]$
d_p	Diâmetro médio de Sauter	$[L]$
E_p	Espessura da partícula	$[L]$
$f(x_i)$	Dado predito pelo modelo/equação	$[-]$
F_{obj}	Função objetiva	$[-]$
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa	$[L.T^{-1}]$
N	Número de observações	$[-]$
$N_{A,s}$	Fluxo de água na superfície do sólido	$[M.T^{-1}.L^{-2}]$
M_L	Massa do meio poroso	$[M]$
M_p	Massa da partícula	$[M]$
ℓ	Comprimento da amostra	$[L]$
L	Distancia entre tomadas de pressão ou comprimento do leito	$[L]$
L_c	Comprimento específico	$[L]$
L_s	Massa de solido seco	$[M]$
L_p	Largura da partícula	$[L]$
R	Taxa de secagem	$[M.T^{-1}.L^{-2}]$
R^2	Coefficiente de determinação	$[-]$
R_a	Rugosidade média aritmética	$[L]$
R_h	Raio hidráulico médio	$[L]$
R_m	Raio médio da partícula	$[L]$
R_{1°	Taxa de secagem média no primeiro período decrescente	$[M.T^{-1}.L^{-2}]$
R_{2°	Taxa de secagem média no segundo período decrescente	$[M.T^{-1}.L^{-2}]$
$REQM$	Raiz do erro quadrático médio	$[-]$
Re_m	Número de Reynolds para o meio poroso	$[-]$

t	Tempo	[T]
T_{eq}	Temperatura de equilíbrio	[Θ]
t_{eq}	Tempo de equilíbrio do processo de aquecimento	[T]
T_i	Temperatura inicial	[Θ]
t_i	Tempo inicial do processo de aquecimento	[T]
T_g	Temperatura do ar	[Θ]
t_{1°	Tempo de duração do primeiro período decrescente	[T]
t_{2°	Tempo de duração do segundo período decrescente	[T]
U	Velocidade superficial do ar	[L.T ⁻¹]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
V_e	Volume da esfera equivalente	[L ³]
V_L	Volume total do meio poroso	[L ³]
V_p	Volume do esferoide triaxial	[L ³]
W	Massa total do sólido úmido	[M]
W_s	Massa total do sólido seco	[M]
X	Conteúdo de umidade livre	[% b.s.]
X_i	Conteúdo de umidade inicial	[% b.s.]
X_t	Conteúdo de umidade total	[% b.s.]
X_c	Umidade crítica entre o primeiro e o segundo período	[% b.s.]
X^*	Conteúdo de umidade no equilíbrio	[% b.s.]
y_i	Dados experimentais	[-]
Y_{eq}	Umidade do ar de equilíbrio	[M.M ⁻¹]
Y_∞	Umidade do ar livre	[M.M ⁻¹]
z	Coordenada axial	[L]
β	Fator de forma	[-]
β_t	Fator de forma relacionado à seção transversal do tubo/poro	[-]
ΔP	Queda de pressão	[M.L ⁻¹ .T ⁻²]
Δt	Varição de tempo para se alcançar o equilíbrio térmico	[T]
ΔT	Varição de temperatura entre início e o equilíbrio térmico	[Θ]
ε_b	Densidade <i>bulk</i> média	[M.M ⁻¹]
κ	Permeabilidade	[L ⁻²]
μ	Viscosidade do ar	[M.L ⁻¹ .T ⁻¹]
ρ	Densidade do ar	[M.L ⁻³]
ρ_a	Densidade aparente	[M.L ⁻³]
ρ_b	Densidade <i>bulk</i> média	[M.L ⁻³]
φ	Esfericidade segundo Moshenin (1970)	[-]
ϕ	Esfericidade segundo Wadell (1933)	[-]
λ_n	Raízes da equação transcendental	[-]
τ	Tortuosidade do meio poroso	[-]

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 MATERIAIS PARTICULADOS BIOLÓGICOS.....	3
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS PARTICULADOS.....	5
2.2.1 Propriedades das partículas	5
2.2.1.1 Dimensões características	6
2.2.1.2 Esfericidade	7
2.2.1.3 Densidade aparente	8
2.2.1.4 Rugosidade superficial.....	9
2.2.2 Propriedades <i>bulk</i> de leitos fixos	10
2.2.2.1 Densidade <i>bulk</i>	10
2.2.2.2 Porosidade <i>bulk</i>	12
2.2.3 Encolhimento	12
2.3 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS DE LEITOS FIXOS	13
2.4 SECAGEM EM LEITO FIXO	15
2.4.1 Generalidades sobre a secagem em leito fixo	16
2.4.2 Cinética de secagem em leito fixo e camada fina	17
2.4.3 Transferência de massa em processos de secagem convectivos	20
2.4.4 Modelagem matemática do processo de secagem em leito fixo e camada fina	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 MATERIAIS PARTICULADOS	25
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	26
3.2.1 Caracterização das partículas	27
3.2.2 Caracterização dos leitos fixos	27
3.3 ENSAIOS DE FLUIDODINÂMICA EM LEITO FIXO	28
3.5 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CAMADA FINA.....	29
3.6 ENSAIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO	31
3.7 SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA FINA.....	31

3.8	MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM	32
3.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
3.10	ANÁLISE DA QUALIDADE DA REGRESSÃO.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	34
4.1.1	Características das partículas	34
4.1.2	Características dos leitos empacotados	37
4.1.2.1	Influência do conteúdo de umidade nos parâmetros dos leitos empacotados	37
4.1.2.2	Influência das características das partículas nos parâmetros dos leitos empacotados	38
4.2	FLUIDODINÂMICA DE LEITO FIXO.....	39
4.2.1	Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos empacotados.....	39
4.2.1.1	Influência do conteúdo de umidade nos parâmetros fluidodinâmicos.....	39
4.2.1.2	Influência das características das partículas nos parâmetros fluidodinâmicos.....	41
4.2.2	Características de queda de pressão dos leitos empacotados	42
4.2.2.1	Influência do conteúdo de umidade na queda de pressão dos leitos empacotados	42
4.2.2.2	Influência das características das partículas na queda de pressão dos leitos empacotados	46
4.3	DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CAMADA FINA.....	46
4.4	TRANSFERENCIA DE CALOR EM LEITO FIXO.....	50
4.5	SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA FINA.....	55
5	CONCLUSÕES.....	63
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Os materiais biológicos representam uma grande parcela dos materiais submetidos ao processo de secagem. No caso de produtos alimentícios como grãos, sementes e ervas medicinais, a secagem é utilizada como uma técnica de preservação, visto que os microrganismos responsáveis pela deterioração têm seus crescimentos e multiplicação inibidos na ausência de água (GEANKOPLIS, 1993). Exemplos típicos de materiais biológicos submetidos ao processo de secagem são: cereais, oleaginosas, legumes, frutas, vegetais, madeira, carnes e seda (GEANKOPLIS, 1993; GLIŃSKI; HORABIK; LIPIEC, 2011). A secagem desses materiais oferece diversas vantagens, como: estocagem a curto e longo prazo, melhoria da qualidade final, viabilidade de suprimento contínuo e colheitas antecipadas, devido à possibilidade de secagem e armazenagem, e melhoria do uso da terra devido ao maior tempo de recuperação (BALA, 2016; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Dentre os diversos tipos secadores existentes para realização desse processo, o secador de leito fixo vem sendo amplamente utilizado para o estudo dos fenômenos envolvidos no processo de secagem. Nesse tipo de secador, os materiais particulados são empacotados de modo a formar um leito fixo no qual o ar quente é percolado, trocando calor e massa com as partículas e realizando a secagem. O processo de secagem de materiais particulados biológicos sofre influência de diversos fatores. As partículas biológicas possuem diferentes formatos, diâmetros e rugosidades, proporcionando arranjos variados para os empacotamentos dos leitos, os quais apresentam diferentes propriedades e características fluidodinâmicas ao serem percolados pelo ar, o que influencia na secagem. As características internas dos materiais biológicos também são variáveis dependendo da composição, resultando em diferentes resistências ao transporte da água do interior do material para sua superfície, o que também pode afetar o processo de secagem. Além disso, a magnitude da influência desses fatores está associada à significância relativa dos mecanismos de transferência de calor e massa, internos e externos, os quais irão controlar a cinética de secagem.

Diversos trabalhos na literatura vêm estudando os fenômenos envolvidos na secagem de materiais individuais, como reportado por vários autores (ALBINI, 2015; FREIRE *et al.*, 2005; HULASARE *et al.*, 1999; PERAZZINI, 2014; TANG; SOKHANSANJ, 1993). Uma parcela significativa dos estudos sobre a secagem de grãos foi desenvolvida há mais de uma década por diferentes pesquisadores, e baseiam-se em dados experimentais obtidos com as

tecnologias disponíveis na época. Atualmente, com a possibilidade de aquisição de dados *on-line*, é interessante revisitar esse tópico. Além disso, a simples compilação de parâmetros intrínsecos ao processo de secagem de diferentes materiais, como realizado por Krokida, Foundoukidis e Maroulis (2004), Maroulis *et al.* (2001) e Panagiotou *et al.* (2004), não permite inferir com segurança a influência das características dos materiais na secagem, visto que as condições operacionais e até mesmo os sistemas de secagem são demasiadamente diversos, dificultando uma análise comparativa dos resultados.

Com base na problemática apresentada, o objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a secagem de materiais particulados com diferentes características internas e externas, e investigar como tais características influenciam nas propriedades fluidodinâmicas do leito, perfis axiais de temperatura e cinética de secagem em camada fina. Os materiais selecionados foram: soja (*Glycine max* L.), lentilha verde (*Lens culinaris*), cevada (*Hordeum vulgare* L.), aveia (*Avena sativa*) e esferas de alumina (Al_2O_3), que possuem diferentes tamanhos, formas e rugosidades. Como objetivos específicos foram propostos:

- Caracterizar propriedades físicas das partículas em diferentes umidades: dimensões características, volume, área superficial, esfericidade, rugosidade superficial e densidade aparente;
- Caracterizar propriedades físicas dos leitos empacotados em diferentes umidades: densidade *bulk* e porosidade;
- Avaliar a queda de pressão nos leitos empacotados em diferentes velocidades de ar e umidades do sólido, ajustando equações aos dados experimentais para obtenção de parâmetros fluidodinâmicos do leito, como: raio hidráulico, permeabilidade, fator de resistência inercial e tortuosidade;
- Determinar experimentalmente a espessura da camada fina, com o objetivo de estabelecer a espessura do leito na qual os gradientes de temperatura e umidade podem ser considerados desprezíveis;
- Determinar experimentalmente os perfis axiais de temperatura dos leitos constituídos por materiais particulados em diferentes conteúdos de umidade;
- Realizar ensaios de cinética de secagem dos materiais particulados em leito fixo e camada fina e ajustar equações aos dados cinéticos de modo a obter parâmetros representativos do processo de transferência de massa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O correto entendimento do processo de secagem em leito fixo de materiais particulados passa por diversas áreas da ciência, mais especificamente: fenômenos de transporte em sistemas particulados e características físico-químicas de materiais particulados. Dessa forma, buscou-se abordar os conhecimentos necessários em cada uma dessas áreas por meio de uma revisão bibliográfica, iniciando-se com uma breve revisão sobre a importância e características de materiais particulados biológicos, passando pelos métodos de caracterização física desses materiais e finalizando com uma revisão sobre os fenômenos envolvidos no processo de secagem em leito fixo.

2.1 MATERIAIS PARTICULADOS BIOLÓGICOS

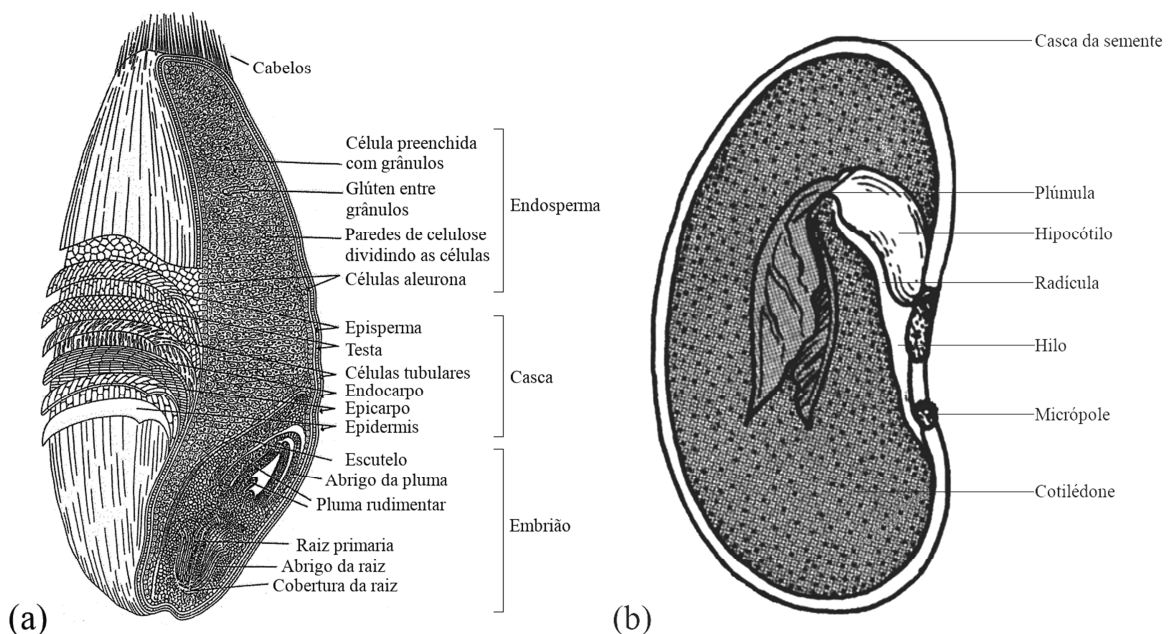
O termo “materiais particulados biológicos” engloba diversos tipos de materiais que possuem origem biológica e se apresentam na forma de partículas. Contudo, no presente trabalho, o termo se refere aos materiais provindos das classes de cereais e leguminosas. Cereais são plantas monocotiledôneas que pertencem à família das gramíneas. Essa família é constituída por aproximadamente 350.000 espécies, dentre as quais, 195.000 são economicamente importantes. Aproximadamente 50 espécies são cultivadas no mundo todo, sendo que 17 espécies provêm 90% da alimentação humana e ocupam 75% da terra cultivada no planeta. Dentre essas 17 espécies, os grãos de cereais, como: trigo, arroz, milho, cevada, aveia, centeio, sorgo e painço provêm 50% da energia alimentar e 50% da proteína consumida no mundo (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003). De modo a atender essa demanda alimentar, a produção mundial de cereais chegou a aproximadamente 2,85 bilhões de toneladas anuais, ocupando uma área plantada de 718 milhões de hectares (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2016).

A semente de cereal é constituída basicamente por três componentes majoritários: endosperma, casca e embrião, como mostrado na Figura 1 (a). O endosperma abrange a maior parte da semente, 82,5%, e armazena a fonte de energia do alimento. A estrutura externa, chamada de casca, representa 15,0% da semente, sendo responsável pela proteção e permeabilidade de água e nutrientes. O embrião, estrutura germinativa da semente, compõe os 2,5% restantes (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003; GALLAGHER, 1984).

O termo “legume” é originário do Latim “*legumen*”, que significa semente colhida em vagens. Tal termo pode ser utilizado para se referir a todas as plantas leguminosas. Os

legumes que contêm uma pequena quantidade de óleo, como o feijão francês, feijão-de-lima e outros, são denominados “*pulses*”. Já os legumes que contêm maior quantidade de óleo, como a soja e o amendoim, são denominados sementes leguminosas oleaginosas. As leguminosas são importantes fontes de alimentos, sendo que soja, amendoim, feijão, ervilha, favas, grão-de-bico e lentilha são as leguminosas mais comumente encontradas na maioria dos países. A produção de leguminosas justifica-se não apenas pelo alto teor de carboidratos e proteínas desses alimentos, o qual é 2 a 3 vezes maior do que o dos cereais, mas também pelo elevado teor de óleo para produção de óleo vegetal (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003; CLARK; JUNG; LAMSAL, 2014). Visando tais atributos, a produção mundial de vegetais leguminosos é acentuada, chegando a aproximadamente 1,5 milhões de toneladas anuais e ocupando uma área plantada de 227 mil hectares (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2016).

Figura 1 – Sementes genéricas de cereal (a) e legume (b).



Fonte: Adaptado de Gallagher (1984), Krempels (2018) e Kulp e Ponte (2000).

As sementes de leguminosas maduras, representadas pela Figura 1 (b), possuem três componentes majoritários: casca, cotilédones e o eixo do embrionário. A casca ou testa representa 8% da semente e é composta por hilo, micrópole e rafe. Os cotilédones ocupam grande parte da semente, cerca de 90%, e armazenam a energia necessária para o desenvolvimento do embrião. Esse, por sua vez, é constituído por plúmula, hipocótilo e radícula, e constitui apenas 2% da semente (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003).

O Brasil apresenta um elevado volume de produção de cereais e leguminosas, destacando-se no cenário internacional. A produção brasileira desses alimentos chegou a 240,6 milhões de toneladas, ocupando uma área plantada de 61,2 milhões de hectares. Arroz, milho e soja são os três principais produtos produzidos, representando, juntos, 94,4% da produção e 87,9% da área plantada (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017). A produção brasileira, em comparação com a mundial, situa-se como: segunda maior de soja, terceira maior de milho, sexta maior de aveia, nona maior de arroz e decima segunda maior de sorgo (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2017a, b).

Apesar da grande produção de cereais e leguminosas apresentada, as perdas mundiais anuais variam entre 10% e 25%, de país para país. Tais perdas se dão principalmente ao longo da cadeia de processamento composta por: debulhagem, limpeza, secagem e armazenamento. Dentre esses, o processo de secagem se mostra como uma etapa vital, fornecendo armazenamento prolongado, facilidade de manuseio, melhoria de qualidade e redução das perdas (BALA, 2016; CHAKRAVERTY *et al.*, 2003).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS PARTICULADOS

As propriedades físicas de materiais particulados podem ser mensuradas através de uma grande diversidade de técnicas, sendo necessária a escolha da mais adequada para cada caso. Além disso, devido ao fenômeno do encolhimento, o conteúdo de umidade do sólido pode influenciar as propriedades físicas dos materiais, o que pode ser quantificado pela aplicação dessas técnicas. Na presente seção, buscou-se discorrer sobre essas questões.

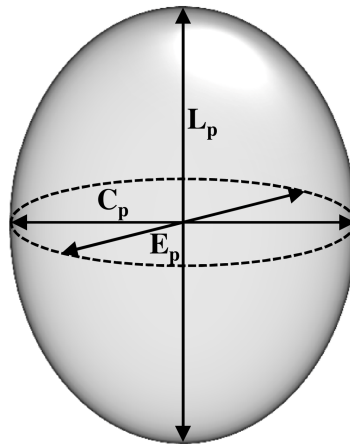
2.2.1 Propriedades das partículas

O tamanho, forma, textura e densidade das partículas são parâmetros influentes nos fenômenos de transferência de momento, calor e massa envolvidos no processo de secagem em leito fixo, sendo de grande importância o conhecimento desses parâmetros para o correto entendimento e modelagem do processo de secagem. Para isso, diversas técnicas podem ser empregadas, as quais serão tratadas nessa seção.

2.2.1.1 Dimensões características

A técnica de determinação das dimensões características da partícula por meio de análise de imagem vem sendo amplamente utilizada na literatura. Nessa técnica, o comprimento (C_p) e largura (L_p) da partícula, representados na Figura 2, podem ser obtidos pela comparação com um padrão de tamanho. Além disso, é possível obter a área projetada, perímetro e diâmetro médio entre comprimento e largura (ARANA, 2012; SAHIN; SUMNU, 2003). Tal técnica foi utilizada por Albin (2015), Felizardo (2014) e Alves (2015) para determinação do comprimento, largura, área projetada, perímetro e diâmetro de partículas de cevada, embaúba e pimenta do reino.

Figura 2 – Dimensões de uma partícula esferoide triaxial: comprimento (C_p), largura (L_p) e espessura (E_p).



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Como a imagem é uma representação bidimensional de uma cena, às vezes não é possível obter informações suficientes para uma avaliação completa das características da partícula (ARANA, 2012). Para contornar essa dificuldade, outras técnicas podem ser associadas à análise de imagem. Por exemplo, a técnica de determinação das dimensões por meio de paquímetro ou micrometro (SAHIN; SUMNU, 2003). Nesse caso, a espessura da partícula (E_p) também pode ser medida. Tal dimensão, em conjunto com o comprimento e largura obtidos na análise de imagem, podem ser utilizadas para a determinação do diâmetro médio da partícula (D_m) utilizando da Equação (1). A combinação das duas técnicas foi utilizada por Felizardo (2018) para caracterização de grãos de cevada.

$$D_m = \pi(C_p L_p E_p)^{1/3} \quad (1)$$

A área e o volume da partícula podem ser determinados assumindo-se algumas idealizações. Admitindo-se que a geometria da partícula pode ser representada por um esferoide triaxial, como apresentado na Figura 2, a área superficial (A_p) e o volume (V_p) da partícula podem ser estimados pelas Equações (2) e (3). Por outro lado, quando o formato da partícula pode ser assumido como uma esfera, as Equações (4) e (5) podem ser utilizadas para determinação da área superficial (A_e) e do volume (V_e) da partícula (ARANA, 2012; MOHSENIN, 1970; SAHIN; SUMNU, 2003). A área de partículas de soja, cevada e aveia foi estimada com base na geometria de um esferoide triaxial por Deshpande, Bal e Ojha (1993), Shah *et al.* (2016) e Sologubik *et al.* (2013). Já o volume de partículas de alumina foi obtido com base na geometria de uma esfera por Perazzini (2014).

$$A_p = \pi(W_p L_p T_p)^{2/3} \quad (2)$$

$$V_p = \frac{\pi W_p L_p T_p}{6} \quad (3)$$

$$A_e = \pi D_e^2 \quad (4)$$

$$V_e = \frac{\pi D_e^3}{6} \quad (5)$$

2.2.1.2 Esfericidade

Devido ao arranjo estrutural da matriz sólida, os materiais biológicos apresentam os mais diversos formatos, os quais podem variar em maior ou menor grau em relação à forma esférica. Alguns critérios quantitativos são usados para descrever o formato de materiais não-esféricos, sejam eles regulares ou irregulares, destacando-se a medida da esfericidade (φ ou ϕ). Dentre as diversas definições disponíveis de esfericidade, as Equações (6) e (7) são amplamente utilizadas (MOHSENIN, 1970; WADELL, 1933; YANG, 2003). A definição expressa pela Equação (6) é usualmente empregada para determinação do grau de esfericidade de materiais irregulares, como rochas e sedimentos (WADELL, 1933). Já a definição descrita pela Equação (7) se aplica a materiais com geometria regular, como é caso de cereais e

leguminosas (MOHSENIN, 1970). Assim, no presente trabalho, esta última definição foi adotada.

$$\phi = \frac{A_e}{A_r} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt[3]{C_p L_p E_p}}{L_p} \quad (7)$$

Tem-se φ ou $\phi = 1$ para esferas e $0 < \varphi$ ou $\phi < 1$ para outros formatos de partícula. A Tabela 1 apresenta a esfericidade de alguns cereais e legumes. Como mostrado nesta tabela, os materiais exibiram uma ampla faixa de esfericidade, o que resulta em leitos estáticos com diferentes estruturas e propriedades características.

Tabela 1 – Esfericidade de materiais biológicos típicos submetidos ao processo de secagem.

Material biológico	Esfericidade	Referência
Lentilha vermelha	0,83 – 0,84	Isik (2007b)
Soja	0,80 – 0,81	Deshpande, Bal e Ojha (1993)
Lentilha verde	0,72 – 0,74	Isik (2007a)
Milho	0,62 – 0,66	Karababae Coşkuner (2007)
Cevada	0,51 – 0,53	Sologubik et al. (2013)
Arroz	0,40 – 0,41	Gharekhani <i>et al.</i> (2013)
Aveia	0,38	Shah <i>et al.</i> (2016)
Cominho	0,36	Zare, Bakhshipour e Chen (2013)

Fonte: Acervo Pessoal (2019).

2.2.1.3 Densidade aparente

A densidade aparente da partícula pode ser definida como a razão entre a massa (M_p) e o volume total (V_p) da partícula, incluindo todos os poros dentro do material (poros internos), como expresso pela Equação (8). Em partículas com geometrias regulares, p. ex. esferas e cubos, a densidade aparente pode ser determinada a partir do volume calculado usando as dimensões características e a massa medida. Por outro lado, em partículas com geometrias irregulares, como geralmente é o caso de partículas biológicas, a densidade aparente pode ser determinada pelo método de deslocamento de líquidos. Nessa técnica, o volume de uma massa conhecida de partícula é quantificado com base no volume de líquido deslocado pela partícula após a submersão total (SAHIN; SUMNU, 2003). A densidade

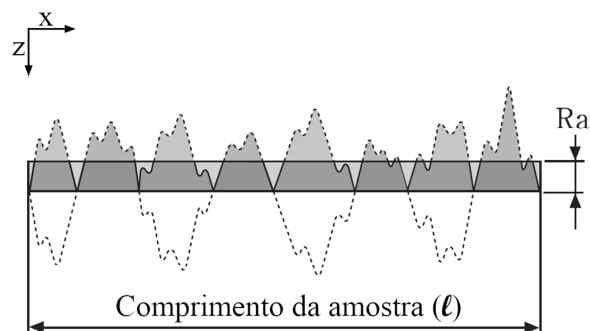
aparente de partículas de soja, lentilha, cevada, aveia e alumina foi determinada por Deshpande, Bal e Ojha (1993), Felizardo (2018), Isik (2007a), Perazzini (2014) e Shah *et al.* (2016), pelo deslocamento de líquidos, como: água, hexano e tolueno.

$$\rho_a = \frac{M_p}{V_p} \quad (8)$$

2.2.1.4 Rugosidade superficial

A rugosidade de um material é causada devido às irregularidades presentes em sua superfície. Para tornar quantificável a magnitude dessas irregularidades, a rugosidade superficial foi definida como uma escala numérica da condição de textura do material, sendo independente das sensações táteis ou visuais. Os parâmetros de textura superficial podem ser obtidos pelos métodos de perfil e de área, sendo este primeiro mais popularmente utilizado. Nesse método, as irregularidades superficiais são determinadas ao longo de uma linha reta que atravessa toda a superfície da amostra, como mostrado na Figura 3. De modo a representar essas irregularidades, um dos parâmetros mais utilizados é a rugosidade média aritmética (R_a) (ARANA, 2012; OLYMPUS, 2017).

