

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Gustavo Nakamura Alves Vieira**

**Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.)  
em leito fixo e fluidizado**

**São Carlos  
2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Gustavo Nakamura Alves Vieira**

**Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.)  
em leito fixo e fluidizado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Orientação:** Prof. Dr. José Teixeira Freire  
**Co-orientação:** Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

**São Carlos  
2012**

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

V658cs

Vieira, Gustavo Nakamura Alves.

Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado / Gustavo Nakamura Alves Vieira. -- São Carlos : UFSCar, 2012.  
67 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Secagem. 2. Caracterização de grãos. 3. Linhaça. I. Título.

CDD: 660.28426 (20<sup>ª</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **GUSTAVO NAKAMURA ALVES VIEIRA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 20 DE ABRIL DE 2012.

BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
**Orientador, UFSCar**

  
Fabio Bentes Freire  
**Co-orientador, UFSCar**

  
Maria do Carmo Ferreira  
**UFSCar**

  
Rodrigo Béttega  
**UFU**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus a oportunidade e por ter me guiado pela escolha da carreira acadêmica.

Aos meus pais José e Arlene e meus irmãos Leandro, Rafael e Bruno o apoio, a compreensão e o amor incondicional.

Aos orientadores José Teixeira Freire e Fábio Bentes Freire os ensinamentos, a disponibilidade e o profissionalismo.

Aos docentes do Centro de Secagem Ana Maria da Silveira, Dermeval José Mazzini Sartori, Maria do Carmo Ferreira e Ronaldo Guimarães Corrêa as contribuições feitas ao trabalho durante os seminários e no exame de qualificação.

Ao docente Rodrigo Béttega o aceite do convite para participar da banca de defesa.

Aos técnicos Adilson Mota, Dorival Prenholato, Edilson Milaré e Oscar da Silva o auxílio nas análises necessárias para a elaboração desta dissertação, na montagem dos equipamentos e na sua representação gráfica.

Aos colegas do Centro de Secagem Aline, Ariany, Bruna, Giovana, Hugo, Luciano, Maísa, Milene, Renata e Thiago o companheirismo e amizade.

Ao CNPq o apoio financeiro.

## RESUMO

A linhaça (*Linum usitatissimum* L.) é uma planta cujos grãos apresentam alto valor nutricional, devido à presença de gordura poliinsaturada e fibras alimentares, que a tornam um alimento versátil, auxiliando no controle dos índices de LDL e glicemia do sangue, além de ser rica em antioxidantes. É um alimento que, devido à atual procura por alimentos com propriedades funcionais, tem se destacado. Apesar da crescente demanda no mercado brasileiro pelo grão, o Brasil ainda é um grande dependente do mercado externo, mas apresenta potencial para que a produção nacional se expanda, o que é um grande motivador para a pesquisa de técnicas de secagem, de modo a conservar suas propriedades no ínterim entre a colheita e o consumo. Para a modelagem da operação de secagem com base em leis de conservação, é necessário determinar algumas propriedades físicas dos grãos (dentre as quais se destacam a condutividade térmica, o calor específico, a densidade dos grãos e do leito e a difusividade mássica efetiva). Normalmente, a obtenção da relação entre estes parâmetros e a umidade dos grãos é feita através da reidratação por adição direta de água, porém esta forma não garante a uniformidade da amostra. Sendo assim, objetivou-se à proposição de uma nova metodologia para se obter a relação entre algumas propriedades físicas dos grãos com a umidade, baseada no procedimento de obtenção de isotermas de equilíbrio. Objetivou-se também a análise da secagem visando a compreensão dos fenômenos de transporte envolvidos. O equipamento utilizado para a secagem foi um secador que opera em batelada ou com alimentação contínua de grãos, em leito fixo ou fluidizado. Foi feita a análise da influência das condições de secagem (temperatura, altura de leito estático e vazão de ar) sobre a cinética de secagem. Resultados mostram a potencialidade da nova metodologia para caracterização de grãos e de outros materiais higroscópicos. Quanto à secagem, determinou-se que a espessura de camada delgada para a linhaça a 50°C está compreendida entre 3 e 5 cm, sendo que, para temperaturas superiores a 65°C, a espessura de camada delgada é igual ou superior a 5 cm. Ajustaram-se modelos cinéticos simples (Lewis, Page, Overhults e difusivo) aos dados experimentais de secagem e verificou-se que o modelo de Overhults como o mais apropriado para representar a relação da umidade dos grãos em função do tempo para todas as condições experimentais analisadas.

## ABSTRACT

Flax (*Linum usitatissimum* L.) is a plant whose seeds have a high nutritional value due to the presence of polyunsaturated fats and dietary fiber. In terms of health benefits and versatility, flaxseed provides good control of LDL and glycaemic blood levels. In addition, flaxseeds are rich in antioxidants, which prevent degenerative diseases, such as cancer. Flaxseed has featured recently in consequence of the search of foods with functional properties. Although the Brazilian market for flaxseed is growing, it is still dependent on importing, but the potential for the growth of the national production exists, which is a motivation for the research of drying techniques, in such a way that the flaxseed properties between the harvest and the consumption are kept. In order to modeling the drying, some physical properties (amongst which the thermal conductivity, thermal capacity, grain and bulk density and effective mass diffusivity) are required for the use of conservation laws. Generally the relationship of these properties and the moisture of the grains are obtained through rehydration by directly adding water to the grains. However, this procedure does not guarantee the uniformity of the sample. The aim of this study was the proposal of a new methodology to obtain the relation between some physical properties and the moisture of the grains, based on the equilibrium moisture content procedure. Another aim of this study is the analysis of the drying focusing the comprehension of the transport phenomena involved. The equipment used for the drying experiments was a dryer which can be operated either as a batch or a continuous dryer, in fixed or fluidized bed. The influence of drying parameters (air temperature, static bed height and air flow rate) over drying kinetics was analyzed. Results show that the new methodology is potentially applicable to grains and other hygroscopic material. Drying results evidenced that the thin layer thickness for flaxseed at 50°C is between 3 and 5 cm, whereas for higher temperatures (65°C and 80°C), the thickness is equal or above 5 cm. Simple kinetic models (Lewis, Page, Overhults, diffusive) were fit to drying experimental data and the Overhults' model was chosen as the most appropriate one to represent the grains moisture as a function of drying time for all the analyzed experimental conditions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuição da produção mundial de linhaça em 2009 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011). .....	3
Figura 2.2: Massa de linhaça importada pelo Brasil, em milhares de toneladas, na década 2000-2010 e o montante relacionado às importações dos grãos, em milhões de dólares (BRASIL, 2011). .....	4
Figura 2.3: Produção brasileira de grãos de linhaça nos anos de 1961 a 2009 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011). .....	4
Figura 2.4: Curva característica de um leito fluidizado. ....	10
Figura 3.1: Esquema do equipamento proposto para medição da condutividade térmica. ....	21
Figura 3.2: Esquema do equipamento utilizado para a secagem dos grãos. ....	25
Figura 4.1: Umidade calculada em função da umidade experimental para reidratação feita pelo método “tradicional” .....	28
Figura 4.2: Fotografia dos grãos de linhaça após 15 dias de reidratação pelo método “tradicional” .....	29
Figura 4.3: Condutividade térmica efetiva em função do tempo de fechamento da câmara para o experimento com a solução de LiCl. ....	29
Figura 4.4: Condutividade térmica efetiva da linhaça em função da umidade. ....	30
Figura 4.5: Umidade de equilíbrio dos grãos de linhaça em função da umidade relativa da atmosfera controlada. ....	31
Figura 4.6: Calor específico da linhaça em função da temperatura para os grãos acondicionados na presença de solução de LiCl. ....	32
Figura 4.7: Calor específico médio da linhaça em função da umidade. ....	32
Figura 4.8: Densidade do leito e dos grãos em função da umidade. ....	33
Figura 4.9: Porosidade do leito em função da umidade. ....	34
Figura 4.10: Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em batelada para o leito estático de 1 cm de altura. ....	35
Figura 4.11: Fotografia dos grãos de linhaça no leito antes da primeira fluidização em batelada. ....	36
Figura 4.12: Fotografia dos grãos de linhaça no leito após a última fluidização em batelada. ....	36



Figura 4.13: Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 1 cm de altura.	37
Figura 4.14: Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 3 cm de altura. ....	37
Figura 4.15: Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 5 cm de altura. ....	38
Figura 4.16: Umidade dos grãos de linhaça em função do tempo para o experimento de reidratação pré-secagem. ....	40
Figura 4.17: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 50°C e 1 cm, parametrizada na posição em que a amostra foi retirada. ....	41
Figura 4.18: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 50°C, parametrizada na altura de leito estático. ....	42
Figura 4.19: Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 1 cm, parametrizada no tipo de leito. ....	43
Figura 4.20: Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 3 cm, parametrizada no tipo de leito. ....	43
Figura 4.21: Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 5 cm, parametrizada no tipo de leito. ....	44
Figura 4.22: Razão de umidade em função do tempo para a secagem a 50°C em leito fluidizado, parametrizada na altura de leito estático. ....	44
Figura 4.23: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 65°C, parametrizada na altura de leito estático. ....	45
Figura 4.24: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 1 cm, parametrizada na temperatura. ....	46
Figura 4.25: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 3 cm, parametrizada na temperatura. ....	46
Figura 4.26: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 5 cm, parametrizada na temperatura. ....	47
Figura 4.27: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 1 cm, parametrizada na temperatura. ....	48
Figura 4.28: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 3 cm, parametrizada na temperatura. ....	48
Figura 4.29: Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 5 cm, parametrizada na temperatura. ....	48

Figura 4.30: Resíduo do ajuste do modelo de Lewis aos dados de secagem em leito fixo, a 50°C e 5 cm de altura de leito estático em função do tempo de secagem. ....	51
Figura 4.31: Resíduo do ajuste do modelo difusivo truncado aos dados de secagem em leito fixo, a 50°C e 5 cm de altura de leito estático em função do tempo de secagem...	53
Figura 4.32: Difusividade mássica efetiva em função da temperatura parametrizada pela altura de leito estático. ....	54

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1: Algumas informações nutricionais para a linhaça (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE).....	2
Tabela 3.1: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura (adaptado de BARROZO, 1995).....	22
Tabela 4.1: Velocidade e queda de pressão de mínima fluidização experimentais e calculadas pelas correlações. ....	39
Tabela 4.2: Constantes cinéticas dos modelos de Lewis, de Page e de Overhults ajustadas aos dados experimentais de secagem em leito fixo. ....	50
Tabela 4.3: Análise dos resíduos dos ajustes dos modelos cinéticos de secagem em leito fixo.....	51
Tabela 4.4: Parâmetros de ajuste do modelo difusivo truncado para o leito fixo.....	52
Tabela 4.5: Parâmetros do ajuste de Arrhenius para as secagens em leito fixo. ....	54
Tabela 4.6: Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados aos dados de secagem em leito fluidizado.....	56
Tabela 4.7: Análise dos resíduos dos ajustes dos modelos aos dados de secagem em leito fluidizado.....	57
Quadro 2.1: Equações de conservação de massa e energia para o modelo de secagem a duas fases para alguns secadores convectivos (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992). ....	9
Quadro 2.2: Algumas relações de umidade de equilíbrio usadas para a análise de isotermas de sorção e dessorção de grãos e oleaginosas (adaptado de JAYAS e CENKOWSKI, 2006).....	18