Figura 3 – Ilustração da rugosidade média aritmética em relação ao perfil de rugosidade.



Fonte: Adaptado de Olympus (2017).

Como ilustrado na Figura 3, a rugosidade média aritmética representa a média aritmética da ordenada $z(x)$ ao longo do comprimento da amostragem. Tal variável pode ser obtida integrando-se o módulo da função $z(x)$ ao longo do comprimento da amostra, de acordo com a equação (OLYMPUS, 2017):

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |z(x)| dx \quad (9)$$

A rugosidade superficial pode influenciar tanto em características *bulk* do leito quanto em fenômenos de transferência envolvidos na secagem. A título de exemplo, Akritidis e Siatras (1979), Farmer, Brusewitz e Whitney (1981) e Jekayinfa (2006) reportaram a rugosidade superficial como um fator de influência considerável na porosidade e quedas de pressão de leitos empacotados por: feijão de alfarroba, semente de gramíneas e sementes de abóbora.

2.2.2 Propriedades *bulk* de leitos fixos

As propriedades *bulk* de leitos fixos representam as características físicas das partículas empacotadas. Tais propriedades influenciam de forma significativa nas características fluidodinâmicas do leito, bem como nos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem. Assim, a correta determinação dessas variáveis deve ser feita de forma sistemática seguindo procedimentos específicos, os quais serão tratados nessa seção.

2.2.2.1 Densidade *bulk*

A densidade *bulk* (ρ_b) pode ser definida como a razão entre a massa (M_L) e o volume do leito (V_L) empacotado, como mostrado na Equação (10). A obtenção de tal parâmetro deve ser feita com cuidado, visto que diversos fatores influenciam nos resultados (SAHIN; SUMNU, 2003). Como mostrado por Zotin (1985), a forma de empacotamento do leito é um fator de relevância significativa. Dentre os métodos testados por essa autora, observou-se que o método de empacotamento por derramamento de quantidades constantes de material de uma altura fixa apresentou resultados mais reprodutíveis e confiáveis.

$$\rho_b = \frac{M_L}{V_L} \quad (10)$$

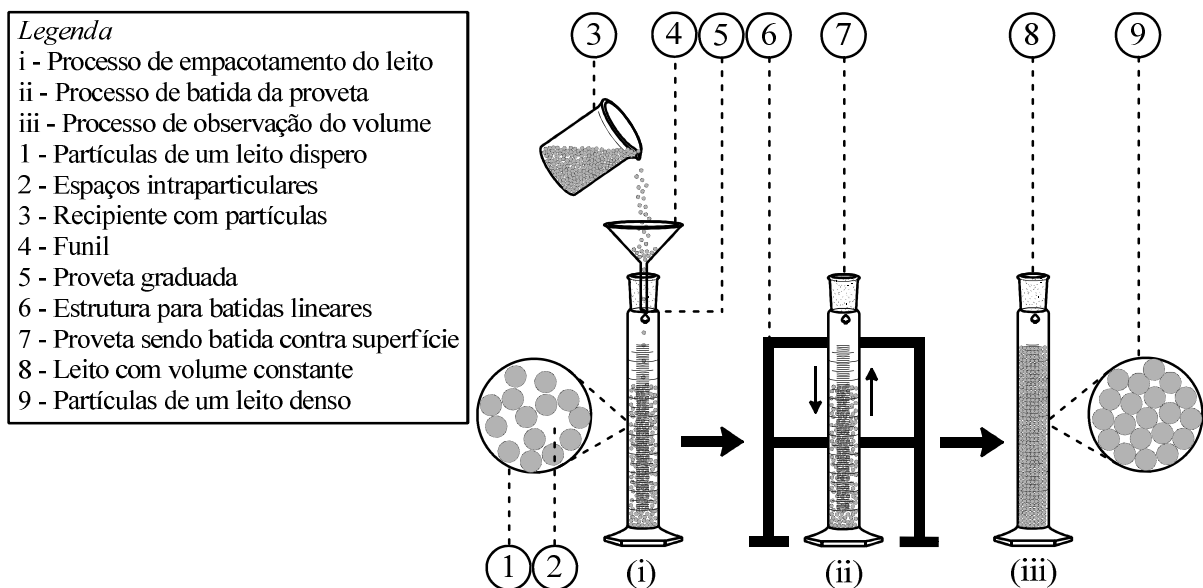
Além disso, o diâmetro do recipiente influencia de forma significativa na anisotropia das propriedades do leito devido ao efeito de parede. Tal efeito se deve ao menor grau empacotamento das partículas próximas à parede, gerando um perfil de densidade/porosidade

bulk ao longo da coordenada radial do leito (GERMAN, 1989). De modo a minimizar esse efeito, Zotin (1985) testou a influência do diâmetro do cilindro sobre a densidade/porosidade *bulk*. Observou-se que quando o diâmetro do cilindro (D_c) é dez vezes maior que o diâmetro da partícula (D_m) o efeito de parede é minimizado.

A vibração/agitação do leito também influencia na densidade *bulk*. De modo que, quando o leito é vibracionado ou batido suavemente contra uma superfície plana, o arranjo das partículas se altera, tendendo a um estado de mínimos espaços interparticulares. Tal estado é alcançado quando o número de coordenação (NC), número de pontos de contato de uma partícula com sua vizinhança, é o máximo possível (GERMAN, 1989).

Um dos procedimentos mais amplamente utilizados na determinação da densidade *bulk* é mostrado na Figura 4. O procedimento consiste em: (i) empacotamento de um recipiente cilíndrico graduado (5) por derramamento de quantidades constantes de material de uma mesma altura (3) com auxílio de um funil (4), (ii) batida do recipiente contra uma superfície plana (7) e (iii) observação do volume de material na proveta até que o mesmo seja constante (8). Tal procedimento foi utilizado por Felizardo (2018), Prado (2004), Alves (2015) e Perazzini (2014) para determinação da densidade *bulk* de sementes de: cevada, papaia e pimenta do reino, além de partículas de alumina.

Figura 4 – Processo de obtenção da densidade *bulk* de leitos empacotados.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Na Figura 4 (1) é possível notar que, antes do processo de batida, o leito se encontra disperso (*loose*) e as partículas possuem um menor número de pontos de contato,

resultando em maiores volumes de espaços vazios entre elas (Figura 4 (2)). Após o processo, as partículas apresentam um maior número de pontos de contato e o volume de vazios é reduzido, gerando um leito densamente empacotado (Figura 4 (9)).

2.2.2.2 Porosidade *bulk*

A porosidade *bulk* (ε_b) pode ser definida como a fração volumétrica de fluido em um leito empacotado, Equação (11), sendo constituída pelo volume dos espaços vazios fora do limite das partículas individuais (SAHIN; SUMNU, 2003). A Figura 4 (2) ilustra tais volumes. Os volumes interparticulares podem ser conhecidos descontando-se o volume das partículas do volume total do leito. Para tanto, pode-se utilizar as densidades *bulk* e aparente, como mostrado na equação abaixo. Felizardo (2018), Prado (2004), Alves (2015) e Perazzini (2014) utilizaram esse método para determinação da porosidade *bulk* de sementes de: cevada, papaia e pimenta do reino, além de partículas de alumina.

$$\varepsilon_b = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume total}} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a} \quad (11)$$

2.2.3 Encolhimento

Uma das alterações físicas mais importantes sofridas por alimentos durante o processo de secagem é a redução do volume externo. A remoção do conteúdo de umidade causa estresse na estrutura celular, levando à redução das dimensões e até mesmo a alterações no formato, o que caracteriza o fenômeno do encolhimento. Dois tipos de encolhimento são usualmente observados em materiais alimentícios: isotrópico e anisotrópico. O encolhimento isotrópico se processa de forma homogênea em todas as dimensões do material. Por outro lado, o encolhimento anisotrópico ocorre de forma não uniforme nas dimensões (MAYOR; SERENO, 2004; SAHIN; SUMNU, 2003).

Diversos fatores influenciam o comportamento de encolhimento do material. Contudo, a mobilidade da matriz sólida que compõe um material biológico é um dos mais importantes. Altas mobilidades correspondem a um comportamento viscoso, típico de um estado emborrachado. Em contraponto, baixas mobilidades indicam um comportamento elástico, típico de um estado vítreo. Em geral, a matriz sólida de materiais alimentícios apresenta um estado emborrachado e encolhimento isotrópico. Contudo, com a redução do

conteúdo de umidade, a mobilidade da matriz pode assumir comportamentos próximos ao de um estado vítreo. Assim, ao longo do processo de secagem, as alterações na umidade podem levar a matriz sólida a se comportar de formas diferentes, o que, em alguns casos, induz o encolhimento anisotrópico (MAYOR; SERENO, 2004).

2.3 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS DE LEITOS FIXOS

Durante a passagem de um fluido através de um meio poroso ocorrem diversas interações entre o fluido e as partículas que levam a queda de pressão do sistema, como ilustrado na Figura 5. Vale ressaltar que, por meio poroso, entende-se um leito fixo composto por partículas sólidas indeformáveis. Em 1830 Henry P. G. Darcy observou experimentalmente que a queda de pressão (ΔP) em um meio poroso era diretamente proporcional à velocidade superficial (U) do fluido e inversamente proporcional ao comprimento do meio (L). A Equação (12) relaciona tais variáveis por meio de uma constante de proporcionalidade, chamada de permeabilidade (κ), e a viscosidade dinâmica do fluido (μ). Essa equação constitui a chamada “lei de Darcy” (COULSON; RICHARDSON, 2002; MASSARANI, 2001).

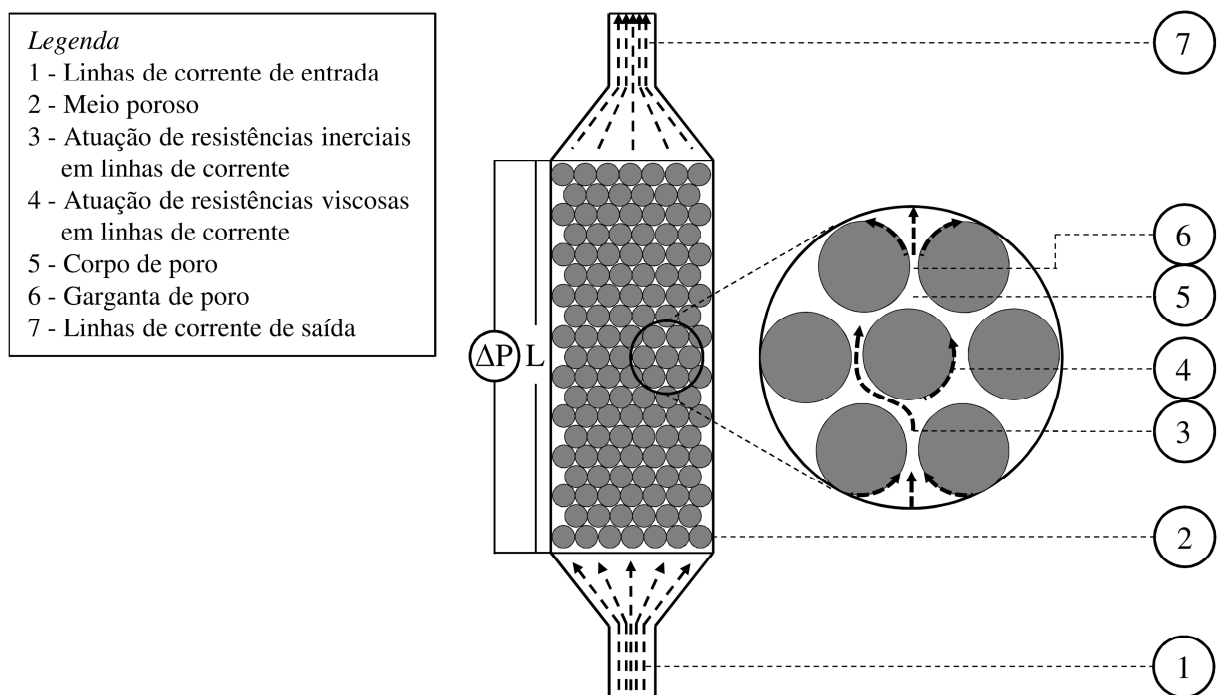
$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} U \quad (12)$$

A permeabilidade foi determinada por esse autor como um fator dependente apenas das propriedades do meio poroso e frequentemente utilizado para indicar a facilidade de escoamento do fluido através deste. Apesar de sua grande aplicabilidade, a Equação (12) possui limitações em altas velocidades superficiais do fluido. Assim, em 1930, Philipp Forchheimer propôs uma teoria mais abrangente, matematicamente representada pela Equação (13). Esse autor sugeriu que a queda de pressão no meio poroso se deve a dois tipos principais de resistência: (i) por arrasto viscoso na superfície das partículas (viscosas) (Figura 5 (4)) e (ii) por formação de redemoinhos e mudanças repentinas na direção do fluido (inerciais) (Figura 5 (3)). Deste modo, a primeira parte da Equação (13), linear, representa as resistências viscosas, enquanto que a segunda parte, quadrática, representa as resistências inerciais (COULSON; RICHARDSON, 2002; HAGOORT, 1988).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} U + \frac{c\rho}{\sqrt{\kappa}} U^2 \quad (13)$$

em que ρ é a densidade do fluido e c é o fator de resistência inercial. Assim como a permeabilidade, o fator de resistência inercial é uma propriedade intrínseca do meio poroso, sendo frequentemente associado ao contraste de tamanho entre gargantas e corpos de poros (Figura 5 (6) e (5)) (HAGOORT, 1988). Tanto a permeabilidade quanto o fator de resistência inercial podem ser experimentalmente obtidos por dados de ΔP em função da U utilizando a Equação (13) (MASSARANI, 2001). Esta equação foi utilizada por Felizardo (2018) para estimar a permeabilidade e o fator de resistência inercial de leitos empacotados com sementes de cevada. Já Lima (2009) estudando o escoamento de ar em leitos compostos por sementes de abobora, girassol, lentilha e flocos de aveia, utilizou este método para obter tais parâmetros. Zotin (1985) também obteve esses parâmetros para leitos compostos por partículas esféricas, cilíndricas, anéis de Raschig e lascas utilizando o mesmo procedimento.

Figura 5 – Ilustração das resistências envolvidas na queda de pressão em um meio poroso.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Uma vez determinada a permeabilidade, o modelo capilar permite correlacionar esse parâmetro com algumas características estruturais do meio poroso através da equação de Kozeny-Carman (MASSARANI, 2001):

$$\kappa = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2 \varphi^2}{36\beta(1 - \varepsilon_b)^2} \quad (14)$$

em que β é o fator de forma e d_p o diâmetro médio de Sauter. Esse primeiro parâmetro está compreendido entre 3 e 6, com os valores extremos ocorrendo apenas para placas finas. A variação de β com placas provavelmente surge não apenas do fato de que a área de contato entre as partículas é maior, mas também porque as placas tendem a produzir maiores tortuosidades (τ) (COULSON; RICHARDSON, 2002). No contexto do modelo capilar, o conceito de tortuosidade surgiu quando o modelo foi aprimorado de modo que o meio poroso começou a ser representado por uma “trança” de tubos interconectados com seção elítica variável. Assim, o aumento da tortuosidade exprime o aumento do comprimento da “trança” em relação ao comprimento real da matriz, conforme a Equação (15) (MASSARANI, 2001).

$$\tau = \frac{\beta}{\beta_t} \quad (15)$$

em que β_t é o fator relacionado à forma da seção transversal do tubo/poro no qual o fluido flui. Para o caso mais clássico aonde o formato de seção transversal é circular, β_t é igual a 2. Com base no fator de forma, permeabilidade e porosidade, o modelo capilar ainda permite estimar o raio hidráulico médio do meio poroso pela Equação (16). Destaca-se que esse raio é uma medida da razão entre a área da seção de escoamento e o perímetro molhado (MASSARANI, 2001).

$$R_h = \sqrt{\frac{\beta\kappa}{\varepsilon_b}} \quad (16)$$

2.4 SECAGEM EM LEITO FIXO

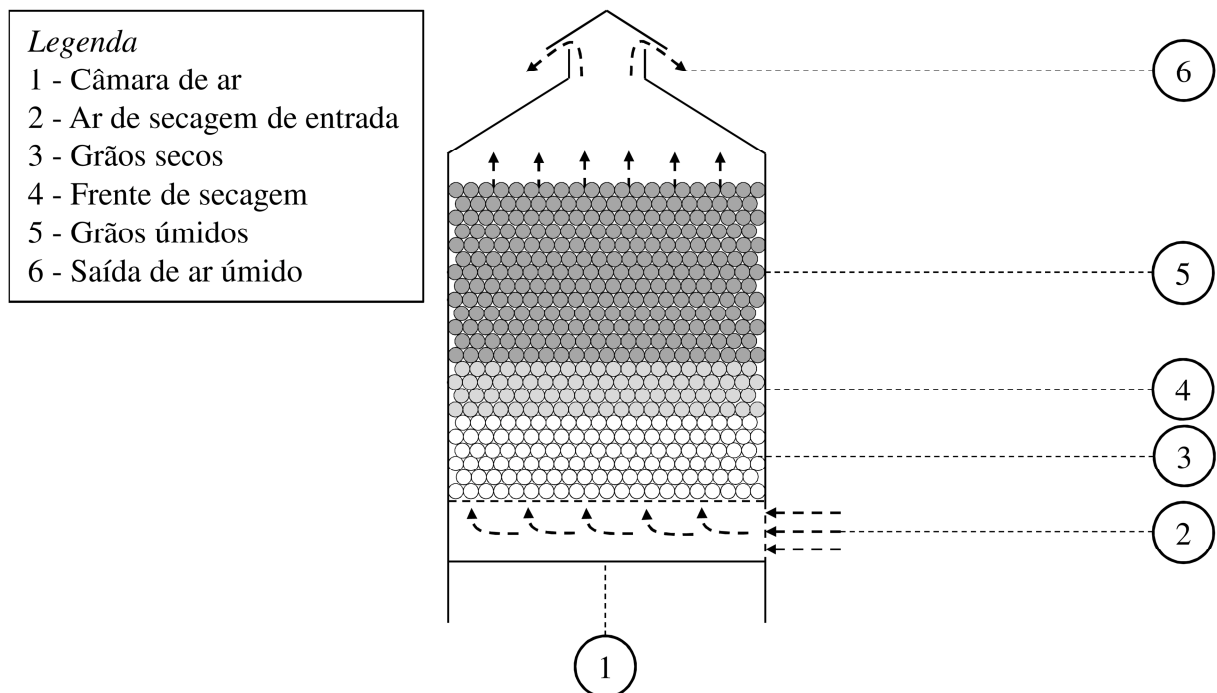
A secagem em leito fixo envolve processos de transferência de calor e massa que podem ocorrer de forma não uniforme ao longo do leito, através de uma combinação de diversos mecanismos. Nessa seção serão abordadas algumas generalidades sobre o processo de secagem em leito fixo, assim como alguns dos fenômenos envolvidos no processo e sua modelagem.

2.4.1 Generalidades sobre a secagem em leito fixo

Secagem é o processo de evaporação de um solvente, geralmente a água, de um sólido ou semi-sólido para uma fase insaturada, geralmente o ar, por meio de transferência simultânea de calor e massa (MUJUMDAR, 2014). No caso de cereais e leguminosas, a secagem deve ser realizada até que o material possua um conteúdo de umidade adequado para o armazenamento sem que ocorra a deterioração, sendo que esse conteúdo irá depender da estrutura/características do grão. A secagem solar vem sendo utilizada extensivamente desde tempos antigos. Contudo, essa técnica não é adequada para secagem rápida de grandes quantidades de grãos que, atualmente, são em sua maioria secos artificialmente. Nesse tipo de secagem, o calor pode ser suprido por: convecção, condução, radiação, micro-ondas e por campo eletromagnético de radiofrequência. Estima-se que mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo por ar quente ou combustão direta de gases e 99% das aplicações envolvam a remoção de água (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003).

Dentre os diversos tipos de secadores convectivos, destaca-se o secador de leito fixo. Esse tipo de secador, mostrado na Figura 6, é geralmente utilizado na secagem de grãos em fazendas ou locais semelhantes (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003).

Figura 6 – Sistema de secagem de grãos em leito fixo e camada espessa.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Os grãos são colocados sob um falso piso perfurado, o qual é elevado a certa altura acima do solo. O espaço abaixo deste piso funciona como uma câmara de ar (1). Ar natural ou quente (2) é soprado através do leito acima da câmara. O ar flui através do leito trocando calor e massa com as partículas e carregando a umidade retirada do sólido, o qual se torna seco (3). A transferência de umidade do grão para o ar ocorre em uma profundidade ou zona finita, que também é denominada frente de secagem (4). Essa frente se move para cima do leito na direção do movimento do ar. Os grãos no leito superior da frente de secagem permanecem no nível de umidade inicial (X_i) (5), e o ar de exaustão (6), logo acima da zona de secagem, está em equilíbrio com os grãos úmidos. A profundidade da frente de secagem, no entanto, depende da velocidade do ar ou da altura do leito. Se a velocidade do ar for alta ou a espessura do leito for pequena, a frente de secagem poderá se estender por todo o leito (CHAKRAVERTY *et al.*, 2003).

A presença de uma zona de secagem torna a determinação da cinética de secagem, bem como a modelagem do processo, uma tarefa complexa. De modo a contornar tal complexidade, pode-se reduzir a espessura do leito até que a secagem ocorra de forma homogênea em toda sua extensão, permitindo a adoção de uma hipótese conhecida como camada fina, a qual será tratada na próxima seção.

2.4.2 Cinética de secagem em leito fixo e camada fina

A secagem de materiais biológicos é um processo complexo, que envolve a transferência transiente de calor e massa acoplada a transformações físicas e químicas do material (MUJUMDAR, 2014). Deste modo, a previsão teórica do comportamento de secagem é complexa, sendo necessária uma abordagem experimental para se obter informações fundamentais sobre o processo. Para este propósito, o processo de secagem em leito fixo e camada fina vem sendo amplamente utilizado para avaliar a cinética de secagem de materiais biológicos, como revisado por Erbay e Icier (2010).

Entende-se por hipótese de camada fina, uma camada uniforme de material completamente exposta a corrente de ar durante a secagem e com gradientes de temperatura e umidade desprezíveis. O conceito de camada fina pode ser aplicado a: (i) um material único exposto ao ar de secagem ou camada de material e a (ii) multicamadas de diferentes espessuras (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS, 2014). A principal vantagem de uma abordagem em camada fina é a possibilidade de se considerar a hipótese de parâmetros concentrados na modelagem do

problema, ou seja, com variações espaciais de temperatura e concentração desprezíveis frente às variações temporais (BALA, 2016; DINÇER; ZAMFIRESCU, 2015).

A determinação da espessura da camada fina pode ser realizada analisando-se os perfis axiais de umidade e temperatura ao longo do leito. Contudo, devido as dificuldades experimentais envolvidas na obtenção do perfil de umidade, pode-se determinar a condição de camada fina com base apenas no perfil de temperatura e assumir-se a hipótese de que o critério de umidade também está sendo satisfeito. Durante o processo de secagem, a energia fornecida pela fase gasosa para a fase sólida é gradualmente reduzida à medida que a corrente de ar avança no leito. Tal redução ocorre devido a gradual perda de energia da fase gasosa para evaporação do conteúdo de umidade da fase sólida conforme ocorre o avanço da corrente. Nas regiões mais afastadas da base do leito não há energia disponível suficiente na fase gasosa para elevar a temperatura da fase sólida da mesma forma que ocorre nas regiões próximas à base. Como resultado, tem-se a formação de um perfil axial de temperatura ao longo do tempo, o qual reflete o comprimento da frente de secagem. Assim, a espessura do leito na qual a variação de temperatura axial seja tão pequena a ponto de poder ser atribuída à incerteza da medida, pode ser considerada na hipótese camada fina. Este procedimento foi adotado por Albini (2015), Alves (2015), Perazzini (2014) para determinação da espessura de camada fina de leitos compostos por: grãos de cevada, pimenta do reino e partículas de alumina.

A adoção da hipótese de camada fina permite a obtenção da cinética de secagem. Em geral, os experimentos cinéticos fornecem dados de massa total do sólido úmido (W) (camada fina) em diferentes instantes de tempo (t), durante o período de secagem, possibilitando calcular a umidade total (X_t), umidade livre (X), razão de umidade (RU) e taxa de secagem (R) pelas Equações (17)-(20), respectivamente (GEANKOPLIS, 1993).

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (17)$$

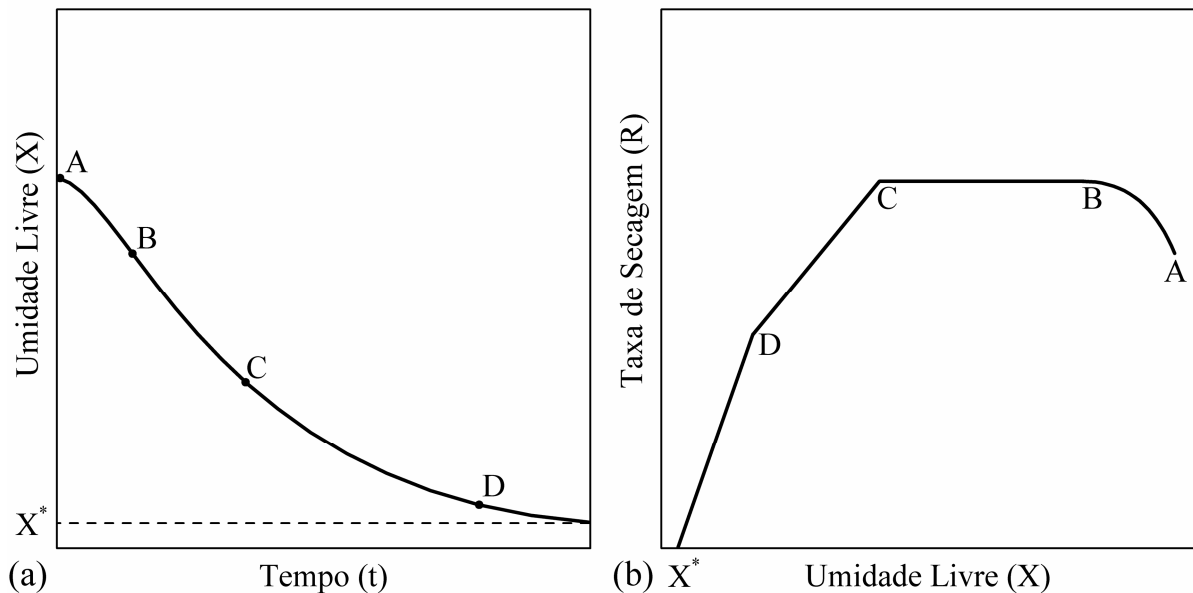
$$X = X_t - X^* \quad (18)$$

$$RU = \frac{X_t - X^*}{X_i - X^*} \quad (19)$$

$$R = -\frac{L_s}{A_s} \frac{dX}{dt} \quad (20)$$

Assim, um gráfico de umidade livre em função do tempo (Figura 7 (a)) fornece as variações infinitesimais de X com t , que ao serem utilizadas em conjunto com a Equação (20), podem gerar um gráfico de taxa de secagem R em função da umidade livre, como exemplificado na Figura 7 (b) (GEANKOPLIS, 1993).