## NOMENCLATURA

a – área específica dos grãos	[m <sup>2</sup> ]
A, B, C – coeficientes das equações de isotermas de equilíbrio de sorção e dessorção de água (Quadro 2.2)	[*]
a <sub>HP</sub> – constante cinética do modelo de Henderson e Pabis	[-]
C <sub>G1</sub> – calor específico do gás na entrada do secador	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
C <sub>G2</sub> – calor específico do gás na saída do secador	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
C <sub>P</sub> – calor específico dos grãos	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
D <sub>ef</sub> – difusividade mássica efetiva	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
d <sub>p</sub> – diâmetro médio de partícula	[m]
f – taxa de secagem	[kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]
g – aceleração gravitacional	[m s <sup>-2</sup> ]
G <sub>G1</sub> – fluxo mássico de gás na entrada do secador	[kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
G <sub>G2</sub> – fluxo mássico do gás na saída do secador	[kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
G <sub>S</sub> – fluxo mássico de sólidos no secador	[kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
h – coeficiente de transferência de calor por convecção	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
k <sub>ef</sub> – condutividade térmica efetiva do leito	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
k <sub>HP</sub> – constante cinética do modelo de Henderson e Pabis	[s <sup>-1</sup> ]
k <sub>L</sub> – constante cinética do modelo de Lewis	[s <sup>-1</sup> ]
k <sub>O</sub> – constante cinética do modelo de Overhults	[s <sup>-1</sup> ]
k <sub>P</sub> – constante cinética do modelo de Page	[s <sup>-n<sub>P</sub></sup> ]
k <sub>s</sub> – coeficiente global de transferência de massa	[kg s <sup>-1</sup> ]
L – altura de leito estático	[m]
MR – razão de umidade	[-]
n <sub>O</sub> – constante cinética do modelo de Overhults	[-]
n <sub>P</sub> – constante cinética do modelo de Page	[-]
q – potência térmica por unidade de comprimento	[W m <sup>-1</sup> ]
r – coeficiente de correlação	[-]
r – posição radial (na sonda linear)	[m]
r – raio da partícula	[m]
R – constante dos gases ideais	[J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
RH – umidade relativa da atmosfera	[-]
T – temperatura	[°C]

t – tempo	[s]
T <sub>0</sub> – temperatura inicial (da sonda linear)	[°C]
T <sub>G</sub> – temperatura do gás	[°C]
T <sub>S</sub> – temperatura do sólido	[°C]
u – velocidade do ar	[m s <sup>-1</sup> ]
X – umidade dos grãos em base seca	[-]
X <sub>0</sub> – umidade dos grãos em base seca no instante inicial	[-]
X <sub>eq</sub> – umidade dos grãos em base seca no equilíbrio	[-]
X <sub>G</sub> – umidade do gás	[-]
z – posição axial no leito	[m]

### Adimensionais

Ar – número de Arquimedes	$\left[ \equiv \frac{\rho_G(\rho_S - \rho_G)d_p^3 g}{\mu^2} \right]$
Nu – número de Nusselt	$\left[ \equiv \frac{hL}{k} \right]$
Pr – número de Prandtl	$\left[ \equiv \frac{C_G \mu}{k} \right]$
Re – número de Reynolds	$\left[ \equiv \frac{u d_p \rho_G}{\mu} \right]$
Re <sub>mf</sub> – número de Reynolds de mínima fluidização	$\left[ \equiv \frac{u_{mf} d_p \rho_G}{\mu} \right]$

### Símbolos gregos

α – difusividade térmica	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
γ – constante de Euler-Mascheroni (≈ 0,57721)	[-]
ΔP – queda de pressão no leito	[Pa]
ε – porosidade do leito	[-]
λ – entalpia de vaporização da água	[J kg <sup>-1</sup> ]
μ – viscosidade do ar	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
ρ <sub>G</sub> – densidade do gás	[kg m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>S</sub> – densidade dos sólidos (grãos)	[kg m <sup>-3</sup> ]

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1 Aspectos gerais dos grãos de linhaça .....	2
2.2 Secagem de grãos .....	5
2.3 Fluidização .....	10
2.3.1 Caracterização fluidodinâmica de leitos fluidizados .....	10
2.3.2 Secagem em leito fluidizado .....	13
2.4 Caracterização física de alimentos .....	14
2.4.1 Condutividade térmica efetiva .....	14
2.4.2 Calor específico .....	15
2.4.3 Reidratação de grãos para determinação de propriedades físicas .....	16
2.4.4 Determinação da umidade de equilíbrio .....	16
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.1 Caracterização dos grãos .....	20
3.1.1 Método “tradicional” de reidratação .....	20
3.1.2 Condutividade térmica – “método da sonda modificado” .....	21
3.2 Reidratação como simulação da umidade pós-colheita .....	24
3.3 Secagem .....	25
3.4 Caracterização fluidodinâmica .....	27
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
4.1 Caracterização dos grãos .....	28
4.1.1 Condutividade térmica .....	28
4.1.2 Calor específico .....	31
4.1.3 Densidade real e aparente .....	33
4.2 Caracterização fluidodinâmica .....	35
4.3 Reidratação como simulação da umidade pós-colheita .....	40
4.4 Secagem .....	41
4.4.1 Secagem a 50°C .....	42
4.4.2 Secagem a 65°C .....	45

4.4.3	Influência da temperatura .....	45
4.4.4	Ajustes dos modelos de secagem em camada delgada .....	49
4.4.5	Ajuste do modelo difusivo truncado .....	52
4.4.6	Leito fluidizado .....	55
CONCLUSÕES .....		59
SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES .....		61
REFERÊNCIAS .....		63

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A linhaça (*Linum usitatissimum* L.) é uma planta nativa da região que compreende o litoral mediterrâneo da Ásia até a Índia, mas que hoje é cultivada em vários países. Ela foi uma das primeiras culturas agrícolas domesticadas pelo homem, e seu principal uso era para a obtenção de fibras para tecelagem no antigo Egito (OPLINGER *et al.*, 1997). Outros produtos derivados do cultivo de *Linum usitatissimum* L. são os grãos, utilizados tanto para consumo direto na alimentação humana e animal, quanto para a extração de óleo, com várias aplicações industriais (na indústria alimentícia, farmacêutica, de tintas, corantes, emulsificantes etc.).

Nos últimos anos, houve um grande aumento na procura por alimentos funcionais – aqueles que, se consumidos regularmente, também oferecem propriedades que atenuam o risco de algumas doenças. A linhaça é um alimento funcional cujo consumo aumentou significativamente no Brasil nos últimos cinco anos, como auxiliar em dietas de emagrecimento.

Existem vários estudos que trataram da caracterização física dos grãos de linhaça (WANG *et al.*, 2007; SELVI, PINAR e YESILOGLU, 2006; COSKUNER e KARABABA, 2007), nos quais se determinaram as dimensões dos grãos, a massa de mil grãos, a densidade real e aparente, o ângulo de repouso e o coeficiente de atrito estático para várias superfícies, em função da umidade dos grãos. Trata-se de propriedades importantes no projeto de equipamentos de transporte e estoque dos grãos. Porém, outras propriedades físicas de grãos de linhaça, como as de transferência térmica e mássica, não foram encontradas na literatura até o momento.

A análise dos fenômenos de transferência de calor e de massa na secagem de grãos permite verificar quais são os mecanismos envolvidos e, com isso, podem ser obtidos modelos empíricos ou baseados em leis de conservação de massa e energia. A partir desta análise, também podem ser determinadas quais são as melhores condições operacionais em um equipamento de escala industrial, sobretudo do ponto de vista da qualidade do produto após o processo e da economia de recursos energéticos.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi a caracterização de grãos de linhaça marrom, isto é, a obtenção de algumas propriedades físicas (calor específico, condutividade térmica efetiva, densidade dos grãos e do leito, porosidade do leito e difusividade mássica efetiva); e a secagem dos grãos em leito fixo e fluidizado sob diversas condições experimentais de altura de leito estático e de temperatura do ar.



## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará preliminarmente alguns tópicos sobre a linhaça propriamente dita, suas propriedades nutricionais e a situação do mercado mundial e brasileiro do grão. Posteriormente, abordar-se-ão tópicos sobre os modelos matemáticos de secagem, sobre leitos fluidizados e sobre a caracterização de grãos para a utilização dos modelos matemáticos apresentados.

### 2.1 Aspectos gerais dos grãos de linhaça

A linhaça é uma planta da família *Linaceae* e seu nome científico é *Linum usitatissimum* L.. Seus frutos são segmentados e contêm dois grãos em cada um dos seus cinco compartimentos (COSKUNER e KARABABA, 2007). Os grãos apresentam coloração que varia do marrom-avermelhado ao amarelo claro, sendo esta última conhecida popularmente como linhaça dourada.

Os principais produtos derivados dessa planta são as fibras do caule, usadas para tecelagem do linho, e os grãos, empregados na alimentação humana ou animal ou como matéria-prima da produção de óleo. Este, por sua vez, é um produto utilizado como alimento, emulsificante, aditivo de tintas, fármaco etc.

A Tabela 2.1 mostra algumas das informações nutricionais para a linhaça *in natura*.

**Tabela 2.1:** Algumas informações nutricionais para a linhaça (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE).

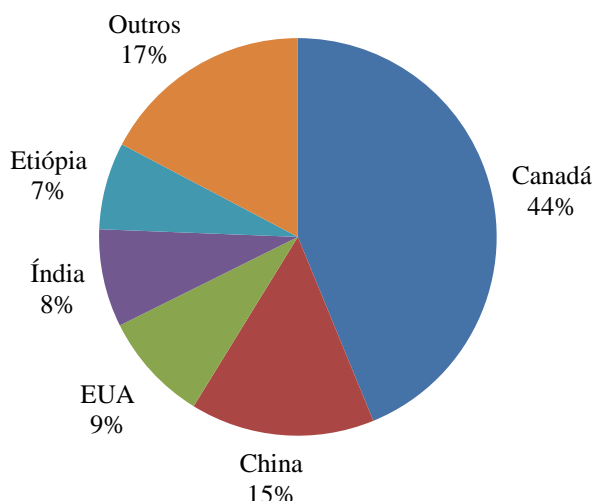
Nutriente	Valor para 50 g
Valor energético	267 kcal
Lipídios totais, dos quais:	21,08 g
Poliinsaturados	14,365 g
Fibras alimentares	13,7 g