Figura 7 – Curvas de umidade em função do tempo (a) e taxa de secagem em função da umidade (b).



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

O segmento AB dessa figura indica o período inicial no qual a amostra entra em contato com o meio secante, ajustando a temperatura do sólido até alcançar o equilíbrio térmico com o ar de secagem. Em seguida, inicia-se o período de taxa constante, representado pelo segmento BC , no qual toda a superfície do sólido exposta está saturada com água, levando a uma secagem com características de evaporação de uma dada quantidade de líquido, não havendo qualquer influência do sólido. Com o decorrer do regime, a temperatura superficial atinge a temperatura de bulbo úmido, a partir da qual o líquido retirado da superfície é repostado pelo líquido do interior do sólido (FOUST *et al.*, 1980).

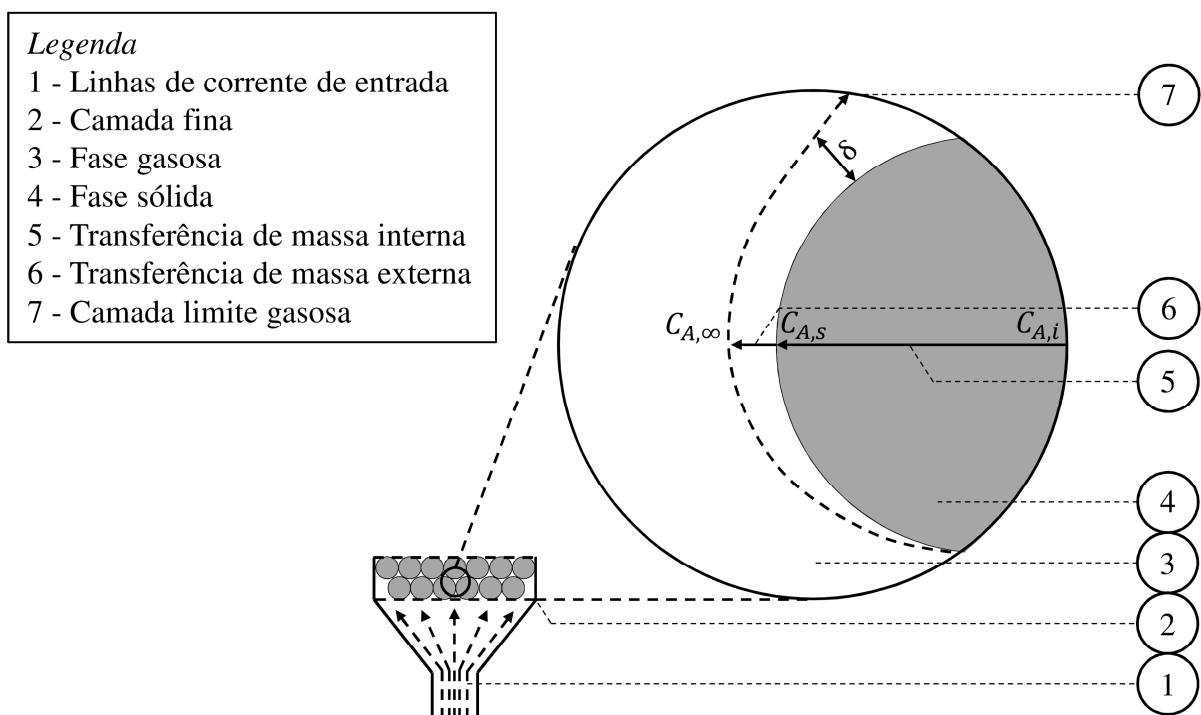
Ao final do período de taxa constante, atinge-se o ponto C , o qual é chamado de ponto de umidade crítica. Onde o conteúdo de umidade do sólido é mínimo para suprir, de modo integral, a totalidade da superfície. Em seguida, ocorre um período delimitado por CD ,

denominado “primeiro período de taxa decrescente”. Nesse período, a superfície sólida fica gradativamente menos rica em líquido, uma vez que, a velocidade difusional da umidade no interior da fase sólida é menor do que a velocidade de transferência de massa da superfície para a fase gasosa. No ponto D , não se pode encontrar qualquer área significativamente saturada com umidade. O vapor retido no interior sólido difunde-se para a superfície e é transferido para as correntes gasosas. Prosseguindo-se além de D , observa-se que toda a evaporação ocorre a partir das partes interiores do sólido. De maneira que, com a diminuição contínua da umidade, a distância a ser vencida pela difusão do calor e da massa aumenta até a umidade de equilíbrio (FOUST *et al.*, 1980).

2.4.3 Transferência de massa em processos de secagem convectivos

A transferência de massa em um processo de secagem convectivo pode ser dividida em duas etapas: transferência de massa do interior da partícula para sua superfície (transferência interna) e transferência de massa da superfície para a fase fluida (transferência externa) (RATTI, 2009; STRUMILLO; KUDRA, 1986). A Figura 8 ilustra tais processos de transferência.

Figura 8 – Ilustração dos processos de transferência de massa interna e externa.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Na primeira etapa (Figura 8 (5)), a transferência de massa no interior do sólido pode ocorrer na fase líquida e/ou gasosa por uma combinação de mecanismos: difusão líquida, difusão de vapor, efusão, termodifusão, forças capilares, pressão osmótica e gradiente de pressão. Sendo que a resistência ao transporte dependerá da distância interna a ser percorrida pelas moléculas de água e das características internas do material, como: presença ou ausência de poros, diâmetro dos poros e nível de interação entre a água e a matéria seca. Vale ressaltar que a maioria dos alimentos pode ser vista como meios porosos higroscópicos, porosos-capilares ou coloidais (RATTI, 2009; STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Na segunda etapa (Figura 8 (6)), o transporte de massa ocorre através de uma camada limite de gás de espessura δ , por dois mecanismos principais: convecção (movimento da massa de fluido) e difusão (gradiente de concentração), sendo que esse primeiro é preponderante em processos de secagem com escoamento de ar contínuo. Nesse caso, o fluxo de água na superfície do sólido ($N_{A,s}$) é dado pela diferença entre o conteúdo de água na superfície do sólido ($C_{A,s}$) e no fluxo de ar livre ($C_{A,\infty}$), além do coeficiente convectivo de transferência de massa (h_m), Equação (21). Tal coeficiente reflete a capacidade de transferência de massa através da camada limite, sendo fortemente influenciado pelas condições de escoamento e de formato superficial (INCROPERA *et al.*, 2006; RATTI, 2009).

$$N_{A,s} = h_m(C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (21)$$

A significância relativa dos processos de transferência de massa interna e externa pode ser expressa pelo número de Biot mássico, definido como (INCROPERA *et al.*, 2006):

$$Bi_m = \frac{h_m L_c}{D_A} \quad (22)$$

Quando Bi_m tende a zero, a taxa de transferência de massa interna será muito mais rápida que a externa e o processo será controlado pelas condições da camada limite. Por outro lado, quando Bi_m tende ao infinito, a taxa de transferência de massa interna será muito mais lenta que a externa e o processo será limitado pela transferência interna. Como regra geral, pode-se estabelecer que (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

$Bi_m < 0,2$: *condições externas controlam o processo, visto que a resistência à transferência de massa na camada limite é maior do que a resistência à*

migração de umidade interna. O processo de secagem é controlado pela resistência da camada limite;

$Bi_m > 50$: *condições internas controlam o processo*, pois a resistência à transferência de massa através da estrutura interna do material é muito maior do que a resistência à transferência através da camada limite. As características estruturais internas do material influenciam fortemente na secagem;

$0,2 < Bi_m < 50$: *condições externas e internas controlam o processo*, as resistências externas e internas à transferência de massa são da mesma ordem de grandeza. A estrutura interna do material e as características da camada limite influenciam o processo de secagem.

2.4.4 Modelagem matemática do processo de secagem em leito fixo e camada fina

A modelagem matemática de um processo de secagem convectiva pode ser realizada por diferentes abordagens. Considerando o meio poroso como uma camada fina de um leito fixo, com transferência de umidade unidirecional na direção axial, difusividade efetiva (D_{eff}) constante, umidade inicial uniforme e encolhimento desprezível, o transporte de massa através do meio pode ser descrito por um modelo difusivo:

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{eff} \frac{\partial X(z, t)}{\partial z} \right] \quad (23)$$

Vale aqui ressaltar que, nesse modelo, a umidade X representa as fases líquida e gasosa, sendo experimentalmente difícil distinguir qual a concentração de cada uma durante o processo de secagem (PERAZZINI, 2014). Assim, deve-se ter em mente que o coeficiente de difusividade efetiva da Equação (23) representa a combinação de diversos mecanismos de transferência de massa apresentados na seção anterior, tanto na fase líquida quanto gasosa.

A solução da Equação (23) irá depender dos processos de transferência de massa considerados como dominantes na secagem. Na secagem convectiva de materiais alimentícios, a taxa de difusão de umidade interna se mostra mais lenta do que a convecção externa em grande parte dos casos (RATTI, 2009). Contudo, esse último mecanismo é responsável pela transferência da umidade superficial do sólido para a corrente de ar, também sendo importante para o processo de secagem convectiva. Assim, duas abordagens podem ser estabelecidas para solução do modelo difusivo, considerando: uma condição de contorno de

equilíbrio entre as fases (sólida e gasosa) na superfície (Abordagem I), válida quando o processo é limitado pela resistência interna à difusão, ou uma condição de contorno do tipo convectiva na superfície (Abordagem II), aplicável quando tanto a resistência interna à difusão como a resistência externa à convecção são relevantes no processo.

Abordagem I: considerando uma distribuição inicial ($t = 0$) uniforme de umidade (Equação (24)), impermeabilidade em $z = 0$ (Equação (25)) e umidade de equilíbrio em $z = L$ (Equação (26)), Crank (1975) obteve a solução analítica descrita pela Equação (27).

$$C. I.: X(z, t)|_{t=0} = X_i, \quad 0 < z < L \quad (24)$$

$$C. C. 1: \left[\frac{\partial X(z, t)}{\partial z} \right] \Big|_{z=0} = 0, \quad t > 0 \quad (25)$$

$$C. C. 2 (a): X(z, t)|_{z=L} = X^*, \quad t > 0 \quad (26)$$

Inserindo a Equação (27) na Equação (28) e realizando a integração, pode-se obter a concentração média em função do tempo, Equação (29).

$$\frac{X(z, t) - X^*}{X_i - X^*} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n} \cos(z\lambda_n) \exp \left[\lambda_n^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (27)$$

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L X(z, t) \quad (28)$$

$$RU = \frac{\bar{X}(t) - X^*}{X_i - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (29)$$

Abordagem II: substituindo a condição de contorno de umidade de equilíbrio em $z = L$ por uma que leve em consideração a resistência convectiva na superfície do meio poroso (Equação (30)), Crank (1975) obteve uma solução analítica que, após ser integrada para determinação da umidade média, resultou na Equação (31). Introduzindo a equação transcendental, Equação (32) na Equação (31) e rearranjando, pode-se obter a Equação (33).

$$C.C.2 (b): \left[\frac{\partial X(z, t)}{\partial z} \right] \Big|_{z=L} = -\frac{h_m \rho}{D_{eff} \rho_b} (Y_{eq} - Y_{\infty}), \quad t > 0 \quad (30)$$

$$RU = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2(\lambda_n)}{\lambda_n^2 + \lambda_n \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \exp \left[-\lambda_n^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (31)$$

$$Bi_m = \lambda_n \tan(\lambda_n) \quad (32)$$

$$RU = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Bi_m^2}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + Bi_m^2 + Bi_m)} \exp \left[-\lambda_n^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (33)$$

As Equações (33) e (29) podem ser utilizadas para obtenção de parâmetros como D_{eff} e Bi_m do processo de secagem de materiais particulados biológicos em leito fixo e camada fina através de regressão não linear, utilizando dados experimentais de RU e t .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos objetivos propostos foi desenvolvida uma metodologia experimental visando obter os dados necessários para a análise pretendida. Para tanto, a seguinte sequência metodológica foi aplicada:

1. Coleta e ajuste da umidade dos materiais particulados biológicos.
2. Caracterização das propriedades das partículas e dos leitos empacotados com materiais particulados com diferentes conteúdos de umidades.
3. Realização de ensaios fluidodinâmicos com materiais particulados com diferentes conteúdos de umidades.
4. Determinação da condição de camada fina por avaliação dos perfis axiais de temperatura ao longo dos leitos empacotados.
5. Realização de ensaios de transferência de calor com materiais com conteúdos de umidade inicial e de equilíbrio.
6. Avaliação e modelagem do processo de secagem em leito fixo em camada fina.
7. Análise estatística da influência do conteúdo de umidade nos parâmetros ajustados e propriedades mensuradas, bem como avaliação da qualidade das regressões.

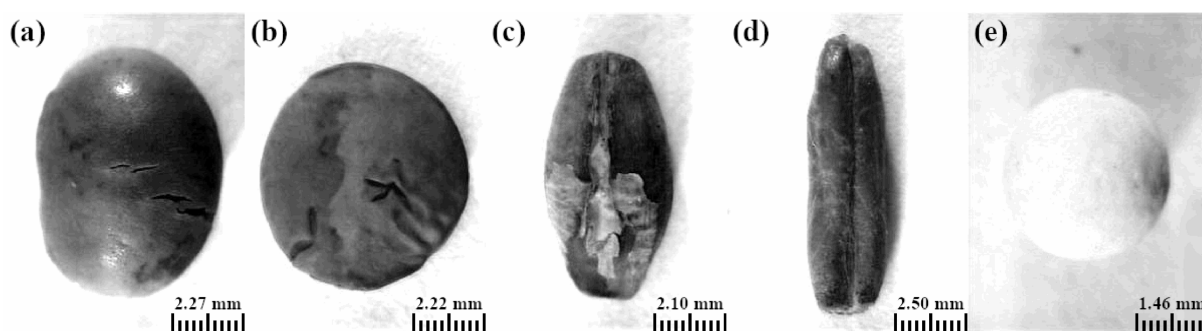
3.1 MATERIAIS PARTICULADOS

Os materiais particulados biológicos foram selecionados de modo a incluir partículas com diferentes formatos e tamanhos, a saber: soja (*Glycine max* L.), lentilha verde (*Lens culinaris*), cevada (*Hordeum vulgare* L.) e aveia (*Avena sativa*). Os materiais foram adquiridos desidratados de um mercado local de São Carlos, São Paulo, Brasil. Partículas esféricas de alumina (tipo F-200) com diâmetro de 3,2 mm, área superficial de 32,2 mm², volume de 17,3 mm³, esfericidade próxima a 1,0 e estrutura rígida foram fornecidas por Alcoa[®]. Nessas partículas, a água é absorvida nos poros internos e as dimensões e formato das partículas não são significativamente afetados pelo conteúdo de umidade. Por essas razões, elas foram incluídas para servir como uma partícula padrão de comparação. A Figura 9 ilustra os materiais selecionados.

O conteúdo de umidade inicial dos materiais biológicos variou entre 0,091 e 0,138 g.g⁻¹ b.s.. De modo a investigar a influência do conteúdo de umidade nas propriedades físicas das partículas e dos leitos, características fluidodinâmicas e processos de transferência de calor, os materiais tiveram suas umidades ajustadas para 0,24, 0,16, 0,09 e equilíbrio (X^*) g.g⁻¹

¹. Para tal propósito os materiais foram umidificados ou desidratados. A umidificação foi realizada colocando 150 g de amostra em recipientes plásticos de polietileno, adicionando a quantidade necessária de água deionizada e armazenando os recipientes selados a 4°C por 48 h. Tal metodologia foi utilizada por diversos autores para umidificação de cereais e legumes, sendo, portanto, adequada para os materiais estudados nesse trabalho (FELIZARDO, 2018; ALBINI, 2014). A desidratação foi realizada por secagem em estufa (TE-394/1, Tecnal[®]) a 50°C. No caso da umidade de X^* a desidratação foi conduzida até que os materiais apresentassem massa constante, resultando nas umidades de: 0,038 (soja), 0,047 (lentilha), 0,047 (cevada), 0,044 (aveia) e 0,045 (alumina) g.g^{-1} . O conteúdo de umidade foi determinado na mesma estufa a 105°C durante 24 h. Para a realização dos ensaios de determinação da condição de camada fina e secagem em camada fina, o conteúdo de umidade dos materiais foi ajustado para 0,24 g.g^{-1} seguindo o mesmo procedimento.

Figura 9 – Materiais particulados selecionados na umidade de 0,24 g.g^{-1} b.s.; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e).



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS PARTICULADOS

A caracterização das propriedades físicas dos materiais particulados fornece informações vitais para a compreensão dos fenômenos de transferência de momento, calor e massa envolvidos no processo de secagem. Além disso, o próprio conteúdo de umidade altera tais propriedades e exerce influência sobre os fenômenos de transferência. Assim, nessa sessão serão apresentadas as caracterizações das partículas e dos leitos realizadas para materiais com diferentes umidades.

3.2.1 Caracterização das partículas

Assumiu-se que as partículas biológicas apresentam a forma de esferoide triaxial mostrado na Figura 2. O comprimento (C_p) e largura (L_p) de 60 partículas foram mensurados pela técnica de análise de imagens. Um dispositivo Sony[®] LT26i foi utilizado na captura das imagens, as quais foram analisadas no *software* Image-Pro Plus[®] 6.0. A espessura (E_p) das 60 partículas foi medida por meio de um paquímetro digital (150 mm, MTX[®]). O diâmetro médio (D_m), volume (V_p) e esfericidade (φ) das partículas foram calculados utilizando as Equações (1), (3) e (7) respectivamente. Por outro lado, para as partículas de alumina foi assumido um formato esférico. O diâmetro esférico (D_e) de 60 partículas foi medido por meio de paquímetro digital (150 mm, MTX[®]). A área superficial (A_e) e volume (V_e) foram respectivamente calculados pelas Equações (4) e (5).

A densidade aparente foi estimada pela técnica de deslocamento de líquidos. Os experimentos foram realizados utilizando um picnômetro de 50 mL como recipiente de contenção e tolueno (99,5%, Dinâmica[®]) como líquido de deslocamento. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente e em triplicata. A Equação (8) foi utilizada no cálculo da densidade aparente.

A rugosidade superficial das partículas com umidade de 0,24 e X^* g.g⁻¹. foi investigada por microscopia confocal de varredura a laser (MCVL) utilizando um microscópio de medição a laser (LEXT OLS4100, Olympus[®]). O perfil de rugosidade foi avaliado em 30 linhas distribuídas pela superfície das partículas nos eixos vertical e horizontal. A rugosidade média aritmética foi obtida pela Equação (9) utilizando o *software* Olympus[®] OLS4100 3.1.1.

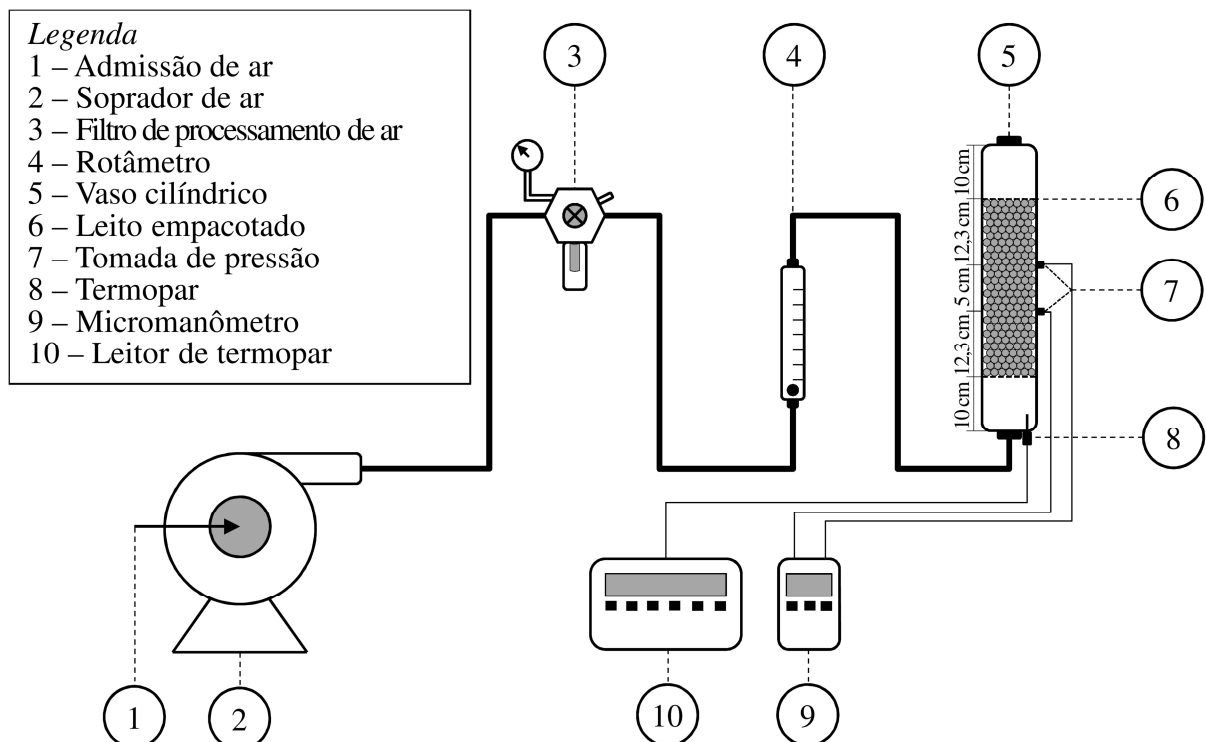
3.2.2 Caracterização dos leitos fixos

A densidade *bulk* dos leitos fixos foi obtida por medida do peso e volume das amostras utilizando uma balança digital (AS 1000, Marte[®]) e uma proveta com diâmetro interno de 5 cm. Os procedimentos descritos na seção 2.2.2.1, em conjunto com a Equação (10), foram utilizados na obtenção dos dados. Já a porosidade foi obtida com base nas densidades *bulk* e aparente utilizando a Equação (11). Todos os experimentos foram realizados em triplicatas.

3.3 ENSAIOS DE FLUIDODINÂMICA EM LEITO FIXO

Antes dos experimentos os materiais foram colocados em temperatura ambiente por 1 h para alcançar o equilíbrio térmico. Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados no sistema experimental apresentado na Figura 10, em triplicatas. O ar admitido (1) pelo soprador (2) foi comprimido e passou por um filtro de processamento de ar (F-2000, Arprex[®]) (3). A vazão de ar de entrada no leito foi ajustada por uma válvula localizada no filtro e medida em um rotâmetro previamente calibrado (E 9869, Gilmont[®]) (4). O ar então seguiu para um vaso cilíndrico (5) com diâmetro interno (D_c) de 5 cm. A razão D_c/D_m variou na faixa de 7,0-16,0, dependendo do material. O leito (6) foi empacotado no vaso até a altura de 29,6 cm de acordo com o mesmo procedimento descrito na seção 2.2.2.1. Uma distância de 10 cm foi colocada nas regiões de entrada e saída do leito. Os pontos de tomada de pressão (7), distribuídos ao longo da altura do vaso, foram espaçados entre si por 5 cm e das bordas do leito empacotado por 12,3 cm. A queda de pressão (ΔP) nos leitos foi medida por meio de um micromanômetro digital (530, Alnor[®]) (9). A temperatura do ar (T_g) de entrada foi medida por termopar (tipo T) (8) e lida em um leitor de termopar (Type T, Digi-Sense[®]) (10).

Figura 10 – Sistema experimental para avaliação da queda de pressão em leitos empacotados com materiais particulados.



As quedas de pressão foram medidas em diferentes vazões de ar e a uma temperatura média de $27,08 \pm 0,03^\circ\text{C}$. A velocidade superficial de ar (U) variou na faixa de $0,05$ - $0,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A viscosidade (μ) e a densidade (ρ) média do ar foram $1,84 \times 10^{-5} \pm 3,95 \times 10^{-9} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,18 \times 10^0 \pm 3,54 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente (INCROPERA *et al.*, 2006).

A permeabilidade e o fator de resistência inercial foram obtidos por regressão linear da equação de Forchheimer, Equação (13), utilizando dados de queda de pressão em função da velocidade superficial. Os dados de permeabilidade obtidos foram utilizados na estimativa do fator de forma por meio da equação de Kozeny-Carman, Equação (14). O fator de forma foi então empregado na obtenção da tortuosidade utilizando a Equação (15), considerando-se um formato circular de seção transversal dos poros. O raio hidráulico foi estimado utilizando a permeabilidade, o fator de forma e a porosidade *bulk* experimentalmente obtidos, empregando-se a Equação (16).