Da Tabela 2.1, percebe-se que a linhaça é rica em lipídios, sobretudo poliinsaturados, e em fibras alimentares. Devido ao alto teor desses nutrientes, seu consumo regular está associado a um bom funcionamento gastrointestinal e à redução de índices de LDL (*low-density lipoprotein*, vulgarmente conhecido como “colesterol

ruim”) e de glicemia sanguínea pós-prandial (CUNNANE *et al.*, 1993; DAHL *et al.*, 2005), ou seja, a linhaça é um alimento que auxilia na prevenção e no tratamento de doenças cardiovasculares, como a hipercolesterolemia, a aterosclerose e o diabetes. Além disso, a linhaça é a melhor fonte conhecida de lignanas vegetais, que são substâncias com potente atividade antioxidante (PÉTIT, 2009).

Por questões culturais ou econômicas, a linhaça não é incorporada à alimentação humana em alguns países. Porém, é comum a inclusão da linhaça na alimentação animal, sendo possível notar as propriedades nutricionais da linhaça no leite bovino (CAVALIERI *et al.*, 2009; PÉTIT, 2009) ou em ovos (PITA *et al.*, 2004).

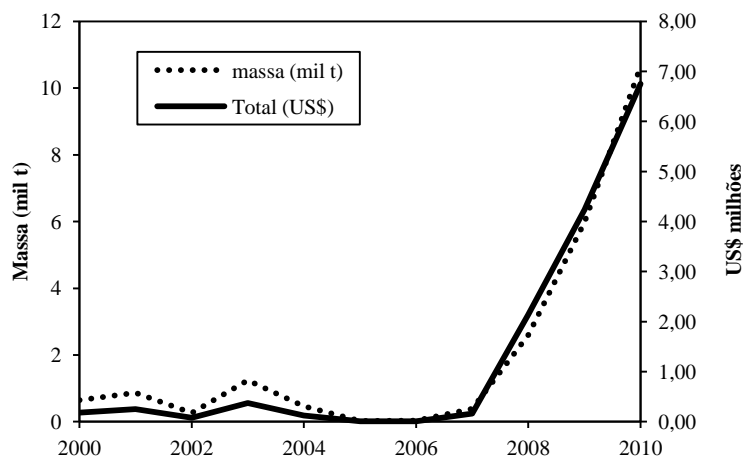
A produção mundial de linhaça em 2009 foi de aproximadamente 2,1 milhões de toneladas (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011), distribuídas conforme mostra a Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Distribuição da produção mundial de linhaça em 2009 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011).

O atual maior produtor é o Canadá, com 930 mil toneladas. Quanto ao Brasil, não há uma grande produção do grão – sua produção em 2009 foi de 9,8 mil toneladas, o que o situa no 16º lugar em produção naquele ano (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011). De fato, a produção brasileira é insuficiente para atender o mercado interno; dependendo, pois, de importações.

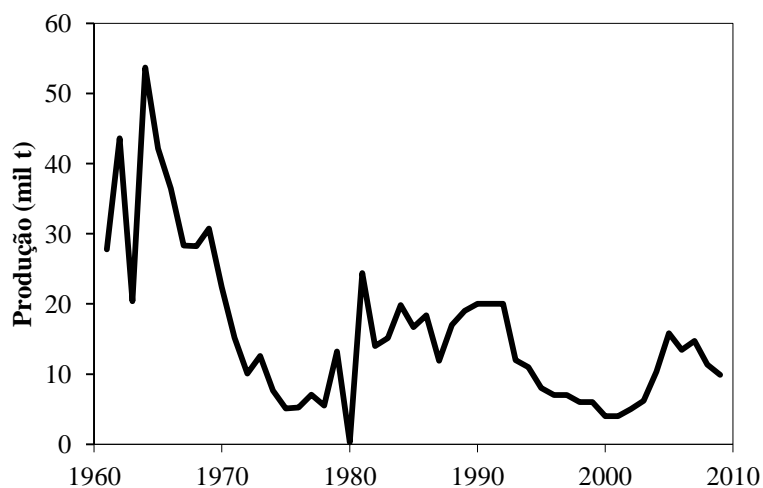
A Figura 2.2 mostra a massa de linhaça importada pelo Brasil na década de 2000-2010 e o montante relacionado às importações no mesmo período.



**Figura 2.2:** Massa de linhaça importada pelo Brasil, em milhares de toneladas, na década 2000-2010 e o montante relacionado às importações dos grãos, em milhões de dólares (BRASIL, 2011).

Nota-se, pela Figura 2.2, que houve um aumento significativo das importações de linhaça pelo Brasil a partir de 2007, o que mostra o rápido aumento da demanda interna. Os principais exportadores de linhaça para o Brasil são a Argentina e o Canadá. (BRASIL, 2011).

A Figura 2.3 mostra a produção de grãos de linhaça no Brasil desde 1961 até o ano de 2009.



**Figura 2.3:** Produção brasileira de grãos de linhaça nos anos de 1961 a 2009 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2011).

Nota-se pela Figura 2.3 que, na primeira metade da década de 60, o Brasil apresentava uma produção considerável de linhaça. Entretanto, a partir da segunda metade da mesma década, houve uma queda brusca da produção. Possivelmente, esse

fato deve ser decorrente da forte tendência à monocultura extensiva e exportadora (*plantation*) da agricultura brasileira. A partir do ano 2000, há uma fraca tendência de aumento da produção total de grãos, mas o Brasil ainda é dependente de importações, conforme já mostrado na Figura 2.2.

Portanto, existe teoricamente um potencial para que o Brasil produza linhaça suficiente para atender sua demanda interna, já que a massa importada de linhaça pelo Brasil atualmente é inferior ao pico de produção da década de 60. Porém, um aumento da produção deve estar acompanhado de melhorias das técnicas de tratamento pós-colheita. O mais comum deles é a secagem, que é a motivação deste trabalho.

## 2.2 Secagem de grãos

A finalidade da secagem dos grãos é a redução da atividade da água no material, para que haja menos perdas de produto por contaminação microbiológica. Com isso, os produtos têm maior durabilidade após a colheita e menores tendências à sazonalidade.

Há, basicamente, dois tipos de secagem: a natural e a artificial. A natural consiste na exposição do material à radiação solar. É um processo relativamente simples, mas que demanda grandes áreas e maior mão-de-obra, além de expor o material às intempéries (aumento de umidade do ar, contaminação por microorganismos, precipitações pluviométricas etc.), podendo ocasionar grandes perdas. Já a artificial envolve equipamentos (secadores), exigindo, pois maior investimento tecnológico, mas garante maior uniformidade ao produto final e emprega menos mão-de-obra e menos área para a realização da secagem.

Para fins de modelagem, a secagem de grãos é um fenômeno de transferência de calor e massa entre uma fase sólida e uma fluida. Por se tratar de uma transferência simultânea de calor e de massa, vários modelos matemáticos já foram desenvolvidos para prever o comportamento de diferentes materiais durante a secagem.

Quando a camada de material a ser seco em leito fixo não apresenta gradientes significativos de temperatura e umidade em relação à posição, diz-se que a secagem ocorre em camada delgada. Experimentalmente, diz-se que a secagem ocorre em camada delgada quando a diferença de temperatura do ar entre a entrada do leito e o topo é tão pequena quanto o erro experimental. Outra forma de analisar se a secagem ocorre em camada delgada é analisar a cinética de secagem, isto é, se leitos de

diferentes alturas apresentarem cinéticas semelhantes, é um indício de que a secagem ocorre em camada delgada.

Um dos modelos de secagem baseados em equações diferenciais considera que todos os mecanismos de transferência de massa podem ser representados por um fenômeno difusivo *efetivo*. A partir da consideração da difusão efetiva, o fenômeno pode então ser modelado através da “segunda lei de Fick”, resultando em uma equação diferencial parcial cujos contornos são a umidade inicial (considerada uniforme), simetria para o centro da esfera e equilíbrio termodinâmico “instantâneo” na superfície. Deste modo, a umidade na superfície é considerada constante no tempo. Além disso, outra consideração feita por vários autores (DADALI, KILIÇ e ÖZBEK, 2007; FREIRE *et al.*, 2005; MOREIRA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2012) é que a difusividade mássica efetiva não depende da umidade dos grãos. Com isso, a solução analítica resultante para a umidade média em uma esfera é (CRANK, 1975):

$$MR = \frac{X-X_0}{X_0-X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp \left[ - \left( \frac{i\pi}{r} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (1)$$

Para o uso prático dessa solução em série, ela é truncada até que se atinja uma precisão satisfatória. Com isso, o ajuste de um somatório de exponenciais a dados experimentais de secagem permite determinar o valor da difusividade mássica efetiva.

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), a diferença entre a solução analítica completa e a truncada no primeiro termo é menor que 5% se o adimensional  $D_{ef}\pi^2 t/r^2$  for maior que 1,2. O truncamento da série em termos de ordem superior aprimora o ajuste aos dados experimentais, a custo de tempo computacional. Porém, por mais termos que se utilizem na solução truncada, o valor da razão de umidade no tempo inicial nunca será rigorosamente unitário; sendo, pois, uma das fontes de erro de ajuste.

A dependência da difusividade mássica efetiva com a temperatura normalmente é representada com uma equação do tipo Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp \left[ - \frac{E_a}{RT} \right] \quad (2)$$

O ajuste do tipo Arrhenius para relacionar a dependência da difusividade mássica efetiva com a temperatura é uma ferramenta puramente matemática, já que o conceito de energia de ativação utilizado para a cinética de reações químicas não tem sentido físico para a cinética de secagem.

Freire *et al.* (2005) realizaram experimentos de secagem de soja em leito fixo em camada delgada e em leito deslizante de escoamento cruzado. Verificou-se que a velocidade do ar não exerceu influência significativa na taxa de secagem e, por isso, considerou-se que a resistência externa à transferência de massa foi desprezível. Com isso, a umidade das sementes foi representada pelo modelo difusivo com a série truncada em 50 termos. A difusividade mássica efetiva após o ajuste aos dados de secagem em leito deslizante foi entre 24 e 44% superior aos dados em leito fixo. Essa diferença entre os dados experimentais mostra que a interpretação física do modelo difusivo efetivo deve ser feita com cautela, pois este modelo é uma representação matemática da secagem, simplificando-a a um mecanismo efetivo; não correspondendo, pois, à difusão da água no grão isoladamente.