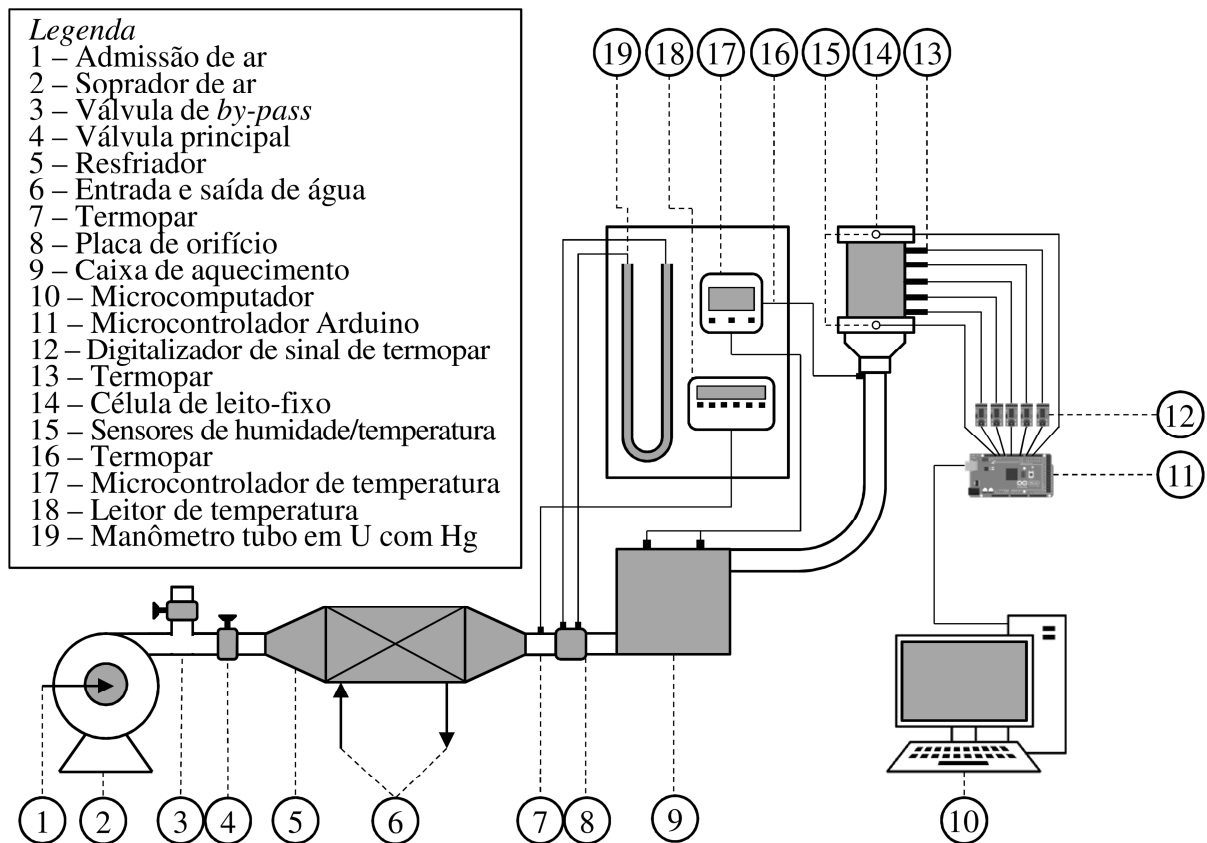
3.5 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CAMADA FINA

A condição de camada fina foi determinada no sistema experimental apresentado na Figura 11. O ar comprimido era fornecido por um soprador radial (7,5 cv, Weg[®]) (1) (2) e as vazões de ar eram ajustadas por meio das válvulas (1502-B, Deca[®]): principal (4) e de *by-pass* (3). O ar de saída da válvula principal era resfriado por um resfriador (5) utilizando água como fluido de trabalho (6). A temperatura de saída do ar do resfriador era medida por um termopar (tipo T) (7) e lida em um leitor de termopar (Digi-Sense[®]) (18). O ar então passava por uma placa de orifício (1/2 pol) (8), a qual gerava uma queda de pressão que era lida em um manômetro do tipo tubo em U com mercúrio (19). Com base na queda de pressão, a vazão de entrada no leito era calculada através de uma equação de calibração previamente obtida.

Posteriormente, o ar seguia para a caixa de aquecimento (9), aonde era aquecido de modo a atingir a temperatura desejada, a qual era medida por um termopar na entrada do leito (16). O controle de aquecimento foi realizado por um controlador de temperatura (N1030, Novus[®]) (17) operando no sistema PID (Proporcional Integral Derivativo). O ar aquecido seguia para o leito-fixo (14), o qual é mostrado em maiores detalhes na Figura 12. A umidade, temperatura e pressão de entrada e saída do leito foram monitoradas a cada 3 s (9 aquisições/s) por dois sensores de umidade/temperatura/pressão (BME 280, Bosch[®]) (15). Os sensores foram conectados a um microcontrolador (Mega 2560 R3, Arduino[®]) (11), o qual transmitia os dados para um microcomputador (Inspiron 3520, Dell[®]) (10) em uma *baud* de 9600. O microcomputador realizava então o armazenamento dados no *software* Microsoft

Excel[®] 2010 por meio de uma rotina previamente desenvolvida no *software* Arduino IDE 1.8.5. A comunicação entre o microcontrolador e o *software* Microsoft Excel[®] 2010 foi realizada pelo *add-in* Parallax[®] Data Acquisition tool (PLX-DAQ). As temperaturas no interior do leito foram medidas em intervalos de 3 s (9 aquisições/s) por cinco termopares (tipo K) (13) localizados nas posições axiais de 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm e 5 cm. Os sinais gerados pelos termopares foram processados por um microchip (Max 6675, Maxim[®]) (12), o qual realizava a digitalização dos dados, compensação de junta-fria e o envio dos dados ao microcontrolador conectado ao microcomputador, que realiza o armazenamento dos dados.

Figura 11 – Sistema experimental para a determinação da condição de camada fina em leitos empacotados com materiais particulados.

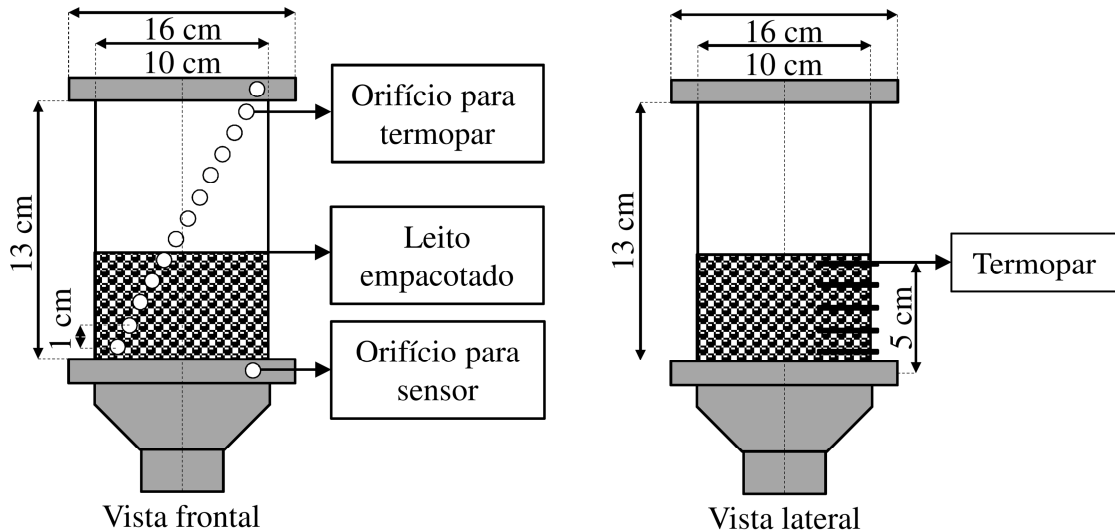


Fonte: Acervo Pessoal (2019).

As condições do ar de entrada foram: velocidade superficial de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, umidade relativa de $13,09 \pm 0,02\%$, temperatura de $50,07 \pm 0,01^\circ\text{C}$ e pressão de $927,61 \pm 0,02 \text{ hPa}$. Antes da realização de cada experimento o sistema foi estabilizado por um período de 1 h. Os ensaios foram realizados com os materiais possuindo um conteúdo de umidade de $0,24 \text{ g.g}^{-1}$. O leito foi empacotado de modo aleatório por derramamento de quantidades fixas de material

de uma mesma altura até que uma camada de 5 cm de espessura fosse alcançada.

Figura 12 – Leito-fixo para obtenção dos dados de temperatura em função do tempo.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

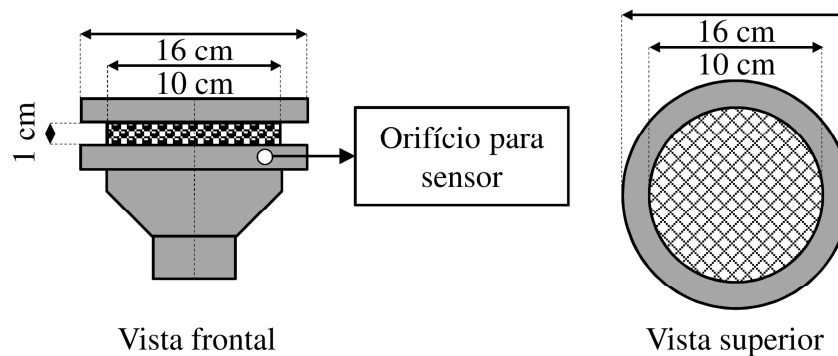
3.6 ENSAIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO

De modo a verificar a influência do conteúdo de umidade na transferência de calor nos leitos-fixos, os ensaios foram realizados com os materiais em duas umidades: 0,24 e X^* g.g^{-1} . Os experimentos foram conduzidos no mesmo sistema descrito na Figura 11, utilizando exatamente os mesmos procedimentos descritos na seção 3.5. Os dados relativos aos materiais na umidade de 0,24 g.g^{-1} foram os mesmos utilizados na determinação da condição de camada fina.

3.7 SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA FINA

Uma vez determinada a condição de camada fina, os experimentos de secagem foram realizados no mesmo sistema descrito na Figura 11, em duplicata. Contudo, nesse caso, a célula de leito-fixo apresentada na Figura 12 foi substituída pela célula de secagem em camada fina apresentada na Figura 13. As condições do ar de entrada foram: velocidade superficial de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, umidade relativa de $13,21 \pm 0,01\%$, temperatura de $50,03 \pm 0,01^\circ\text{C}$ e pressão de $924,16 \pm 0,01 \text{ hPa}$.

Figura 13 – Leito fixo utilizado nos ensaios de secagem em camada fina.



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Antes da realização dos experimentos o sistema foi estabilizado por um período de 1 h. O leito foi empacotado por derramamento de quantidades fixas de material, como anteriormente descrito, e acoplado no suporte de leito dando início a secagem. Durante o processo de secagem o leito foi desacoplado do equipamento, em intervalos de tempo constantes, e pesado em balança semi-analítica (4400, Gehaka[®]). A umidade de equilíbrio dinâmico (X^*) foi alcançada quando a variação na massa do leito ocorreu na ordem da incerteza da medida (0,001 g). A umidade total (X_t) foi calculada pela Equação (17), a umidade livre (X) pela Equação (18), a razão de umidade (RU) pela Equação (19) e a taxa de secagem (R) pela Equação (20). A massa de sólido seco (W_s) foi determinada pelo método gravimétrico em estufa (TE-394/1, Tecnal[®]) a 105°C durante 24 h (GEANKOPLIS, 1993).

3.8 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM

A modelagem matemática da cinética de secagem foi realizada com base nas duas abordagens descritas na seção 2.4.4. Na Abordagem I, a qual contemplava apenas difusão interna, a Equação (29) foi resolvida utilizando os cem primeiro termos ($n = 100$) e ajustada aos dados cinéticos experimentais de RU em função de t por Regressão Não Linear (RNL) de modo a se obter D_{eff} . Para tal propósito, buscou-se minimizar a função objetivo (F_{obj}) descrita pela Equação (34) utilizando o método *Generalized Reduced Gradient* (GRG) pela função *solver* do *software* Microsoft Excel[®] 2010.

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2 \quad (34)$$

Na Abordagem II, a qual considerava a difusão interna e a convecção externa, a Equação (33) também foi resolvida utilizando os cem primeiros termos ($n = 100$) e ajustada aos dados cinéticos utilizando o método supracitado. Nesse caso, diversas regressões foram realizadas com diferentes números de Bi_m . Para cada valor de Bi_m testado, diferentes valores de λ_n foram obtidos resolvendo-se a equação transcendental (Equação 32) no *software* Maple[®] 2015.1. Esses valores, em conjunto com o número de Bi_m testado, foram utilizados no ajuste da Equação (33) aos dados cinéticos para estimativa de D_{eff} . O número de Bi_m que proporcionou o melhor ajuste da equação aos dados experimentais, tomando como critérios os parâmetros descritos na seção 3.10, foi escolhido como representativo do processo.

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A influência estatística significativa do conteúdo de umidade do sólido na rugosidade média aritmética de cada material foi avaliada pelo teste t de *Student* ($p \leq 0,05$) para amostras independentes, uma vez que a influencia de apenas dois conteúdos de umidade foi avaliada nesse caso. A influência da umidade em todas as outras propriedades e parâmetros ajustados foi avaliada pela Análise de Variância (ANOVA) ($p \leq 0,05$) com fator único e teste de Tukey. Todas as análises foram realizadas no *software* Statistica[®] 7.1.

3.10 ANÁLISE DA QUALIDADE DA REGRESSÃO

De modo a avaliar as diferenças entre os dados experimentais (y_i) e estimados pelos modelos e equações ($f(x_i)$) utilizadas nesse trabalho, uma análise da qualidade da regressão foi realizada. O coeficiente de determinação (R^2) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (*REQM*) foram calculados pelas Equações (35) e (36), respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (35)$$

$$REQM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i))^2}{N}} \quad (36)$$

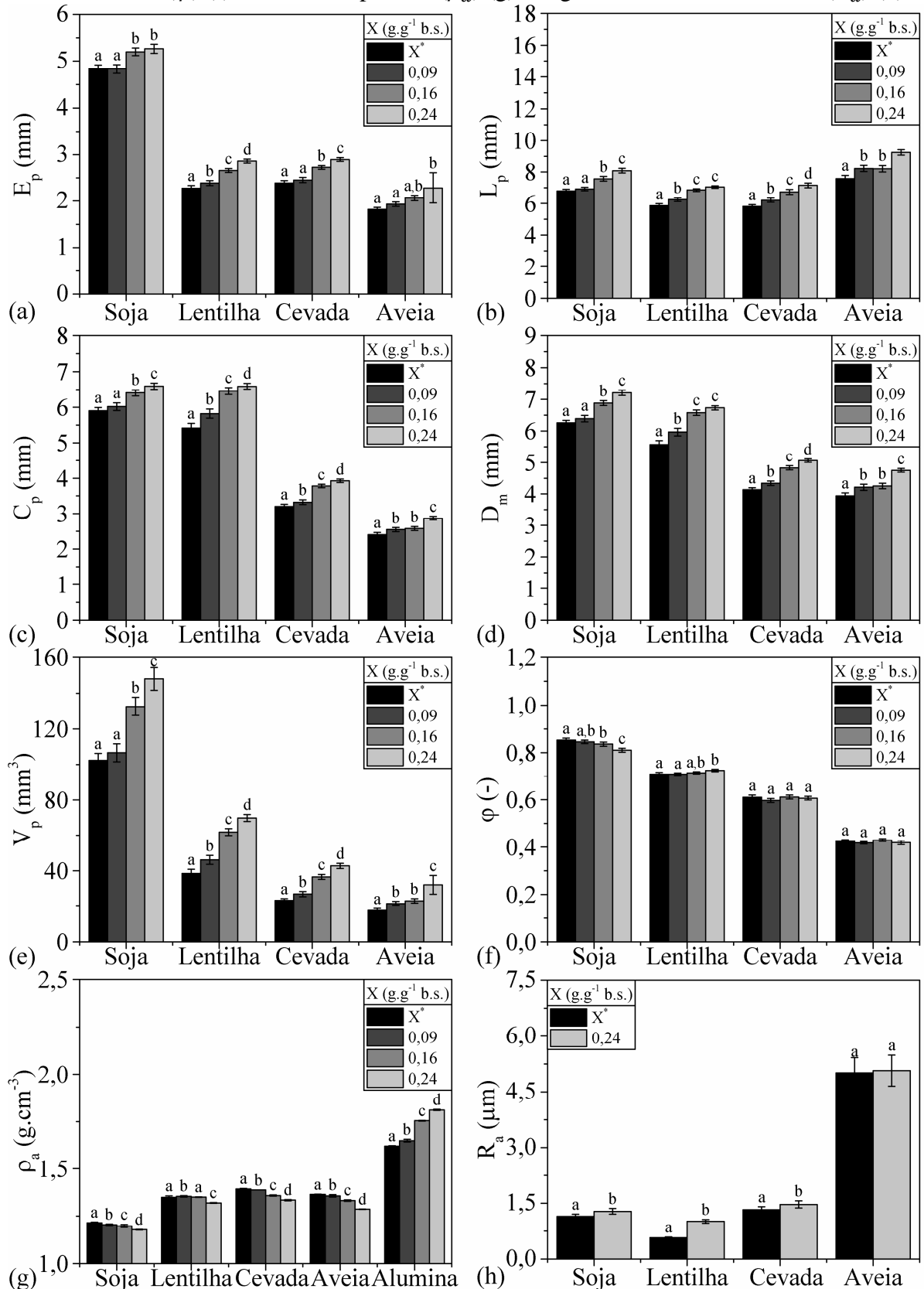
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS PARTICULADOS

4.1.1 Características das partículas

As Figuras 14 (a)-(h) mostram as dimensões lineares das partículas, volume, esfericidade, densidade e rugosidade média aritmética em diferentes conteúdos de umidade. A dependência das propriedades das partículas com o conteúdo de umidade pode ser observada nessas figuras. Como as dimensões e a forma da alumina não se alteram significativamente com o conteúdo de umidade, para essa partícula apenas a variação na densidade aparente é mostrada na Figura 14 (g). Uma redução estatisticamente significativa das dimensões lineares das partículas C_p , L_p , E_p e D_m foi observada para todos os materiais biológicos à medida que a umidade foi reduzida (Figuras 14 (a)-(d)). O encolhimento é um fenômeno tipicamente observado em produtos alimentícios devido ao desequilíbrio de pressão entre o interior do material e a pressão externa (MAYOR; SERENO, 2004). O aquecimento e a remoção do conteúdo de umidade produzem tensões de contração na estrutura celular, que tendem a aumentar quanto mais umidade é removida (MAYOR; SERENO, 2004). Lentilha e cevada foram as partículas nas quais as dimensões lineares variavam mais com a redução da umidade. De modo geral, todas as partículas mostraram algum grau de encolhimento, como corroborado pelas imagens mostradas na Figura 15, onde as partículas biológicas nos níveis de umidade de 0,24 e X^* g.g⁻¹ podem ser comparadas. As diferentes características estruturais e composições internas de cada produto proporcionam diferentes mobilidades de água na matriz sólida e o encolhimento apresenta padrões característicos para cada um deles (MAYOR; SERENO, 2004). A Figura 15, em conjunto com os valores de R_a da Figura 14 (h), mostram as alterações na textura superficial das partículas à medida que o conteúdo de umidade do sólido aumenta de X^* para 0,24 g.g⁻¹. Foi possível observar o desenvolvimento de rachaduras superficiais na superfície das partículas de soja, lentilha e cavada, o que resultou no aumento significativo de R_a . Tais rachaduras aparecem por causa das tensões desiguais desenvolvidas nas estruturas que compõem o material durante a absorção ou remoção de água (FORTES; OKOS, 1980). A aveia e a alumina não apresentaram evidências de rachadura ou alterações na R_a , o que provavelmente se deve a maior homogeneidade na composição dessas partículas. Rachaduras superficiais devido a alterações na umidade já foram reportadas para grãos de soja e milho por Fortes e Okos (1980) e Mensah, Nelson e Herum (1984).

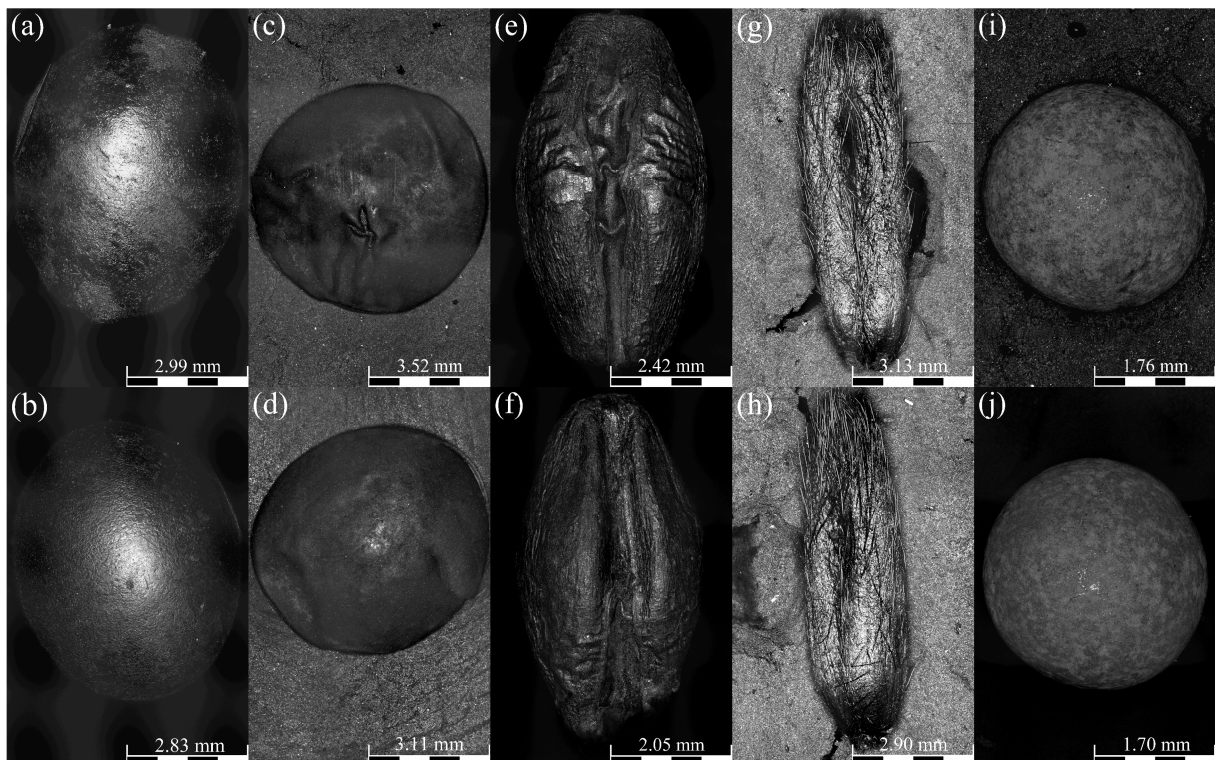
Figura 14 – Características das partículas com diferentes conteúdos de umidade; espessura (E_p) (a), largura (L_p) (b), comprimento (C_p) (c), diâmetro médio (D_m) (d), volume (V_p) (e), esfericidade (ϕ) (f), densidade aparente (ρ_a) (g) e rugosidade média aritmética (R_a) (h).



Fonte: Acervo Pessoal (2019). Valores com letras diferentes são estatisticamente diferentes entre os materiais ($p < 0,05$).

O encolhimento causou uma redução estatisticamente significativa do volume (Figura 14 (e)) e área superficial (não mostrado) das partículas. As Figuras 14 (f) e 15 mostram que, apesar da redução significativa nas dimensões das partículas, seus formatos não foram significativamente afetados, o que caracteriza um encolhimento isotrópico, discutido na seção 2.2.3. De acordo com Mayor e Sereno (2004), em altos conteúdos de umidade, o encolhimento compensa quase que completamente a perda de umidade e o volume do material diminui linearmente. Para os grãos investigados aqui, as dimensões lineares alteraram em taxas proporcionais e a forma foi preservada. Os padrões observados para esfericidade e dimensões lineares das partículas de soja, lentilha e cevada com a variação do conteúdo de umidade são compatíveis com dados reportados por Deshpande, Bal e Ojha (1993), Isik (2007a) e Sologubik *et al.* (2013) para materiais similares.

Figura 15 – Textura superficial das partículas com diferentes conteúdos de umidades; soja a 0,24 (a) e X^* (b), lentilha a 0,24 (c) e X^* (d), cevada a 0,24 (e) e X^* (f), aveia a 0,24 (g) e X^* (h) e alumina a 0,24 (i) e X^* (j) g.g^{-1} b.s..



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

A Figura 14 (g) mostra que a densidade aparente dos materiais biológicos diminuiu à medida que o conteúdo de umidade foi removido. Embora a remoção de água torne as partículas mais leves, a diminuição significativa observada nos volumes das partículas (Figura

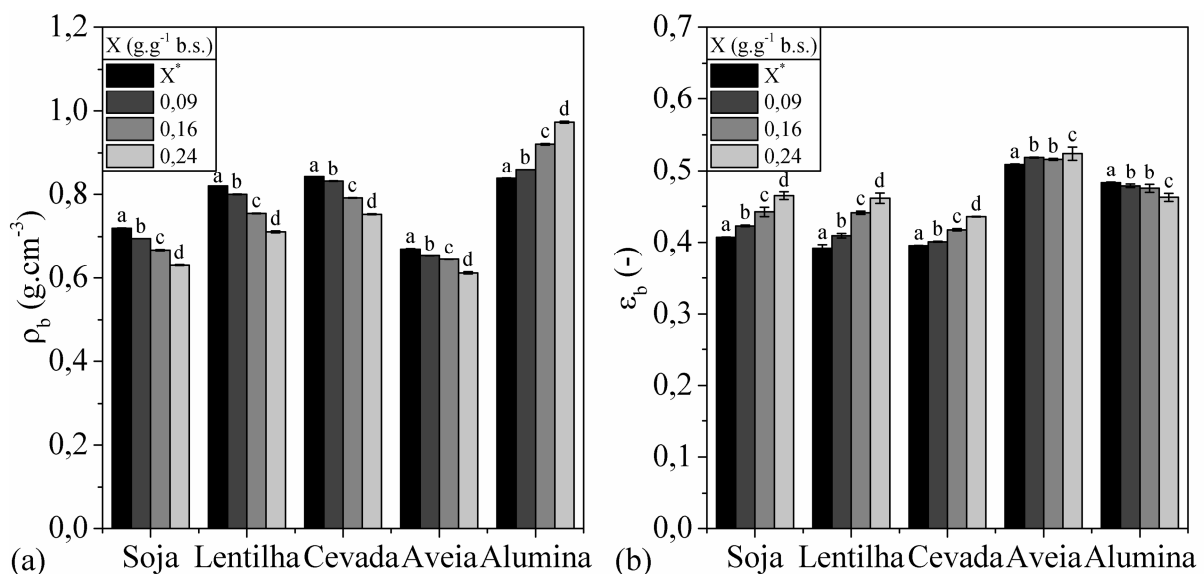
14 (e)) é responsável pelo aumento de sua densidade. Como esperado, a dependência foi oposta para as partículas de alumina, cuja densidade aparente aumenta com o acréscimo da umidade, uma vez que as partículas úmidas são mais pesadas e seu volume não é afetado pela remoção de umidade.