Baseados na pequena diferença entre a solução do modelo difusivo truncado no primeiro termo e a solução com toda a série, Henderson e Pabis (1961) propuseram um modelo exponencial simples com dois parâmetros. A equação obtida a partir dessa simplificação é:

$$MR = a_{HP} \exp[-k_{HP}t] \quad (3)$$

A principal falha do modelo de Henderson e Pabis (1961) é, assim como no modelo difusivo truncado de Crank (1975), o fato de a razão de umidade no tempo inicial não ser unitária, exceto se o parâmetro  $a_{HP}$  for fixado como sendo também unitário. Consequentemente, o modelo pode não se ajustar satisfatoriamente aos dados experimentais principalmente no início da secagem.

Outro modelo que aproxima a razão de umidade com o tempo por uma função exponencial simples é o modelo de Lewis, que considera que a taxa de secagem (variação da umidade com o tempo) é proporcional à diferença entre a umidade do material em dado instante e a umidade de equilíbrio. O modelo de Lewis também é conhecido como modelo de Newton, por ser análogo à “lei de resfriamento”, que define o coeficiente de transferência de calor por convecção. A solução analítica desse modelo é:

$$MR = e^{-k_L t} \quad (4)$$

Baseados no modelo de Lewis, outros autores propuseram modificações para um melhor ajuste, apesar de os parâmetros perderem significado físico. Alguns dos modelos

citados (de Lewis, de Henderson e Pabis, entre outros) foram ajustados por Pardeshi, Arora e Borker (2009) a dados experimentais de secagem de ervilha em camada delgada. Os autores citam 15 modelos de cinética de secagem, dentre os quais também se destacam o modelo de Page e o de Overhults (ou Page modificado), mostrados respectivamente nas equações:

$$MR = e^{-k_P t^{n_P}} \quad (5)$$

$$MR = e^{-(k_O t)^{n_O}} \quad (6)$$

Carlesso *et al.* (2007) ajustaram modelos de secagem em camada fina a dados experimentais para sementes de maracujá amarelo, dentre os quais o modelo de Lewis, de Page e o de Henderson e Pabis (1961), entre outros. Os autores escolheram um modelo exponencial a dois termos e quatro parâmetros como sendo o mais adequado para representar a cinética de secagem.

Modelos empíricos ou semi-empíricos como os de Lewis, de Page, de Overhults e de Henderson e Pabis (1961) são equações simples que descrevem a dependência da razão de umidade com o tempo para a secagem em camada delgada. Porém, há casos em que se observa experimentalmente um perfil de umidade e temperatura ao longo do leito, ou seja, existem casos em que a diferença de temperatura e umidade do ar entre a base e o topo do leito é suficiente alta para que invalide a hipótese de secagem em camada delgada. Tendo isso em vista, Massarani e Silva Telles (1992) desenvolveram um modelo para a secagem baseado nas equações de conservação de energia e massa. Para cada posição do volume de controle analisado, considera-se a existência de duas fases: uma sólida, composta pelo material seco e água líquida; e uma gasosa, composta pelo ar de secagem e vapor de água. O modelo resultante é um sistema de equações diferenciais parciais, que pode ser empregado para vários tipos de secadores.

O Quadro 2.1 mostra as equações resultantes dessa modelagem para o secador de leito fixo e fluidizado.

**Quadro 2.1:** Equações de conservação de massa e energia para o modelo de secagem a duas fases para leitos fixos ou fluidizados (MASSARANI e SILVA TELLES, 1992).

Fase	Conservação de massa	Conservação de energia
Gasosa	$\varepsilon \rho_{G1} \frac{\partial X_G}{\partial t} + G_{G1} \frac{\partial X_G}{\partial z} = f$ (7)	$\varepsilon C_{G1} \rho_G \frac{\partial T_G}{\partial t} + C_{G2} G_{G1} \frac{\partial T_G}{\partial z} = -ha(T_G - T_S) - C_{G2}(T_G - T_S)f$ (8)
Sólida	$(1 - \varepsilon) \rho_S \frac{\partial X}{\partial t} = -f$ (9)	$(1 - \varepsilon) C_P \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} = -ha(T_G - T_S) - \lambda f$ (10)

Nas Equações 7 a 10, o termo  $f$  representa a taxa de secagem:

$$f = k_s a (X_G - X_S) \quad (11)$$

O parâmetro de transferência de massa  $k_s a$  pode ser obtido pela analogia de Lewis, que relaciona a transferência de massa com a de calor:

$$k_s a = \frac{h}{c_{G1}} \quad (12)$$

O coeficiente convectivo de transferência de calor  $h$  pode ser obtido por correlações adimensionais do número de Nusselt em função do número de Reynolds e Prandtl. Por exemplo, para leitos deslizantes em escoamentos concorrentes, contracorrentes ou cruzados, tem-se (SARTORI, 1986):

$$Nu = 1,20 Re^{0,60} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Trata-se de um modelo com maior complexidade que os modelos empíricos e semi-empíricos. Para o uso deste modelo, é necessária a caracterização do material e do ar de secagem, isto é, a densidade real, a porosidade do leito, o calor específico da fase sólida e as propriedades físicas do ar são parâmetros requeridos para a obtenção de equações que descrevam a umidade em função do tempo. Apesar desta complexidade, é um modelo que, por ser baseado em leis de conservação, é menos suscetível a erros de extrapolação, ou seja, dados experimentais em equipamentos de escala de laboratório são representativos do fenômeno em equipamentos industriais.