4.1.2 Características dos leitos empacotados

4.1.2.1 Influência do conteúdo de umidade nos parâmetros dos leitos empacotados

As Figuras 16 (a) e (b) apresentam a densidade *bulk* e porosidade dos leitos empacotados com grãos e partículas de alumina em diferentes conteúdos de umidade. O aumento significativo observado da densidade *bulk* dos leitos empacotados com grãos (Figura 16 (a)) é consistente com a evidência de que partículas com umidade mais baixa são mais densas e têm um menor tamanho. Isso contribui para redução dos espaços interparticulares e produção de leitos mais compactos. Por outro lado, a densidade *bulk* dos leitos empacotados com alumina diminuiu com a redução da umidade, pois à medida que a água nos poros internos da alumina é gradualmente substituída pelo ar, as partículas se tornam mais leves, mas seus volumes e dimensões não se alteram.

Figura 16 – Características dos leitos com diferentes conteúdos de umidade; densidade *bulk* (ρ_b) (a) e porosidade *bulk* (ε_b) (b).



Fonte: Acervo Pessoal (2019). Valores com letras diferentes são estatisticamente diferentes entre os materiais ($p < 0,05$).

A dependência da porosidade com o nível de umidade do sólido na Figura 16 (b) mostra padrões opostos e corrobora com a observação de que grãos com baixa umidade produzem leitos que são mais compactos. Na faixa investigada, com a redução da umidade, a porosidade dos leitos empacotados com materiais biológicos sofreu uma diminuição relativa de 14,9% para lentilha, 12,3% para soja, 9,2% para cevada e 2,9% para aveia, já para os leitos empacotados com partículas de alumina, houve um aumento relativo de 4,3%.

Os padrões descritos nessa seção estão de acordo com aqueles relatados por pesquisadores que investigaram grãos biológicos como trigo, lentilha e aveia (GINER; DENISIENIA, 1996; SOKHANSANJ *et al.*, 1990; KOBUS; GUZ; NADULSKI, 2011).

4.1.2.2 Influência das características das partículas nos parâmetros dos leitos empacotados

Fixando o conteúdo de umidade e analisando a influência das características dos materiais na densidade *bulk* e porosidade, é possível observar padrões de variação complexos, sem tendências claras de variação correlacionadas a algum parâmetro específico. Isso pode ser atribuído ao fato de que as propriedades dos leitos empacotados são afetadas por diversos fatores, incluindo dimensões, forma, densidade e rugosidade das partículas (GERMAN, 1989). Todavia, alguns resultados podem ser destacados. Observa-se que os leitos empacotados com partículas de aveia apresentaram as menores densidades *bulk* e as maiores porosidades, o que pode estar ligado a alta rugosidade média aritmética desse material (Figura 14 (h)), aliada à baixa esfericidade das partículas (Figura 14 (f)). Segundo German (1989), tais fatores contribuem para empacotamentos menos densos devido a efeitos de ponte e o aumento do atrito interparticular. A densidade *bulk* e a porosidade dos leitos empacotados com partículas de soja, lentilha e cevada apresentaram valores próximos. O que é consistente com os dados relativamente semelhantes de rugosidade média aritmética (Figura 14 (h)), esfericidade (Figura 14 (f)) e diâmetro de partícula (Figura 14 (d)), apresentados por esses materiais. Os leitos com partículas de alumina apresentaram os maiores valores de densidade *bulk*, contudo, os menores valores de porosidade não foram observados para esse material, o que pode estar associado aos valores notadamente maiores de densidade aparente das partículas desse material (Figura 14 (g)), em comparação com os outros.

4.2 FLUIDODINÂMICA DE LEITO FIXO

4.2.1 Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos empacotados

4.2.1.1 Influência do conteúdo de umidade nos parâmetros fluidodinâmicos

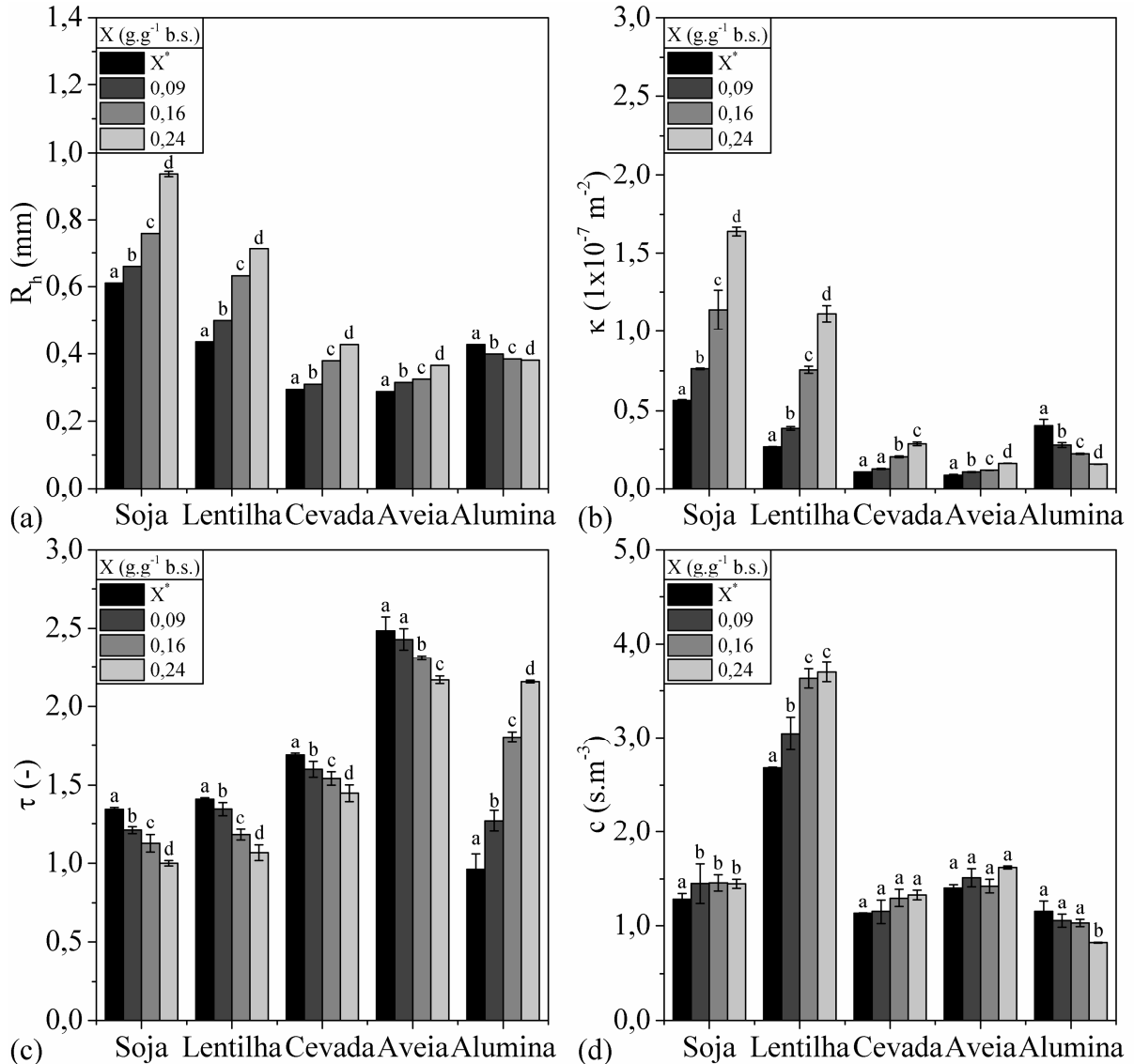
Os valores de permeabilidade e de fator de resistência inercial estimados pelo ajuste da equação de Forchheimer a dados experimentais, bem como as propriedades dos leitos fixos, tortuosidade e raio hidráulico, estimados pelas Equações (15) e (16) são mostrados na Figura 17 para diferentes níveis de umidade.

As Figuras 17 (a) e (b) mostram que o raio hidráulico e a permeabilidade dos grãos foram significativamente reduzidos pela diminuição do conteúdo de umidade, enquanto que a alumina apresentou um comportamento oposto. Em meios porosos, o raio hidráulico é um parâmetro relacionado à área da seção transversal dos poros capilares disponível para escoamento de fluido. Na seção 4.1.2.1 foi mostrado que leitos empacotados com grãos com baixa umidade são mais densos, portanto os padrões observados para o raio hidráulico e a permeabilidade são consistentes. A magnitude de variação do raio hidráulico e da permeabilidade com a variação do conteúdo de umidade nos diferentes leitos empacotados seguiu a mesma ordem observada para a porosidade. O raio hidráulico diminuiu 39,1% para lentilha, 34,7% para soja, 30,7% para cevada e 11,0% para aveia, enquanto que para a alumina houve um aumento de 11,8%. A permeabilidade foi reduzida em 76,1% para lentilha, 65,6% para soja, 62,8% para cevada e 46,8% para aveia, já para a alumina houve um aumento de 61,0%.

Inversamente proporcional ao raio hidráulico e a permeabilidade, a tortuosidade dos leitos empacotados com materiais biológicos aumentou com a redução do conteúdo de umidade, enquanto que os leitos com alumina apresentaram um comportamento oposto. Uma vez que a esfericidade dos materiais foi conservada (Figura 14 (f)), tais comportamentos são consistentes com as variações nas porosidades em função do conteúdo de umidade (Figura 16 (b)). De acordo com German (1989), a redução da porosidade pode aumentar a irregularidade do caminho através dos espaços vazios do meio poroso, aumentando a tortuosidade. À medida que a umidade do sólido foi reduzida, a tortuosidade reduziu 55,4% para alumina e aumentou 32,2% para lentilhas, 24,9% para soja, 16,6% para cevada e 14,5% para aveia. A variação notadamente maior observada para a alumina sugere que o número de coordenação e a conectividade em leitos estáticos de partículas rígidas foram mais afetados pela umidade do

que em leitos feitos de partículas deformáveis.

Figura 17 – Parâmetros fluidodinâmicos dos leitos empacotado com diferentes umidades; raio hidráulico (R_h) (a), permeabilidade (κ) (b), fator de resistência (c) (c) e tortuosidade (τ) (d).



Fonte: Acervo Pessoal (2019). Valores com letras diferentes são estatisticamente diferentes entre os materiais ($p < 0,05$).

As alterações no fator de resistência inercial com o conteúdo de umidade mostradas na Figura 17 (d) foram estatisticamente significativas apenas para soja e lentilha. O número de Reynolds (Re_m) (ERGUN, 1952) para o escoamento no meio poroso foi avaliado usando o diâmetro médio das partículas e a porosidade *bulk*, a partir da definição:

$$Re_m = \frac{\rho U D_m}{\mu(1 - \varepsilon_b)} \quad (37)$$

Para as condições testadas, os valores variaram entre 217 e 420, o que indica que resistências inerciais e viscosas, mostradas na Figura 5, contribuem para as perdas de energia do fluido (KILKIS, KAKAÇ, 1989). Os parâmetros associados com as perdas de energia na equação de Forchheimer são a permeabilidade e o fator de resistência inercial. Observou-se que os valores de permeabilidade nos leitos de soja foram notadamente superiores aos observados para as outras partículas (Figura 17 (b)). Possivelmente, o fato de que as partículas de soja tenham valores de esfericidade acima de 0,8 e um volume significativamente maior em comparação às outras partículas contribua para esse resultado. Quanto ao parâmetro inercial, os maiores valores foram encontrados para as lentilhas, que tem um diâmetro médio próximo ao da soja, mas volume e esfericidade significativamente menores.

4.2.1.2 Influência das características das partículas nos parâmetros fluidodinâmicos

De modo a facilitar a discussão dos resultados, adotou-se a ordem decrescente de diâmetro de partícula para comparação das características dos materiais e estabelecimento de padrões durante todo o trabalho: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina.

Fixando-se o conteúdo de umidade é possível comparar os valores de raio hidráulico entre os materiais na Figura 17 (a). O raio hidráulico tende a ser maior para partículas de maior diâmetro e esfericidade, como a soja e a lentilha (0,93-0,43 mm), e menor para a cevada e aveia (0,42-0,28 mm), que são partículas de menor diâmetro e esfericidade. De acordo com Massarani (2001), no contexto do modelo capilar, o raio hidráulico é diretamente proporcional à porosidade do leito, diâmetro partícula e esfericidade. Como discutido na seção 4.1.2.2, não foi possível observar um padrão claro de influência das características individuais das partículas na porosidade e a variação máxima desse parâmetro entre os materiais foi de apenas 0,1. Portanto os resultados observados na figura citada estão consistentes com as observações de Massarani (2001).

A Figura 17 (b) mostra que, a uma dada umidade, os valores de permeabilidade reduziram da soja para a aveia e, em seguida, aumentaram para a alumina. Tal padrão é semelhante àqueles observados para o raio hidráulico, esfericidade e diâmetro de partícula, o que é esperado, visto que tais variáveis influenciam de forma diretamente proporcional na permeabilidade (GERMAN, 1989). É importante destacar que outros parâmetros, como a porosidade e a rugosidade superficial também podem influenciar na permeabilidade (GERMAN, 1989). Contudo, devido à variação relativamente pequena da porosidade entre os materiais e a baixa viscosidade do ar, tais efeitos são marginais frente aos anteriormente

colocados.

Comparando os valores de tortuosidade entre os materiais na Figura 17 (c) é possível observar um padrão oposto ao observado para o raio hidráulico e permeabilidade, ou seja, aumento dos valores de tortuosidade da soja para a aveia, seguido de uma diminuição para a alumina. A tortuosidade é uma propriedade do meio poroso, fortemente influenciada pela porosidade e geometria entre os espaços vazios interparticulares no meio poroso (GERMAN, 1989). Como supracitado, a porosidade apresentou pouca variação entre os materiais. Contudo, a esfericidade (Figura 14 (f)), a qual também influencia na geometria dos espaços interparticulares, reduziu da soja para aveia e aumentou para a alumina, o que pode ter contribuído para o padrão de tortuosidade observado. Outro resultado que corrobora essa observação é que as partículas secas que apresentaram maior esfericidade, como a soja e a lentilha, apresentaram valores de tortuosidade mais próximos do unitário.

Na Figura 17 (d) é possível observar que o fator de resistência inercial permaneceu entre valores de 0,8 e 1,6 $s.m^{-3}$, sem variações claras de tendência, exceto para a lentilha que notadamente apresentou valores mais altos desse parâmetro. Tal resultado indica que a forma achatada das partículas de lentilha, em conjunto com seu diâmetro moderado, pode ter proporcionado maiores contrastes de tamanho entre gargantas e corpos de poros (Figura 5 (5) e (6)), o que é associado ao aumento da resistência inercial (HAGOORT, 1988).

4.2.2 Características de queda de pressão dos leitos empacotados

4.2.2.1 Influência do conteúdo de umidade na queda de pressão dos leitos empacotados

A Figura 18 apresenta as quedas de pressão nos leitos empacotados em função da velocidade em diferentes conteúdos de umidade do sólido (símbolos) e os valores estimados pela equação de Forchheimer (Equação (13)) (linhas). Para todas as condições, os dados foram estimados com boa precisão pela Equação (13), como pode ser observado pelos altos valores de R^2 e valores relativamente baixos $REQM$. Para todos os leitos empacotados com materiais biológicos, a queda de pressão tendeu a aumentar à medida que umidade do sólido foi reduzida a uma determinada velocidade do ar, enquanto que um comportamento oposto foi observado para os leitos empacotados com partículas de alumina. Esses comportamentos são consistentes com as mudanças observadas nas características dos leitos empacotados discutidas nas seções anteriores. Para leitos de partículas biológicas, o aumento no tamanho das partículas, à medida que a umidade foi absorvida, levou a formação de leitos com maiores permeabilidades e raios

hidráulicos. Essas características favoreceram a condutância do fluido através dos canais de poros interparticulares e contribuíram para reduzir a queda de pressão.

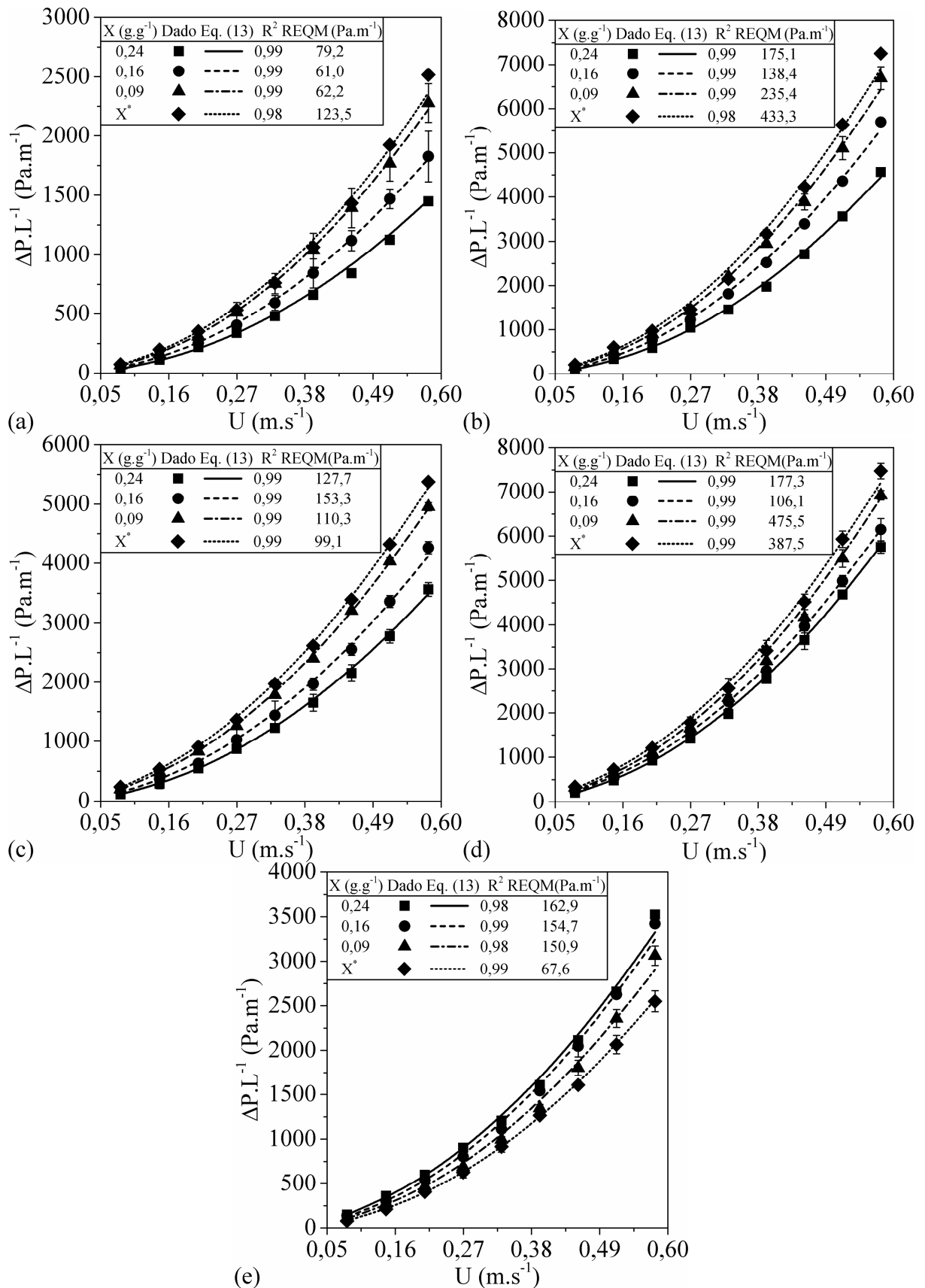
Destaca-se ainda que o aumento da rugosidade da soja, lentilha e cevada com o aumento da umidade, constatado nas Figuras 14 (h) e 15, pode ter contribuído para elevar as quedas de pressão devido ao aumento das perdas de energia do fluido por arrasto viscoso (Figura 5 (4)) (GERMAN, 1989; HAQUE; AHMED; DEYOE, 1982). No entanto, devido à baixa viscosidade do ar à temperatura ambiente, este efeito parece ter sido marginal em comparação com as mudanças observadas nas propriedades *bulk* do leito (GÓRNICKI; KALETA, 2015; HAQUE; AHMED; DEYOE, 1982). O aumento na queda de pressão com a redução da umidade foi maior para leitos empacotados com lentilhas (42,0%), soja (41,0%) e cevada (39,2%) e mais discreta para os leitos empacotados com aveia (24,6%). Já para os leitos empacotados com partículas de alumina a queda de pressão reduziu (30,1%) com a umidade do sólido. Os padrões gerais encontrados neste estudo concordam com os dados reportados para produtos biológicos por Al-Yahya e Moghazi (1998), Giner e Denisienia (1996), Górnicki e Kaleta (2015), Kobus, Guz e Nadulski (2011) e Molenda *et al.* (2005).

Para projetar e monitorar o armazenamento de grãos em silos aerados e realizar a secagem em secadores convectivos de leito fixo é conveniente ter equações simples para prever com exatidão as quedas de pressão através de leitos estáticos empacotados com grãos, em função do conteúdo de umidade e da velocidade de aeração. Visando incorporar o efeito do conteúdo de umidade do sólido na Equação (13), para cada material, κ e c foram linearmente regredidos com o conteúdo de umidade do sólido e as equações ajustadas foram inseridas na Equação (13). Uma equação modificada foi obtida, como se segue:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{AX + B} U + \frac{CX + D}{\sqrt{AX + B}} \rho U^2 \quad (38)$$

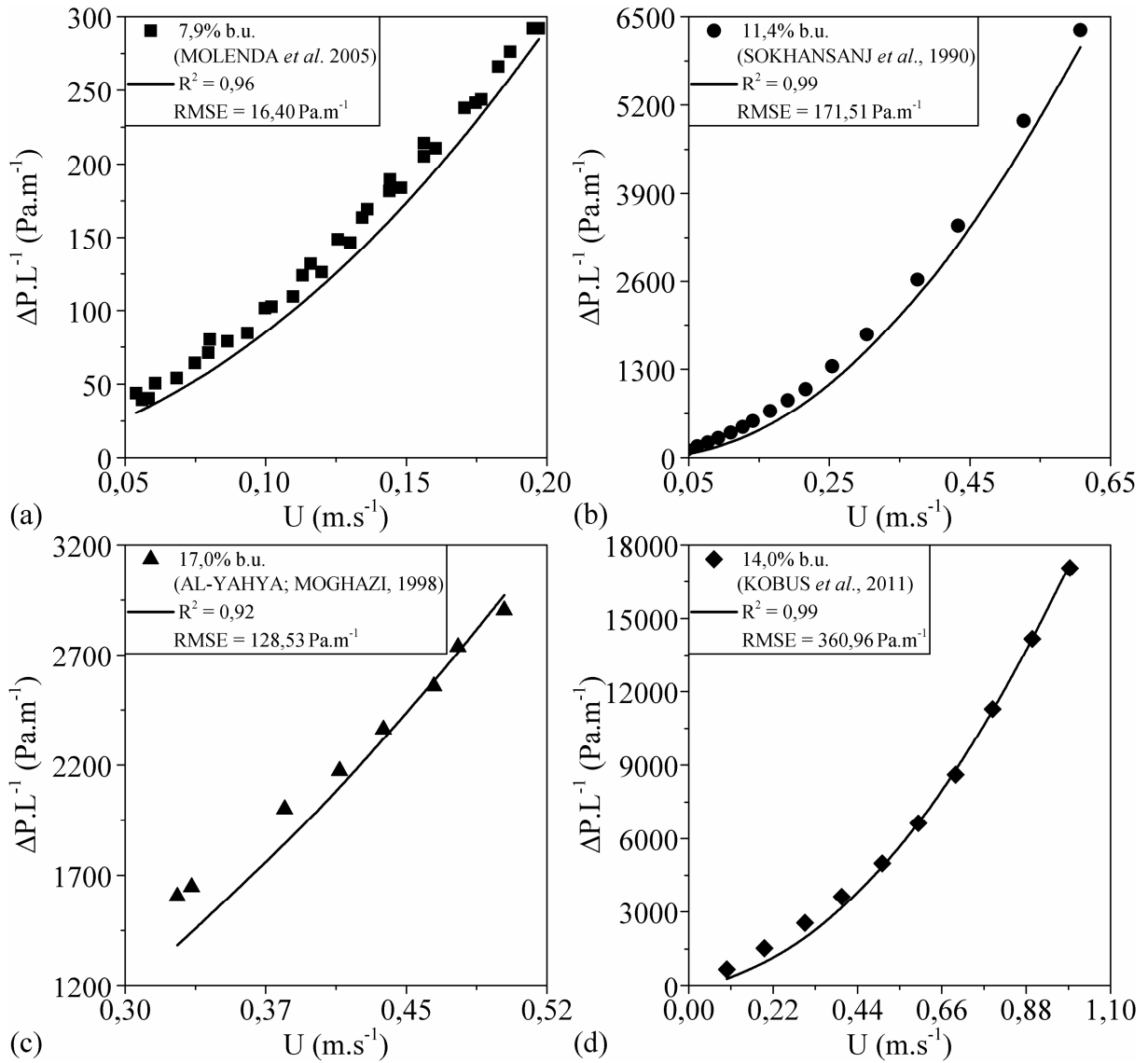
em que A , B , C e D são parâmetros ajustados para cada produto. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros ajustados e os critérios estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajuste. Pode ser observado que os valores de R^2 foram próximos a 1,0 e os valores de $REQM$ foram baixos quando comparados com valores médios de pressão, o que evidencia a qualidade da regressão.

Figura 18 – Queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade superficial em diferentes conteúdos de umidade; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e).



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

Figura 19 – Valores experimentais e preditos (Equação (38)) de $\Delta P/L$ versus velocidade em leitos de materiais biológicos; soja 7,9% b.u. (funil) (a), lentilha a 11,4% b.u. (leito disperso) (b), cevada a 17,0% b.u. (leito com 6,2 cm) (c), e aveia a 14,0% b.u. (dia 0, 0 kPa) (d).



Fonte: Acervo Pessoal (2019).

As equações foram testadas usando dados experimentais de quedas de pressão relatados na literatura para condições operacionais semelhantes às utilizadas nesse trabalho. Uma comparação entre os resultados experimentais e os previstos é mostrada na Figura 19. Mais informações sobre o conjunto de dados usado para fins comparativos nesta figura podem ser encontradas em Molenda *et al.* (2005), Sokhansanj *et al.* (1990), Al-Yahya e Moghazi (1998) e Kobus, Guz e Nadulski (2011). Excelentes predições da queda de pressão podem ser observadas para leitos empacotados com partículas de soja, lentilha, cevada e aveia, com valores de R^2 maiores que 0,9 e baixos valores de $REQM$. Vale a pena destacar que, em

alguns casos, estimativas precisas foram obtidas mesmo em velocidades fora da faixa experimental testada. Portanto, a Equação (38) pode ser recomendada como uma correlação confiável para predição das quedas de pressão em leitos empacotados com grãos em função do conteúdo de umidade do sólido e da velocidade do ar.

Tabela 2 - Constantes na Equação (38) ajustadas para os diferentes materiais particulados.

Material	A ($\text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{g}$)	B (m^{-2})	C ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{g}$)	D ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)	R^2	$REQM$ ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)
Soja	$5,489 \times 10^{-7}$	$2,831 \times 10^{-8}$	0,654	1,324	0,99	62,50
Lentilha	$4,630 \times 10^{-7}$	$-1,909 \times 10^{-9}$	5,273	2,525	0,99	236,75
Cevada	$9,834 \times 10^{-8}$	$4,405 \times 10^{-9}$	1,178	1,064	1,00	82,11
Aveia	$3,757 \times 10^{-8}$	$6,697 \times 10^{-9}$	0,883	1,372	1,00	84,29
Alumina	$-1,236 \times 10^{-7}$	$4,292 \times 10^{-8}$	-1,648	1,235	0,98	125,47

4.2.2.2 Influência das características das partículas na queda de pressão dos leitos empacotados

Na Figura 18 ainda é possível verificar a influência das características dos materiais na queda de pressão a uma dada umidade e velocidade de ar. Observa-se que a queda de pressão foi menor para os leitos que apresentaram maior permeabilidade, como os de soja e alumina ($1447\text{-}3523 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$), e maior para os leitos com menor permeabilidade, como os de lentilha e cevada ($4559\text{-}7213 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$). Tal comportamento é esperado visto que a permeabilidade influencia de forma inversamente proporcional nas quedas de pressão (GERMAN, 1989). Todavia, como mostrado na seção 4.2.1.1, ambas as resistências viscosas e inerciais são importantes para a perda de energia do fluido. Assim, no caso dos leitos empacotados com lentilha, os quais apresentaram fatores de resistência inercial expressivamente maiores do que ao outros materiais (Figura 17 (d)), as quedas de pressão mais elevadas observadas para esse material também podem ser atribuídas a maior resistência a inércia.

4.3 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CAMADA FINA

Nas Figuras 20 (a)-(e) são respectivamente apresentados os dados de temperaturas em função do tempo para 6 posições axiais dos leitos empacotados com: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina, na umidade de $0,24 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. Analisando-se as figuras é possível notar que, antes do início da secagem, a temperatura era uniforme ao longo dos leitos de todos os materiais estudados. Quando cada um dos leitos foi acoplado no equipamento de secagem, a

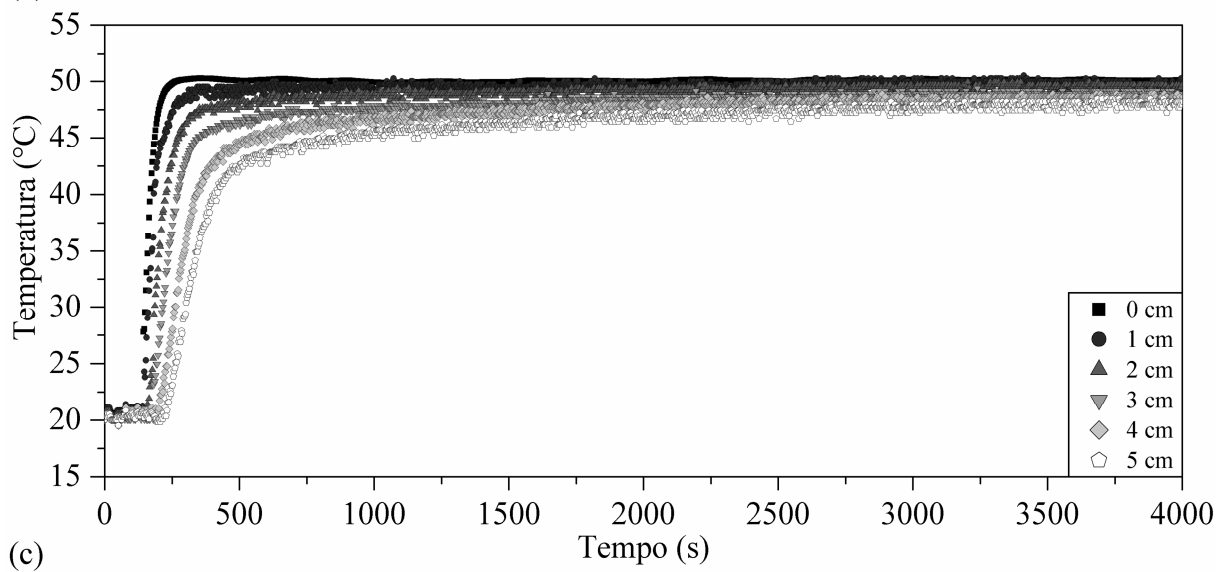
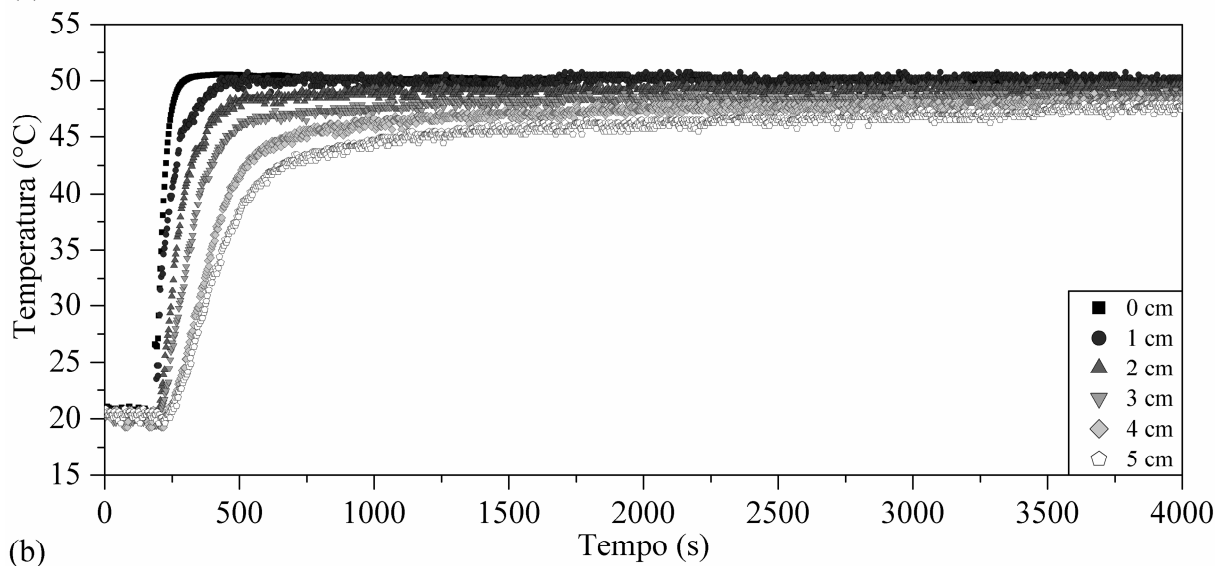
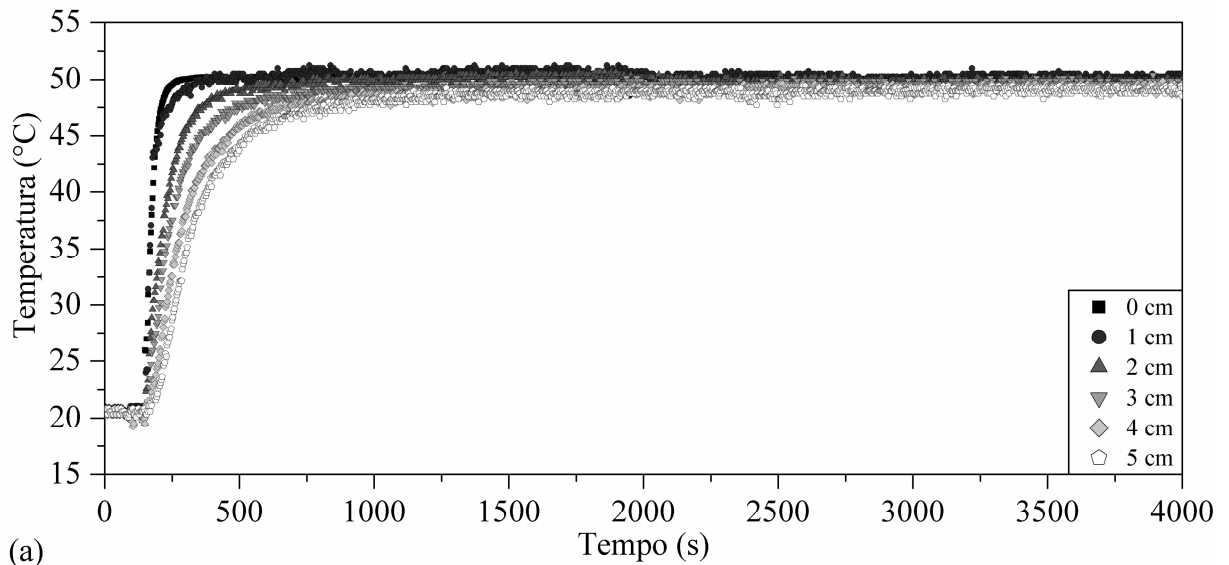
temperatura medida pelo sensor na base do leito buscou se igualar com a temperatura de 50°C do ar de secagem de forma quase que imediata. Nesse momento, também se iniciou o contato do ar aquecido com a superfície inferior do leito. Esta região começou receber a energia fornecida pela fase gasosa, dando início à transmissão do calor, principalmente na direção axial. Devido à troca térmica, a temperatura do meio começou a subir de forma transiente, como pode ser observado para todos os materiais.

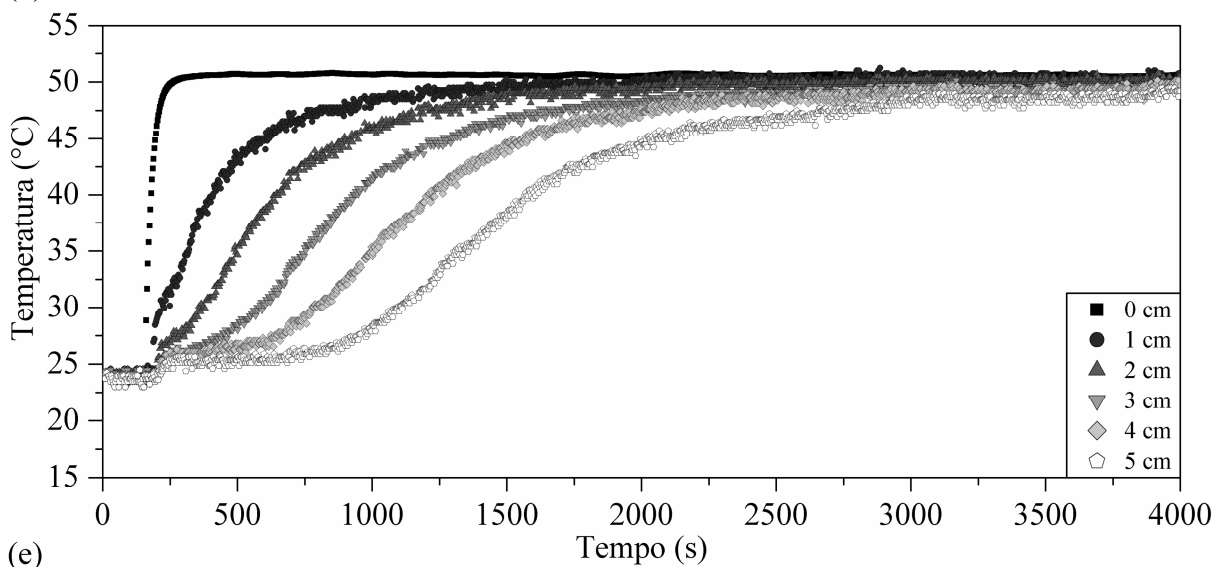
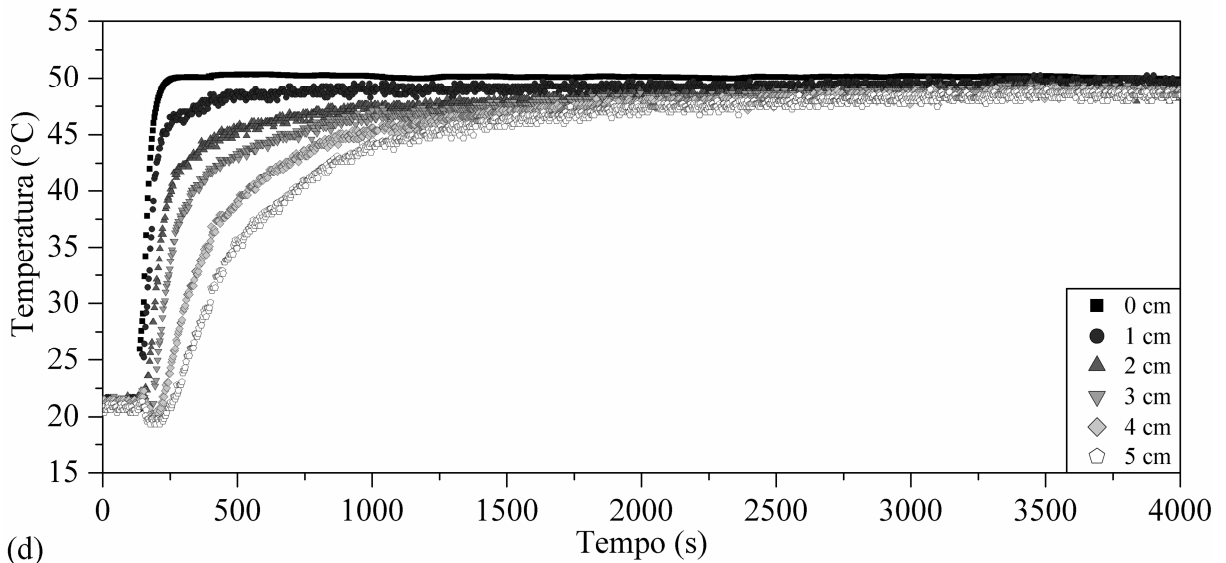
Foi possível observar que, quanto mais próximo da base mais rápida foi à elevação da temperatura do meio. Isto indica que a energia fornecida pela fase gasosa para o meio foi gradualmente reduzida à medida que a corrente de ar avança no leito. Tal redução ocorre devido a gradual perda de energia da fase gasosa para evaporação do conteúdo de umidade da fase sólida conforme ocorre o avanço da corrente. Assim, nas regiões mais afastadas da base do leito não há energia disponível suficiente na fase gasosa para elevar a temperatura da fase sólida da mesma forma que ocorre nas regiões próximas à base.

Para alguns grãos, e principalmente para a alumina, foi possível observar a formação de dois patamares de temperaturas. O primeiro patamar se forma antes do início do aumento de temperatura transiente. Tal patamar indica que a secagem encontra-se no período de saturação da fase gasosa por remoção da água livre e a temperatura do meio só começa a se elevar quando a umidade crítica é atingida (PERAZZINI, 2014). Após a remoção da água livre, o material começou a apresentar um menor conteúdo de umidade e a energia da fase gasosa não foi totalmente utilizada como calor latente para evaporação do conteúdo de umidade, sendo seu excedente simultaneamente utilizando para o aquecimento da fase sólida. Assim, nas regiões próximas a base, aonde o período de remoção da água livre foi praticamente desprezível, ocorre um aumento brusco da temperatura (PERAZZINI, 2014).

Destaca-se que os leitos empacotados com partículas de alumina apresentaram um comportamento notadamente diferente dos demais, com a presença de dois patamares relativamente bem definidos, devido à interação entre a água e a estrutura interna desse material. A umidade presente na alumina está contida nos poros internos da partícula, porém a água não está quimicamente ligada à sua estrutura, portanto foi mais facilmente evaporada, o que propicia o desenvolvimento de dois patamares durante o processo de secagem. Tais fenômenos também foram similarmente observados por Perazzini (2014).

Figura 20 – Temperatura em função do tempo para os leitos empacotados; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g.g}^{-1} \text{ b.s.}$, $UR = 13,0\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$.





Fonte: Acervo pessoal (2019).

Quando a umidade da fase sólida começa tender a umidade de equilíbrio, a temperatura do meio começa a entrar em equilíbrio com a temperatura de entrada, caracterizando o início de um “estado estacionário”, o qual é indicado pelo segundo patamar. Ao se comparar as temperaturas alcançadas na condição de estado estacionário com a temperatura na base do leito, observou-se que, para todos os materiais, as diferenças foram iguais ou menores que: $0,52^{\circ}\text{C}$, $0,97^{\circ}\text{C}$, $1,21^{\circ}\text{C}$, $1,73^{\circ}\text{C}$ e $2,25^{\circ}\text{C}$ para as espessuras de 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm e 5 cm, respectivamente. De acordo com o fabricante a precisão mínima fornecida pelo Max 6675 é de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, nos primeiros 3 cm de leito a diferença entra a temperatura de entrada e a temperatura do meio na condição estacionária está dentro da faixa de incerteza de medida. Assim, em até 3 cm de leito, a condição de camada fina está sendo satisfeita quanto ao gradiente de temperatura. Contudo, para todos os materiais

estudados a menor diferença de temperatura na condição estacionária foi obtida com 1 cm de leito, sendo esta a condição adotada como camada fina.

4.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO

As Figuras 21 (a)-(e) apresentam os dados de temperatura em função do tempo em 6 posições axiais dos leitos empacotados com: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina, na umidade de equilíbrio. Novamente é possível notar que, antes do início do processo de secagem, marcado pelo aumento de temperatura próximo a 100 s, o leito apresentava uma distribuição uniforme de temperatura. Quando o processo se inicia, as temperaturas ao longo do leito aumentam rapidamente. Nesse ponto é interessante observar que os leitos na umidade de equilíbrio (Figura 21) apresentaram um aumento de temperatura muito mais rápido do que os leitos na umidade de 0,24 g.g⁻¹ (Figura 20). Isso se deve justamente ao maior conteúdo de umidade presente nas partículas. Dessa forma, nesses leitos, a energia da fase gasosa é utilizada como calor latente em maior quantidade e por mais tempo para evaporação do conteúdo de umidade. Por outro lado, nos leitos com umidade de equilíbrio existe muito pouca ou quase nenhuma umidade livre. Assim, praticamente toda a energia da fase gasosa é utilizada como calor sensível, resultando em aumento da temperatura do meio.

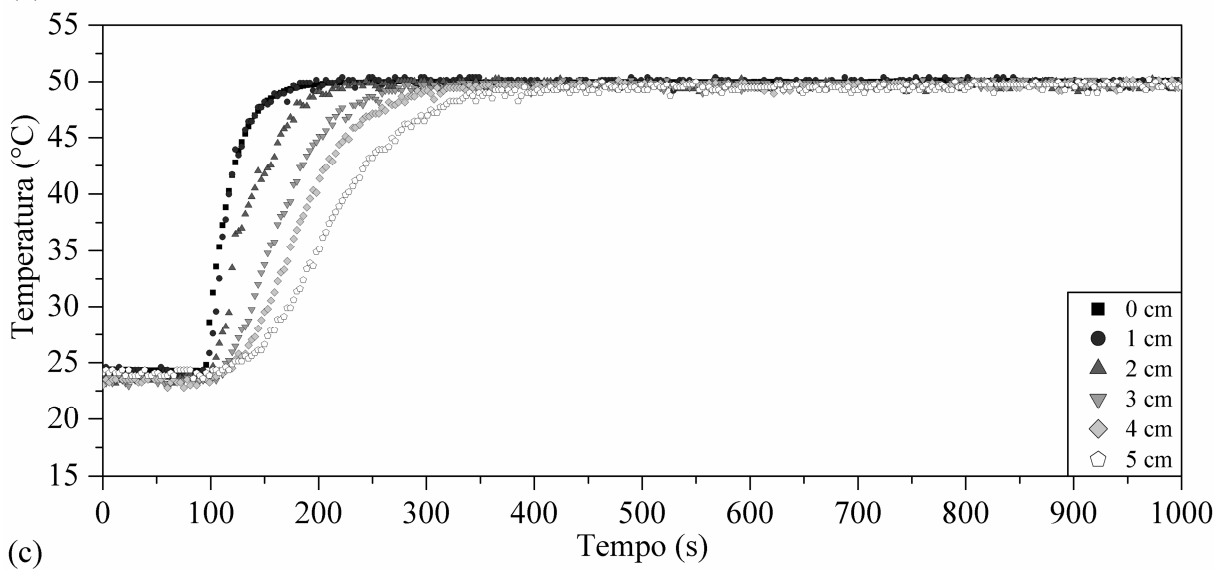
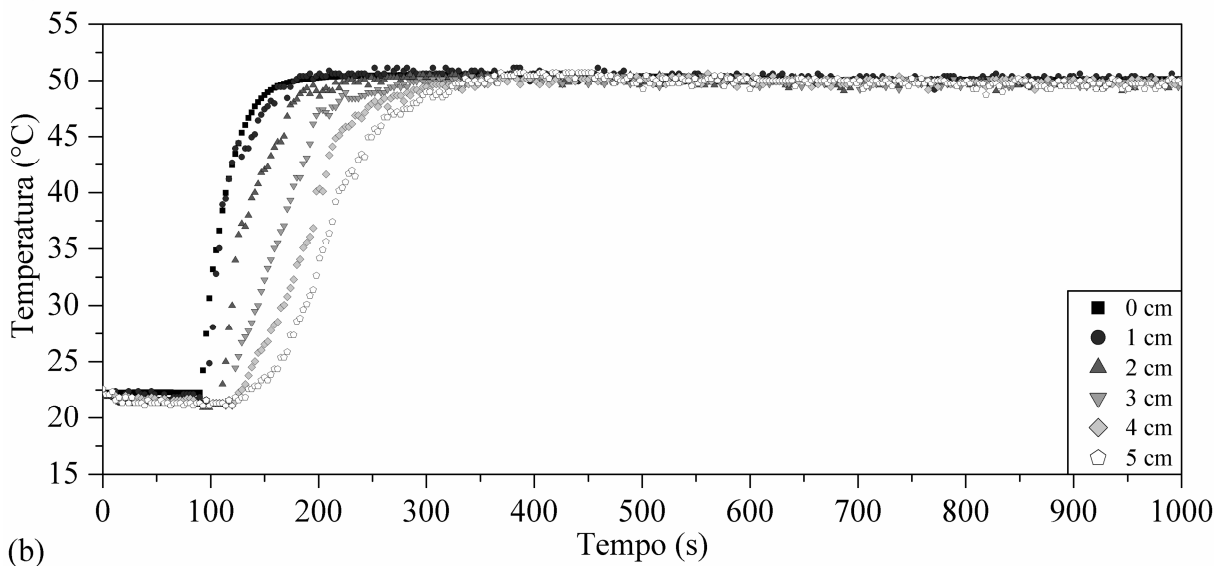
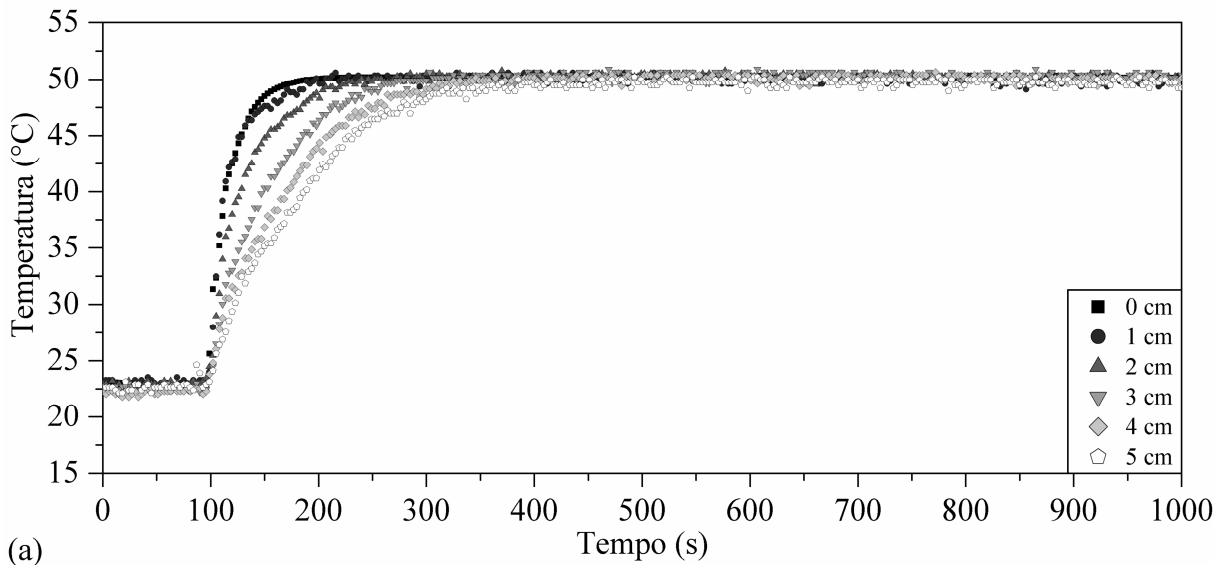
De modo a comparar as taxas de aquecimento dos leitos apresentados nas Figuras 20 e 21, calculou-se a razão entre a variação na temperatura até se iniciar o equilíbrio térmico e o tempo decorrido de tal processo:

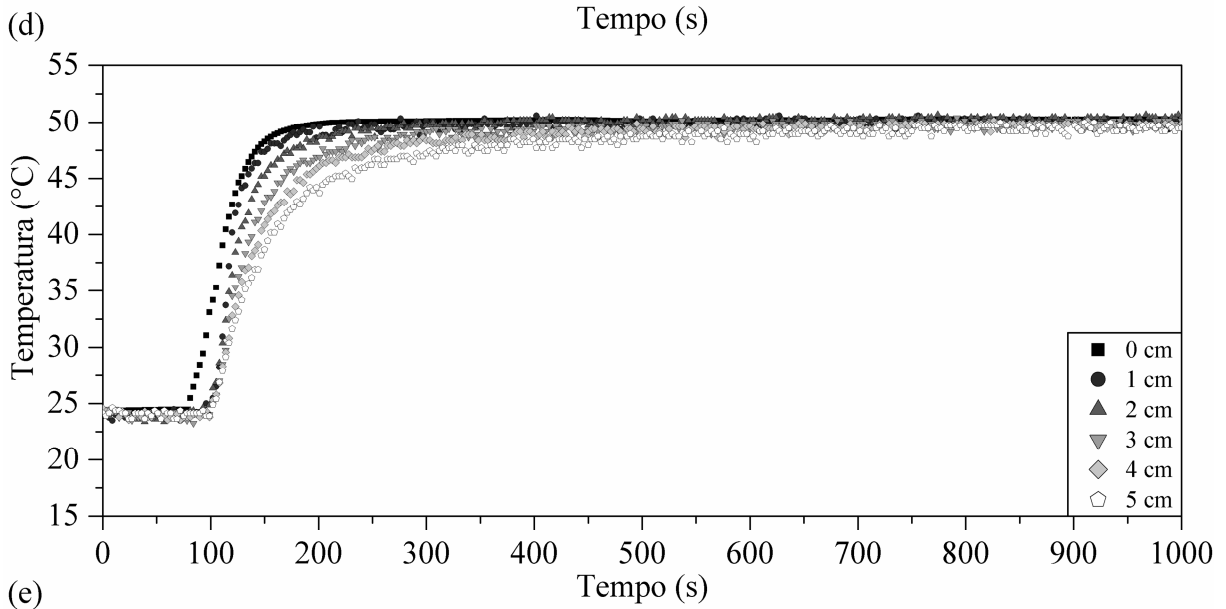
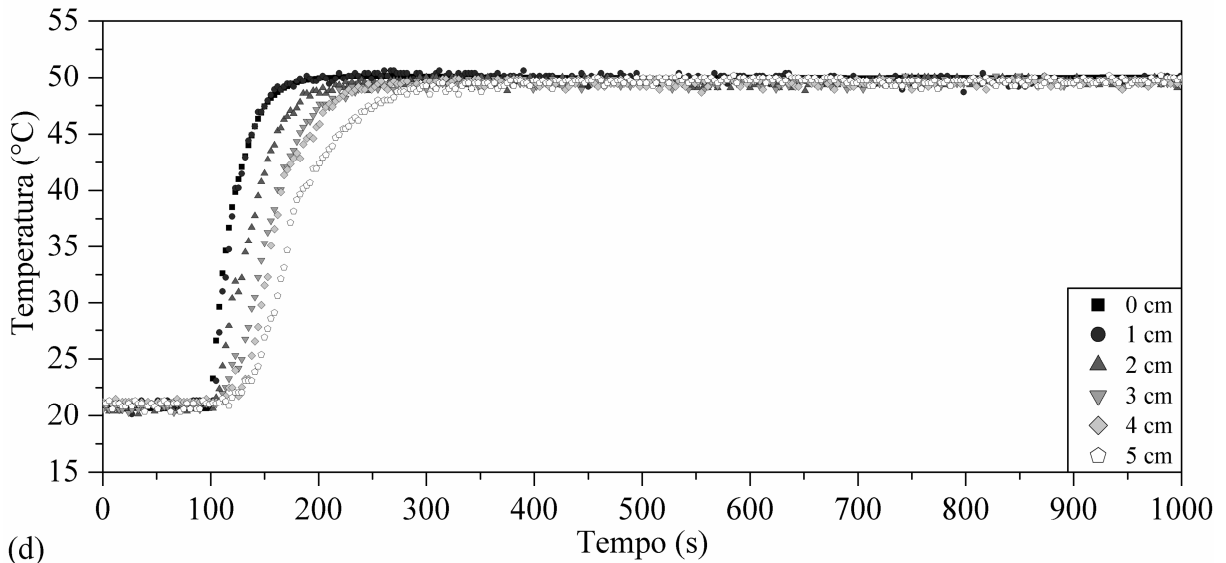
$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{eq} - T_i}{t_{eq} - t_i} \quad (39)$$

em que T_{eq} é a temperatura de início do equilíbrio, T_i é a temperatura no início da secagem, t_{eq} é o tempo para se alcançar a temperatura de equilíbrio e t_i é o tempo de início da secagem.

O resultado da aplicação da Equação (39) aos dados das Figuras 20 e 21 para os três primeiros centímetros de leito são apresentados na Figura 22. Nessa figura, para todas as umidades, a taxa de aquecimento diminuiu com o aumento da espessura do leito. Como anteriormente discutido, à medida que a corrente de ar avança sobre o leito a quantidade de energia disponível na fase gasosa para o aquecimento do leito é gradualmente reduzida. Assim, com a menor quantidade de energia disponível, o leito demora mais tempo para aquecer em regiões afastadas da base.

Figura 21 – Temperatura em função do tempo nos leitos empacotados: soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = X^*$, $UR = 13,0\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

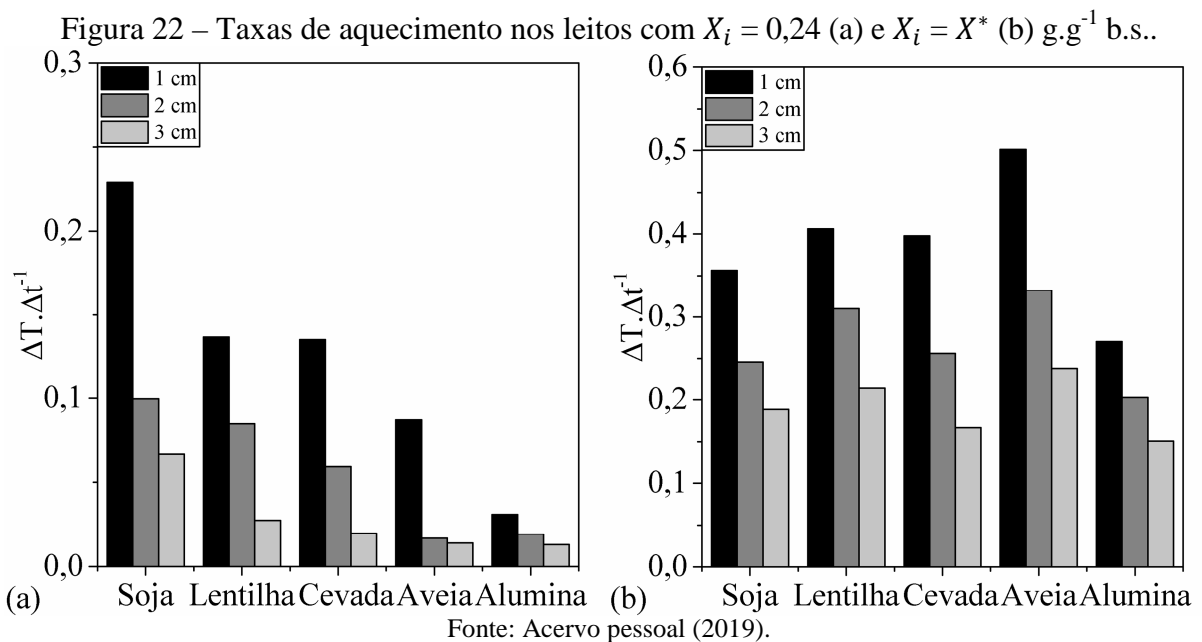




Fonte: Acervo pessoal (2019).

Comparando as taxas de aquecimento dos diferentes materiais, observa-se na Figura 22 (a) que as taxas de aquecimento nos leitos com $0,24 \text{ g.g}^{-1}$ de umidade diminuíram da soja para a alumina. Apesar de todas as partículas possuírem aproximadamente o mesmo conteúdo de umidade, a quantidade de água disponível para evaporação é diferente entre os materiais, dependendo das interações entre a matriz sólida e a água (GEANKOPLIS, 1993). Nos leitos em que a água contida nas partículas é mais facilmente removível, a energia fornecida pela fase gasosa é utilizada por um maior período de tempo como calor latente para evaporação da água antes de ser utilizada como calor sensível (PERAZZINI, 2014). Assim, os resultados mostrados nessa figura indicam que as partículas dos leitos de alumina e aveia apresentam um maior conteúdo de umidade de fácil remoção do que as partículas dos leitos de soja, lentilha e cavada. Ainda é importante ressaltar que, apesar da quantidade de energia ter sido igualmente fornecida

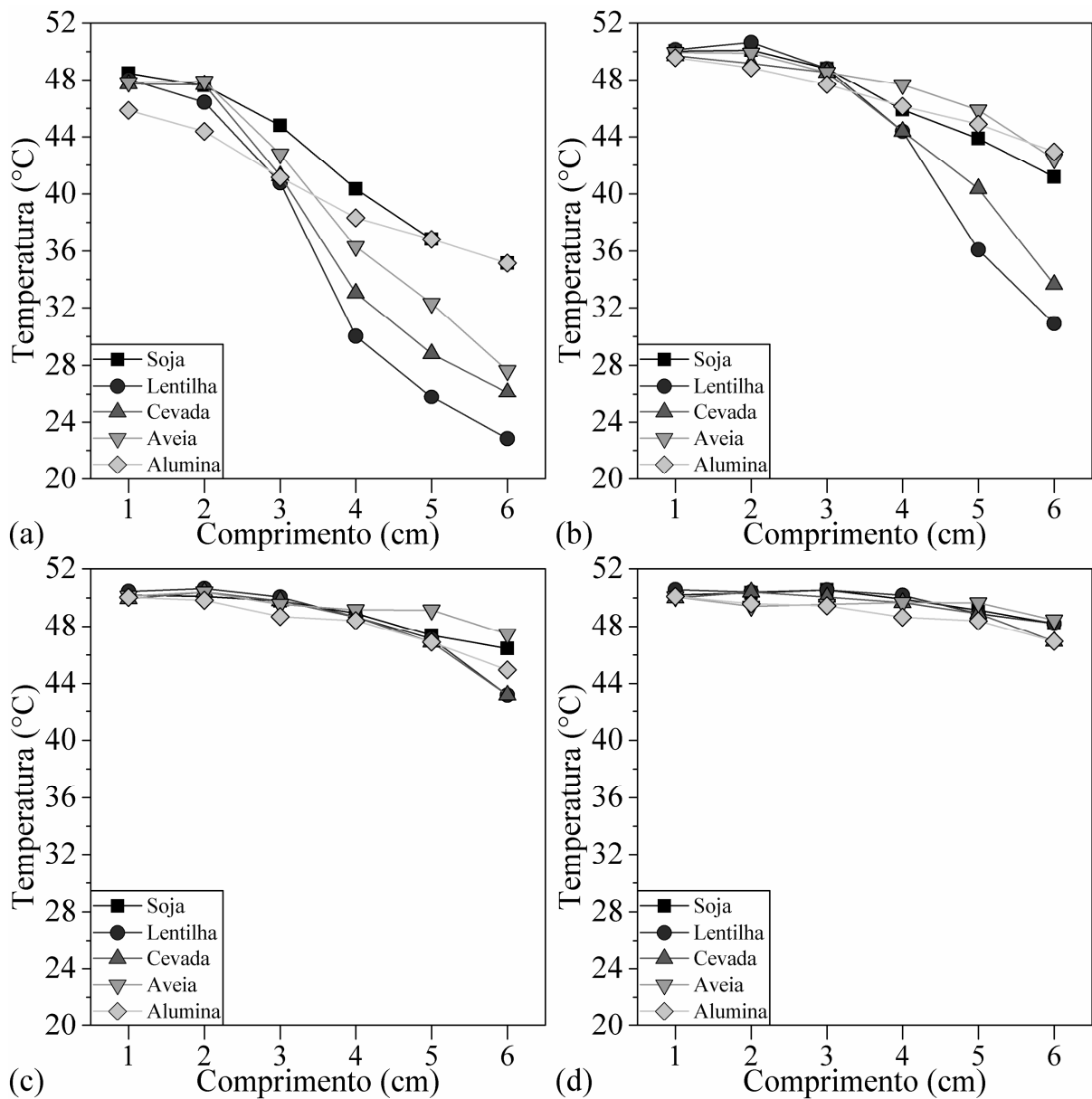
para todos os leitos e a umidade das partículas ajustada para $0,24 \text{ g.g}^{-1}$, a quantidade de água a ser evaporada não era igual para todos os leitos, visto que o volume de material foi fixado e não a massa. Assim, no caso de leitos mais densos, como os de alumina, devido a maior massa do leito, uma maior quantidade de água precisa ser evaporada para se alcançar o equilíbrio térmico, o que demanda maiores tempos de aquecimento. Além disso, diversos outros fatores também podem influenciar de forma simultânea na velocidade de aquecimento, como: condutividade térmica efetiva do leito, características fluidodinâmicas e características *bulk* do leito, sendo que o padrão observado é devido a um conjunto de fatores.



A Figura 22 (b) mostra que os leitos constituídos por materiais com umidade no equilíbrio apresentaram diferenças menos expressivas nas taxas de aquecimento. Quando a umidade do sólido é diminuta, a energia da fase gasosa é utilizada majoritariamente como calor sensível. Nesse caso, transferência de calor por difusão prevalece na secagem (PERAZZINI, 2014). Assim, a capacidade de transferência de calor do meio, a qual depende da condutividade térmica efetiva e características *bulk* do leito, influencia fortemente nas taxas de aquecimento. Apesar das partículas estudadas apresentarem características muito diferentes, as densidades *bulk* e porosidades médias foram relativamente semelhantes o que pode ter contribuído para as pequenas diferenças entre as taxas de aquecimento dos materiais.

Foram avaliadas as distribuições de temperatura ao longo do leito para os tempos de 50 s, 100 s, 150 s e 200 s do início da secagem, as quais estão associadas às resistências do meio ao transporte de calor. Os dados são mostrados na Figura 23.

Figura 23 – Distribuições de temperatura para os leitos com partículas na umidade X^* para os tempos de 50 s (a), 100 s (b), 150 s (c) e 200 s (d) do início da secagem.



Fonte: Acervo pessoal (2019).

Observar-se nessa figura que com 50 s, os leitos apresentavam maiores gradientes de temperatura, os quais são gradualmente reduzidos nos tempos posteriores de 100 s, 150 s e 200 s. Os gradientes são gerados devido a redução da quantidade de energia disponível na fase gasosa a medida que corrente de ar avança sobre o leito. Assim, com o decorrer do tempo de secagem as “camadas” inferiores do leito começam a entrar em equilíbrio térmico, disponibilizando mais energia na fase gasosa para o aquecimento das “camadas” subsequentes, reduzindo o gradiente de temperatura.

Comparando os gradientes de temperatura entre os materiais, é possível observar

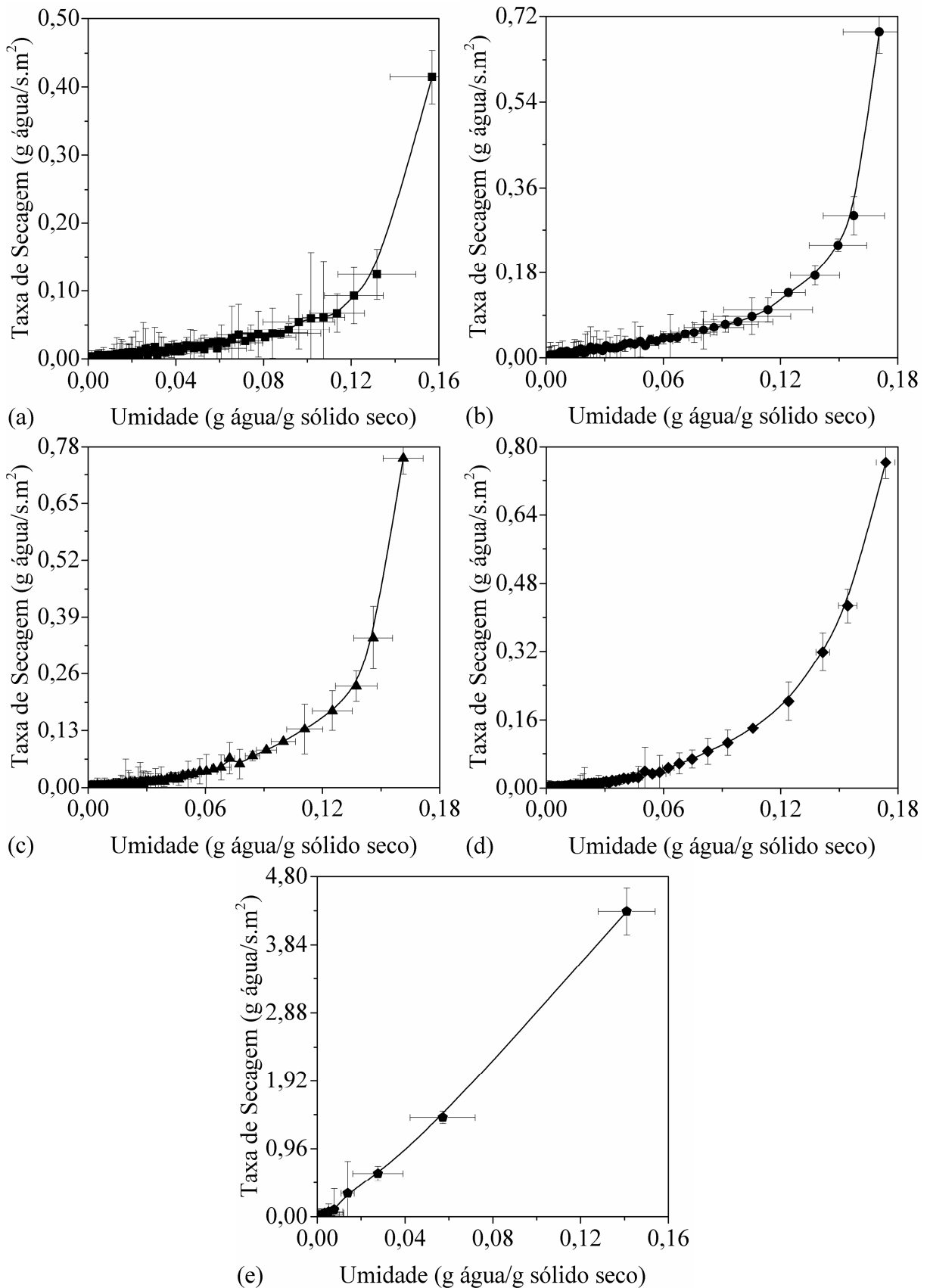
algumas diferenças significativas. Com 50 s de aquecimento os gradientes de temperatura foram maiores nos leitos com lentilha, cevada e aveia (25, 22 e 20 °C), e menores nos leitos com soja e alumina (13 e 11°C), indicando que os leitos apresentavam diferentes resistências ao transporte de calor. Além disso, com o decorrer do tempo de secagem, os gradientes foram reduzidos de formas diferentes. O gradiente de temperatura no leito de aveia, por exemplo, foi mais rapidamente reduzido do que os gradientes dos leitos de lentilha e cevada, o que está de acordo com as maiores taxas de aquecimentos observadas para aveia na Figura 22.

4.5 SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA FINA

A Figura 24 apresenta as curvas de taxa de secagem geradas no processo de secagem dos materiais particulados em leito fixo e camada fina. Nessa figura, para os materiais biológicos, no início do processo de secagem é possível observar a presença de um período fortemente inclinado de taxa de secagem decrescente, o qual é chamado de “primeiro período de taxa decrescente”. Em seguida, ocorre um segundo período, com menor inclinação, de taxa de secagem decrescente nomeado “segundo período de taxa decrescente”. Conforme Foust *et al.* (1980), no primeiro período, a velocidade difusional da umidade no interior da fase sólida é menor do que a velocidade de transferência de massa da superfície para a fase gasosa. Já no segundo período, a secagem ocorre a partir do interior do sólido, e com a diminuição contínua da umidade, o caminho de difusão aumenta até que o material atinja a umidade de equilíbrio. Destaca-se que para a alumina apenas o primeiro período de taxa decrescente foi observado. Nesse material, a água se encontra nos poros internos, sem exercer ligações químicas com sua estrutura, sendo, portanto, mais facilmente removida a uma taxa decrescente.

Nessas curvas, para todos os materiais estudados, não se observou quaisquer períodos de aquecimento inicial ou de taxa de secagem constante. A ausência do período de aquecimento inicial provavelmente se deve à dinâmica de transferência de massa ser mais lenta do que a dinâmica de aquecimento mostrada na Figura 20. Assim, o período de aquecimento, apesar de existente, não é refletido nas curvas de taxa de secagem dentro das condições de coleta de dados utilizadas nesse trabalho. Já a inexistência de períodos de taxa constante é tipicamente observada em materiais com estrutura fibrosa ou amorfa, sendo um indicativo de que as condições internas do material controlam a taxa de secagem (FOUST *et al.*, 1980). Os comportamentos observados na Figura 24 foram similares aos observados por Suherman, Priyanto e Ratnawati (2014), Tang e Sokhansanj (1993) e Felizardo (2018) para grãos de soja, lentilha e cevada.

Figura 24 – Taxas de secagem em função da umidade dos materiais; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ b.s., $UR = 13,2\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Fonte: Acervo pessoal (2019).

As curvas de taxa de secagem também mostram que os materiais apresentaram diferentes cinéticas de secagem. Tais diferenças foram quantificadas através de alguns parâmetros mostrados na Tabela 3: tempos de duração do primeiro (t_{1°) e segundo (t_{2°) períodos de taxa decrescente, taxas de secagem médias do primeiro (R_{1°) e segundo (R_{2°) períodos e umidade crítica na transição entre o primeiro e o segundo período (X_c).

Tabela 3 – Parâmetros de cinética de secagem dos materiais particulados biológicos.

Materiais	t_{1° (min)	t_{2° (min)	R_{1° (g.s ⁻¹ .m ⁻³)	R_{2° (g.s ⁻¹ .m ⁻³)	X_c (g.g ⁻¹)
Soja	40	940	0,175	0,016	0,114
Lentilha	70	630	0,208	0,015	0,092
Cevada	73	827	0,217	0,013	0,078
Aveia	80	720	0,221	0,010	0,063
Alumina	120	-	0,316	-	-

Fonte: Acervo pessoal (2019).

Observou-se um aumento de R_{1° e t_{1° e uma simultânea diminuição de t_{2° (com exceção à lentilha), R_{2° e X_c conforme a ordem: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. Tais resultados sugerem que a cinética de secagem mais rápida apresentada por alguns materiais, como aveia (800 min) e alumina (120 min), se deve a maior remoção de umidade a taxas mais elevadas durante um primeiro período mais prolongado. Para a aveia a remoção de umidade no primeiro período foi de 64,0%, enquanto que para a alumina esse remoção chegou a 100,0%. Assim, a transição entre períodos ocorre em umidades críticas mais próximas à umidade de equilíbrio, restando uma menor quantidade de umidade para ser removida no segundo período. Em contraponto, para materiais com cinética de secagem mais lenta, como a soja (980 min), o primeiro período foi mais curto, sendo grande parte da umidade, 72,4%, removida no segundo período a taxas mais baixas.

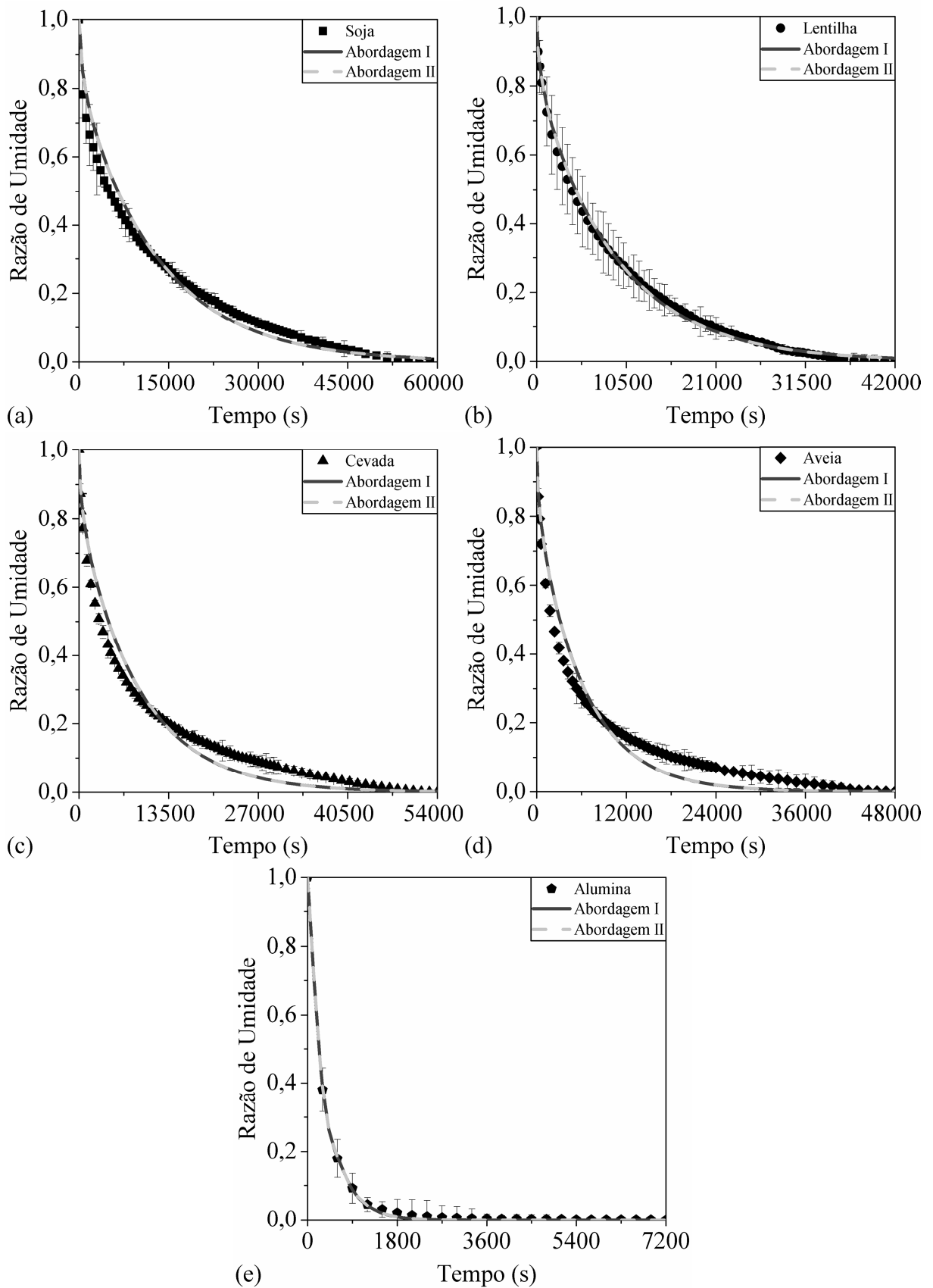
Tais diferenças nas cinéticas de secagem podem ser atribuídas à influência simultânea de diversos fatores relacionados às condições internas e externas de transferência de calor e massa. Contudo, as curvas evidenciam que os mecanismos internos de transferência de umidade controlam a taxa de secagem. Nesse caso, Panagiotou *et al.* (2004) sugerem que as variações na composição e estrutura interna dos materiais são os principais responsáveis pelas diferenças na cinética de secagem. Adamiec *et al.* (2006) ainda ressaltam que a forma de ligação da água em materiais biológicos também é um fator de relevância significativa para a cinética de secagem. A água pode ser encontrar-se na forma livre, como em grande parte das células vegetais, ou ligada, como no caso de macromoléculas de biopolímeros. Nesse segundo caso, as forças de ligação entre a água e a estrutura interna são mais intensas, tornando mais

difícil a remoção de umidade, o que contribui para redução da velocidade de secagem. Assim, as menores taxas de secagem observadas, p. ex., para a soja e lentilha, estão associadas a maior resistência à migração de umidade do interior do material para superfície, principalmente devido às interações mais fortes entre a umidade e a estrutura interna. Outro fator que corrobora para o desenvolvimento de maior resistência interna a transferência de umidade em cereais e leguminosas é a presença da casca. Segundo Felizardo (2018), a casca é uma estrutura que pode funcionar como uma barreira à transferência de massa.

As diferenças observadas nas taxas de secagem ficam bem evidenciadas nos valores de D_{eff} e números de Bi_m obtidos a partir do ajuste dos modelos descritos pelas abordagens I e II. Na Abordagem I, utilizou-se uma solução analítica do modelo difusivo que considerava apenas a difusividade interna para estimativa de D_{eff} pelo ajuste da Equação (29) aos dados cinéticos experimentais. Já na Abordagem II, utilizou-se uma solução analítica que considerava tanto a difusão interna quanto a convecção externa para estimativa de D_{eff} e Bi_m pelo ajuste da Equação (33) aos dados.

A Figura 25 apresenta as curvas experimentais de cinética de secagem dos materiais particulados (símbolos) e os dados preditos pelos modelos utilizados nas Abordagens I (linha contínua) e II (linha tracejada). Os parâmetros intrínsecos e da qualidade do ajuste dos modelos são apresentados na Tabela 4. Para todos os materiais e em ambas abordagens foram observados altos valores de R^2 ($>0,97$) e valores relativamente baixos de $REQM$, o que indica à qualidade a regressão. Contudo, observa-se que, notadamente para a cevada e a aveia, ambos os modelos superestimaram os valores de RU no início do processo, e os subestimaram no final. Tais desvios podem estar associados ao fato de que diversas condições assumidas como constantes nos modelos, na realidade variam com o conteúdo de umidade. Por exemplo, devido ao fenômeno de encolhimento das partículas biológicas discutido na seção 4.1, a espessura da camada fina (L) e as próprias dimensões das partículas são reduzidas, diminuindo o caminho de difusão da umidade do interior do material até a superfície. Além disso, sabe-se que a própria difusividade efetiva é um parâmetro dependente da umidade, como já demonstrado por diversos autores (PERAZZINI, 2014; REYES; ALVAREZ; MARQUARDT, 2002; ZOGZAS; MAROULIS, 1996), porém nas abordagens utilizadas ela foi considerada constante. Além disso, esse é um parâmetro efetivo que contabiliza diversos mecanismos simultâneos de transferência de umidade no interior do sólido, os quais contribuem de diferentes formas para a secagem. Assim, é uma simplificação representar esse conjunto complexo de mecanismos em apenas um parâmetro (PERAZZINI, 2014).

Figura 25 – Curvas de cinética de secagem dos materiais particulados; soja (a), lentilha (b), cevada (c), aveia (d) e alumina (e). $X_i = 0,24 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1} \text{ b.s.}$, $UR = 13,2\%$, $T_g = 50,0^\circ\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



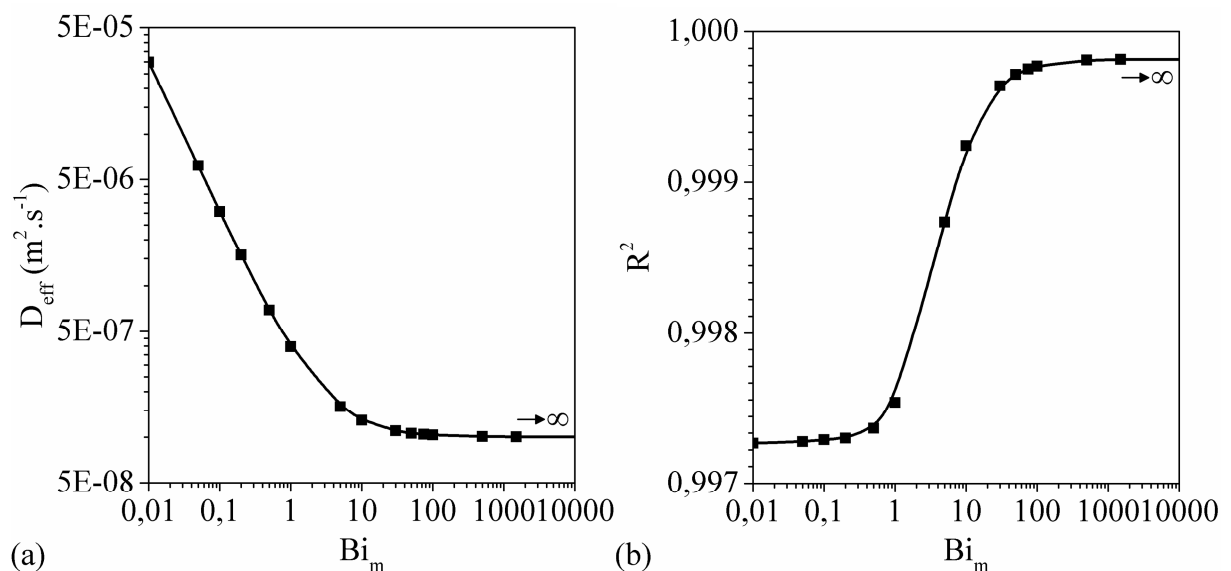
Fonte: Acervo pessoal (2019).

Tabela 4 – Parâmetros intrínsecos e de ajuste dos modelos utilizados nas Abordagens I e II.

Abordagem	Parâmetros	Soja	Lentilha	Cevada	Aveia	Alumina
I	D_{eff} (m ² /s)	3,03x10 ⁻⁹	4,34x10 ⁻⁹	4,42x10 ⁻⁹	6,32x10 ⁻⁹	1,00x10 ⁻⁷
	R^2	0,976	0,998	0,977	0,971	0,999
	$REQM$	0,055	0,020	0,069	0,072	0,005
II	D_{eff} (m ² /s)	3,03x10 ⁻⁹	4,34x10 ⁻⁹	4,42x10 ⁻⁹	6,32x10 ⁻⁹	1,00x10 ⁻⁷
	Bi_m	∞	∞	∞	∞	∞
	R^2	0,977	0,998	0,997	0,972	0,999
	$REQM$	0,031	0,012	0,040	0,045	0,005

Fonte: Acervo pessoal (2019).

Comparando-se as duas abordagens utilizadas, nota-se que ambas foram igualmente aplicáveis aos dados cinéticos, apresentando valores de D_{eff} , R^2 e $REQM$ muito próximos. Para todos os materiais, o melhor ajuste do modelo utilizado na Abordagem II foi alcançado com Bi_m tendendo ao infinito. Para ilustrar essa tendência, a Figura 26 apresenta uma resposta típica do algoritmo desenvolvido na Abordagem II, no caso para a alumina. Nessa figura, observa-se que à medida que $Bi_m \rightarrow \infty$ a D_{eff} tende a um valor estável, enquanto que o coeficiente de determinação (R^2) aumenta e tende a um valor constante.

Figura 26 – Resposta típica de D_{eff} (a) e R^2 (b) em função de Bi_m obtida na Abordagem II.

Fonte: Acervo Pessoal (2019).

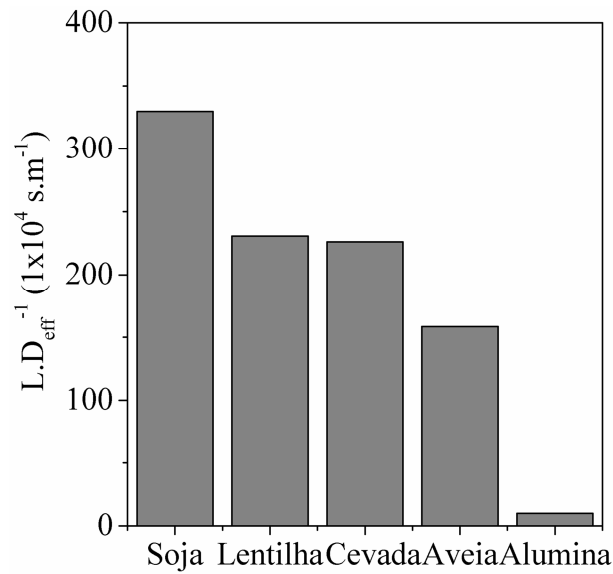
Tal resultado, em conjunto com os bons ajustes obtidos na aplicação da Abordagem I, corrobora que as condições internas de transferência controlam a cinética de secagem,

conforme observado nas curvas de taxa de secagem. Nesse caso, é de se esperar que ambos os modelos apresentem ajustes e parâmetros semelhantes, visto que os números de Bi_m estimados pelo ajuste foram maiores do que o valor limite sugerido (0,2) para a utilização da condição de contorno convectiva. Contudo, em alguns casos, a utilização dessa condição de contorno (Abordagem II) proporcionou valores de R^2 e $REQM$ levemente melhores do que àqueles obtidos utilizando uma condição que considera o equilíbrio entre as fases na superfície (Abordagem I). Tal constatação também foi obtida por Perazzini (2014), o qual indica que o modelo difusivo com condição de contorno convectiva representa melhor os fenômenos envolvidos no processo de secagem.

Comparando os valores de D_{eff} estimados pela Abordagem I entre os diferentes materiais é possível notar diferenças significativas, conforme a ordem crescente de magnitude: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. Maiores difusividades efetivas implicam em velocidades de secagem mais elevadas. Assim, como anteriormente sugerido, as diferenças observadas nas cinéticas de secagem dos materiais provavelmente estão associadas a diferentes interações entre a água e a estrutura interna do material, além dos diferentes formatos e tamanhos de partícula, que resultam em leitos com propriedades estruturais distintas. Observou-se um aumento de D_{eff} com a redução de D_m na ordem: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina (Figura 14), corroborando que o tamanho da partícula é uma variável relevante no processo. Isso porque quanto menor a distância a ser percorrida pela migração da água do interior do material até a superfície, menor a resistência a ser superada e mais rápida é a secagem (HELDMAN, DENNIS; LUND, 2006; MCLAUGHLIN; MAGEE, 1999).

De modo a se ter uma estimativa da resistência interna à transferência de umidade no leito, calculou-se a razão entre o comprimento de leito (L) e a difusividade efetiva para os diferentes materiais, a Figura 27 mostra os resultados. Observa-se que a razão L/D_{eff} diminui significativamente na seguinte ordem de magnitude: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. Além disso, observa-se que a resistência à transferência de massa em materiais particulados biológicos é notavelmente maior do que em partículas de alumina, o que está de acordo com o esperado, pois como observado anteriormente, a umidade contida na alumina não está quimicamente ligada ao material, sendo mais facilmente removida. Vale ressaltar que as variações na resistência ao transporte de umidade se devem a diversos fatores, como: características físicas das partículas, forma de ligação entre a estrutura do material e a água e propriedades *bulk* dos leitos.

Figura 27 – Valores da razão L/D_{eff} para os diferentes materiais.



Fonte: Acervo pessoal (2019).

Os valores de D_{eff} obtidos da secagem dos materiais se situaram dentro das faixas de valores reportados na literatura para: soja ($9,30 \times 10^{-11}$ - $3,05 \times 10^{-7}$ m.s^{-2}), lentilha ($2,06 \times 10^{-14}$ - $1,02 \times 10^{-8}$ m.s^{-2}), cevada ($1,31 \times 10^{-11}$ - $1,0 \times 10^{-9}$ m.s^{-2}) e alumina ($1,50 \times 10^{-8}$ - $1,9 \times 10^{-8}$ m.s^{-2}) (ALBINI, 2015; PANAGIOTOU *et al.*, 2004; PERAZZINI, 2014). Cabe aqui destacar a grande variação nos valores de D_{eff} encontrados na literatura para cada material, o que se deve à diversidade de condições operacionais, configurações de secagem e características dos materiais entre os trabalhos. Além disso, por D_{eff} ser um parâmetro efetivo, diversos mecanismos de transporte de umidade são representados por esse parâmetro, o que contribui para a sua variabilidade. Na literatura consultada não foram encontrados valores de D_{eff} reportados para a aveia.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho propôs-se estudar a secagem de materiais particulados com diferentes características morfológicas e de composição e investigar como tais características influenciam nas propriedades fluidodinâmicas do leito, perfis axiais de temperatura e cinética de secagem.

Os resultados das caracterizações físicas mostraram que os materiais particulados possuíam diferentes dimensões, densidades, formas e rugosidades. A redução do conteúdo de umidade ocasionou a diminuição das dimensões das partículas biológicas e o aumento de suas densidades, devido ao fenômeno do encolhimento, contudo a forma das partículas foi preservada. Além disso, para a soja, lentilha e cevada o aumento da umidade induziu a formação de rachaduras, aumentando a rugosidade média aritmética. Observou-se que a densidade *bulk* e a porosidade dos leitos dos materiais estudados foram relativamente semelhantes. A redução do conteúdo de umidade das partículas biológicas aumentou a densidade *bulk* e diminuiu a porosidade média dos leitos.

Quanto aos parâmetros fluidodinâmicos, observou-se que o raio hidráulico e a permeabilidade dos materiais biológicos decresceram na seguinte ordem de magnitude: soja, lentilha, cevada e aveia. Já a tortuosidade aumentou na ordem inversa a esta. O fator de resistência inercial apresentou valores semelhantes entre os materiais, com a exceção da lentilha. O conteúdo de umidade também exerceu influência significativa sobre esses parâmetros. O raio hidráulico e a permeabilidade dos leitos empacotados com materiais biológicos foram reduzidos com a diminuição da umidade, enquanto o fator inercial permaneceu quase que inalterado para a maioria dos materiais.

Os resultados obtidos em relação à queda de pressão nos leitos dos materiais mostraram que a resistência ao escoamento de ar foi maior para os leitos com menor permeabilidade e maior fator de resistência inercial. As alterações no conteúdo de umidade dos materiais resultaram em diferentes comportamentos de queda de pressão, aumentando essa com redução do conteúdo de umidade de materiais biológicos e apresentando um comportamento oposto para a alumina.

Em relação à determinação da condição de camada fina, os perfis axiais de temperatura revelaram que, para todos os materiais, a condição pôde ser satisfeita com até 3 cm de espessura. Contudo, a menor diferença de temperatura na condição estacionária foi obtida com 1 cm de leito, sendo esta a condição adotada como camada fina.

Os perfis axiais de temperatura mostraram que os materiais empacotados com

conteúdo de umidade inicial de $0,24 \text{ g.g}^{-1}$ b.s apresentaram diferentes taxas de aquecimento, em ordem decrescente: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina. Os leitos com partículas na umidade de equilíbrio apresentaram taxas de secagem semelhantes. Nessa umidade, os gradientes de temperatura foram maiores para os leitos de grãos de lentilha, cevada e aveia.

As curvas de taxa de secagem obtidas indicaram que as condições internas do material controlavam a cinética de secagem e que os materiais apresentaram diferentes taxas de secagem, em ordem crescente: soja, lentilha, cevada, aveia e alumina, a qual está de acordo com a diminuição das resistências internas à transferência de massa estimadas com base nas dimensões dos leitos. Os números de Biot mássico obtidos tenderam ao infinito, reforçando a constatação de que a resistência interna a transferência de massa controla o processo. Assim, concluiu-se que as diferenças nas cinéticas de secagem dos materiais se devem a diversos fatores, como: composição, tipos de ligação de água, e características morfológicas dos diferentes materiais.

A partir dos resultados e discussões realizadas nesse trabalho concluiu-se que foi possível avaliar a secagem de materiais particulados com diferentes características, morfológicas e de composição, e investigar como tais características influenciam os diversos aspectos envolvidos no processo de secagem. Isso possibilitou a análise comparativa sobre o processo de secagem em leito fixo para diferentes tipos de grãos, e uma melhor compreensão de como as características dos materiais influenciam nos fenômenos de transferência de momento, calor e massa envolvidos na secagem. Os resultados podem contribuir para o controle e projeto de secadores de leito fixo, bem como a otimização de secadores já existentes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os estudos conduzidos nesse trabalho revelaram a possibilidade de realização de alguns trabalhos futuros. Assim, algumas sugestões podem ser propostas:

- Realizar estudos de secagem em leito fixo e camada espessa dos materiais estudados do modo a observar a influência das características do leito no avanço da frente de secagem;
- Modelar o processo de secagem dos materiais estudados em leito fixo e camada fina considerando o encolhimento das partículas e a variação da difusividade efetiva com o conteúdo de umidade;
- Investigar as características de interação entre a água e a estrutura dos materiais por isoterma de equilíbrio.
- Desenvolver estudos sobre a secagem de partículas de um mesmo material com formatos diferentes de maneira a verificar a influência da forma do material no processo de secagem em leito fixo.

REFERÊNCIAS

- ADAMIEC, J.; KAMIN´SKI, W.; MARKOWSKI, A. S.; STRUMIŁŁO, C. Drying of Biotechnological Products. In MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Drying Technology**, Boca Raton: CRC Press, 3 ed., 2006.
- AL-YAHYA, S. A.; MOGHAZI, H. M. M. Static pressure drop through barley grain. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 16, n. 1, p. 223–239, 1998.
- ALBINI, G. **Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leito fixo**. 2015. 94 f. Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- ALVES, D. A. S. **Secagem de pimenta-do-reino preta (*Piper nigrum* L.) em secador de leito fixo**. 2015. 91 f. Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Thin-Layer Drying of Agricultural Crops**. Saint Joseph: ASABE, 2014.
- ARANA, I. **Physical Properties of Foods: Novel Measurement Techniques and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. Chichester: John Wiley & Sons, LTD, 2016.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold., p. 450, 1992.
- AKRITIDIS , C. B.; SIATRAS, A. J. Resistance of Pumpkin Seeds to Air Flow. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 6, p. 1414–1416, 1979.
- CHAKRAVERTY, A.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. RAMASWAMY, H. S. **Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices**. New York: Marcel Dekker, 2003.

CLARK, T.; JUNG, S.; LAMSAL, B. **Food processing: principles and applications**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes**. 5. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford University Press, p. 414, 1975.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Physical Properties of Soybean. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 56, n. 2, p. 89–98, 1993.

DINÇER, İ.; ZAMFIRESCU, C. **Drying Phenomena**. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441–464, 2010.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, p. 89–94, 1952.

FELIZARDO, M. P. **Caracterização física e de secagem de sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage)**. 2014. 88 f. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

FELIZARDO, M. P. **Secagem de cevada: análise da anatomia e do meio de transporte**. 2018. 148 f. Universidade Federal de São Carlos, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food and agriculture data**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Changes in Physical Properties of Corn During Drying. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 4, p. 1004–1008, 1980.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Principles of Unit Operations**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

FREIRE, F. B.; BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Study of the Drying Kinetics in Thin Layer: Fixed and Moving Bed. **Drying Technology**, v. 23, n. 7, p. 1451–1464, 2005.

FARMER, G. S.; RUSEWITZ, G. H. B.; WHITNEY, R. W. Resistance to Airflow of Bluestem Grass Seed. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 2, p. 0480–0483, 1981.

GALLAGHER, E. J. **Cereal Production: Proceedings of the Second International Summer School in Agriculture held by the Royal Dublin Society in cooperation with W K Kellogg Foundation**. London: Butterworth-Heinemann, 1984.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations. Prentice-Hall International**. Englewood cliffs: Prentice Hall International. 1993

GERMAN, R. M. **Particle Paking Characteristics**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989.

GHAREKHANI, M.; KASHANINEJAD, M.; GARMAKHANY, A. D.; RANJBARI, A. Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, v. 5, n. 3, p. 187–197, set. 2013.

GINER, S. A.; DENISIENIA, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, n. 1, p. 73–86, 1996.

GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. **Encyclopedia of Earth Sciences Series Encyclopedia of Agrophysics**. Dordrecht: Springer, 2011.

GÓRNICKI, K.; KALETA, A. Resistance of bulk grain to air flow – a review. Part II: Effect of process parameters. **Annals of Warsaw University of Life Sciences**. v. 65, p. 43–51. 2015.

HAGOORT, J. **Fundamentals of Gas Reservoir Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 1988.

HAQUE, E.; AHMED, Y. N.; DEYOE, C. W. Static Pressure Drop in a Fixed Bed of Grain as Affected by Grain Moisture Content. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 4, p. 1095–1098, 1982.

HELDMAN, D. R.; LUND, D. **Handbook of Food Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

HULASARE, R.; JAVAS, D. S.; WHITE, N. D. G.; MUIR, W. E. Thin layer drying characteristics of hullless oats at near ambient temperatures (*Avena sativa* L.). **Canadian Agricultural Engineering**, v. 41, n. 3, p. 167–173, 1999.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. John Wiley & Sons, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Agrícola**. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2017_dez.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

ISIK, E. Moisture dependent physical and mechanical properties of green lard lentil (*Lens culinaris*) grains. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 3, p. 474–480, 2007a.

ISIK, E. Some Physical and Mechanical Properties of Round Red Lentil Grains. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 4, p. 503–509, 2007b.

JEKAYINFA, S. O. Effect of Airflow Rate, Moisture Content and Pressure Drop on the Airflow Resistance of Locust Bean Seed. **Agricultural Engineering International**, v. 8, p. 1–9, 2006.

KARABABA, E.; COŞKUNER, Y. Moisture Dependent Physical Properties of Dry Sweet Corn Kernels. **International Journal of Food Properties**, v. 10, n. 3, p. 549–560, 2007.

KILKIS, B.; KAKAÇ, S. **Energy Storage Systems**. Springer Netherlands: Dordrecht. 1989.

KOBUS, Z.; GUZ, T.; NADULSKI, R. Influence of moisture and vertical pressure on air flow resistance through oat grain. **Agricultural Engineering**, v. 7, n. 132, p. 29–35, 2011.

KREMPELS, D. M. **The seed of a typical dicotyledonous plant: the bean**. Disponível em: <<http://www.bio.miami.edu/dana/docs/seeds.html>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

KROKIDA, M.; FOUNDOUKIDIS, E.; MAROULIS, Z. Drying constant: literature data compilation for foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 321–330, 2004.

KULP, K.; PONTE, J. G. **Handbook of Cereal Science and Technology Food Science and Technology**. New York: Marcel Dekker, 2000.

LIMA, R. DE A. B. **Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas planas**. 2009. 150 f. Universidade Federal de São Carlos, 2009.

MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D.; PANAGIOTOU, N. M.; KROKIDA, M. K. Moisture diffusivity data compilation for foodstuffs: Effect of material moisture content and temperature. **International Journal of Food Properties**, v. 4, n. 2, p. 225–237, 2001.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, p. 45–48, 2001.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373–386, 2004.

MCLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. The effects of air temperature, sphere diameter and puffing with CO₂ on the drying of potato spheres. **Drying Technology**, v. 17, n. 1–2, p. 119–136, 1999.

MENSAH, J.; NELSON, G.; HERUM, F. Mechanical properties related to soybean seedcoat cracking during drying. **Transactions of the ASAE**, 1984.

MOHSENIN, N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach, 1970.

MOLENDIA, M.; MONTROSS, M. D.; MCNEILL, S. G.; HORABIK, J. Airflow resistance of seeds at different bulk densities using Ergun's equation. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 3, p. 1137–1145, 2005.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

OLYMPUS. **Introduction to Surface Roughness Measurement: Roughness measurement guidebook**. Tokyo: Olympus, 2017. Disponível em: <[https://www.olympus-ims.com/downloads/detail/?0\[downloads\]\[id\]=276828414](https://www.olympus-ims.com/downloads/detail/?0[downloads][id]=276828414)>.

PANAGIOTOU, N. M.; KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D. Moisture Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs. **International Journal of Food Properties**, v. 7, n. 2, p. 273–299, 2004.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. 2014. 192 f. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 190 f. Universidade Federal de São Carlos, 2004.

RATTI, C. **Advances in Food Dehydration. Contemporary Food Engineering Series**. Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 488.

REYES, A.; ALVAREZ, P. I.; MARQUARDT, F. H. Drying of carrots in a fluidized bed. I. effects of drying conditions and modeling. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1463–1483, 2002.

SAHIN, S.; SUMNU, S. G. **Physical Properties of Foods**. New York: Springer, 2003.

SHAH, A.; MASOODI, F. A.; GANI, A.; ASHWAR, B. A. Geometrical, functional, thermal, and structural properties of oat varieties from temperate region of India. **Journal of Food Science and Technology**, v. 53, n. 4, p. 1856–1866, 2016.

SOKHANSANJ, S.; FALACINSKI, A. A.; SOSULSKI, R. W.; JAYAS, D. S.; TANG, J. Resistance of bulk lentils to airflow. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 4, p. 1281–1285, 1990.

SOLOGUBIK, C. A.; CAMPAÑONE, L. A.; PAGANO, A. M.; GELY, M. C. Effect of moisture content on some physical properties of barley. **Industrial Crops and Products**, v. 43, n. 1, p. 762–767, 2013.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications, and Design**. Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

SUHERMAN, S.; PRIYANTO, S.; RATNAWATI, R. Drying of Soybean Seeds in Fluidized Bed: Experimental and Scale-up Simulation in Continuous Operation Mode. **Advance Journal of Food Science and Technology**, v. 6, n. 3, p. 403–407, 2014.

TANG, J.; SOKHANSANJ, S. Moisture diffusivity in laird lentil seed components. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1791–1798, 1993.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Grain: World Markets and Trade**. Washington: USDA, 2017a. Disponível em:
<<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oilseeds: World Market and Trade**. Washington: USDA, 2017b. Disponível em:
<<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>.

WADELL, H. Sphericity and Roundness of Rock Particles. **The Journal of Geology**, v. 41, n. 3, p. 310–331, 1933.

YANG, W. C. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. **China Particuology**, v. 1, n. 3, p. 137, 2003.

ZARE, D.; BAKHSHIPOUR, A.; CHEN, G. Physical properties of cumin and caraway seeds. **International Agrophysics**, v. 27, n. 4, p. 491–494, 2013.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis. **Drying Technology**, v. 14, n. 7–8, p. 1543–1573, 1996.

ZOTIN, F. M. Z. **O efeito de parede em colunas de recheio**. 1985. 85 f. Universidade Federal de São Carlos, 1985.