Barrozo (1995) comparou resultados experimentais de secagem de sementes de soja em leito deslizante de correntes paralelas com os dados simulados do modelo de



secagem a duas fases. Os desvios entre a simulação e os dados experimentais foram da ordem da incerteza da medida experimental, ou seja, o modelo utilizado apresentou bom ajuste aos dados experimentais.

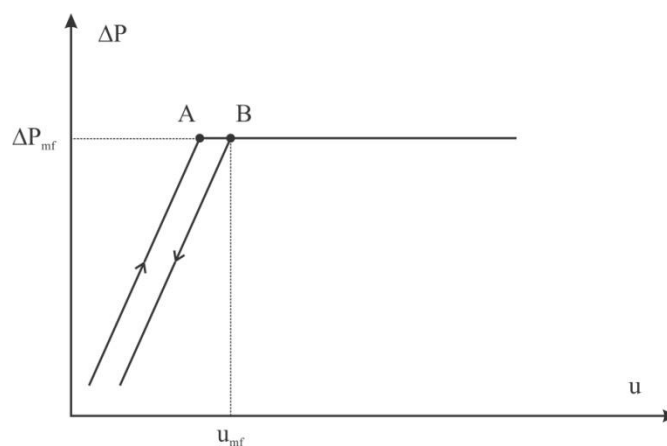
Rizzi Jr. (2008) ajustou o modelo de secagem a duas e três fases a dados experimentais de secagem de sementes de gramíneas da espécie *Brachiaria brizantha*. Verificou-se que o modelo mais complexo (a três fases), apesar de representar melhor o fenômeno ao se considerar a formação de bolhas no leito e as transferências de calor e massa entre as fases bolha, gás intersticial e sólida, não ofereceu melhores ajustes do que o modelo mais simples, a duas fases.

## 2.3 Fluidização

A fluidização é uma operação unitária que converte um leito de partículas em uma massa suspensa que apresenta várias propriedades de um líquido, sobretudo no que diz respeito à escoabilidade. Trata-se de uma técnica amplamente empregada na indústria em processos catalíticos, calcinação de minérios, secagem, dentre outros (PELL e DUNSON, 1999), devido à intensa mistura dos sólidos, o que gera elevadas taxas de transferência de calor e de massa.

### 2.3.1 Caracterização fluidodinâmica de leitos fluidizados

A caracterização fluidodinâmica de um leito fluidizado é feita através de dados de queda de pressão em função da velocidade do fluido, conforme mostra a Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Curva característica de um leito fluidizado.

Para pequenas velocidades, a queda de pressão é crescente com a velocidade do fluido. A partir de certa velocidade, as partículas apresentam movimento desordenado em relação umas às outras, correspondendo ao ponto A na Figura 2.4. A partir de vazões superiores à vazão correspondente ao ponto A, diz-se que o regime de escoamento é de fluidização. Havendo um aumento da velocidade do fluido, todo o leito apresenta uma fácil deformação e uma pequena resistência ao escoamento do fluido e, conseqüentemente, uma variação desprezível da queda de pressão com o aumento da velocidade do fluido (KUNII e LEVENSPIEL, 1969), conforme pode ser visto na Figura 2.4.

A partir de um regime estável de fluidização, caso haja uma diminuição da velocidade do ar, a fluidização se torna incipiente, podendo haver o término da fluidização (ponto B da Figura 2.4). Essa condição é denominada mínima fluidização. As condições de mínima fluidização são determinadas experimentalmente com dados de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar, sendo correspondente ao ponto em que a queda de pressão passa a apresentar dependência com a velocidade do ar para uma “desfluidização”, ou seja, partindo de um regime estável de fluidização para um leito fixo.

A queda de pressão de mínima fluidização pode ser estimada de duas formas: a primeira delas considera que, na mínima fluidização, há um equilíbrio entre o peso aparente da partícula (empuxo) e a perda de carga do fluido, resultando em:

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L} = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_G)g \quad (14)$$

A segunda forma é a partir da equação de Ergun, que é baseada no escoamento em meios porosos. Considerando que, na mínima fluidização, o leito é fixo, pode-se calcular a queda de pressão:

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2 u_{mf}}{\varepsilon^3 d_p^2 \varphi^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon)\rho_G u_{mf}^2}{\varepsilon^3 d_p \varphi} \quad (15)$$

Neste caso, é necessário determinar a velocidade de mínima fluidização. Ela pode ser feita experimentalmente ou por correlações.

Quando as Equações 14 e 15 são combinadas e rearranjadas, obtém-se (LUCAS *et al.*, 1986):

$$Re_{mf} = \sqrt{\left(42,857 \frac{C_1}{C_2}\right)^2 + \frac{Ar}{1,75C_1}} - 42,857 \frac{C_1}{C_2} \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{1}{\varphi^3 \varepsilon_{mf}} \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varphi^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (18)$$

Devido à dificuldade de se medir a porosidade do leito na mínima fluidização, as equações comuns para o cálculo da velocidade de mínima fluidização são resultantes de ajustes a dados experimentais para a determinação das constantes  $C_1$  e  $C_2$ , sem a caracterização da partícula ou do leito. Por exemplo, uma das mais usadas é a correlação de Wen e Yu (1966):

$$Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408Ar} - 33,7 \quad (19)$$

Normalmente, tais equações são utilizadas para partículas aproximadamente esféricas. Porém, é comum que aplicações técnicas de leitos fluidizados empreguem partículas não-esféricas. Exemplos dessas partículas utilizadas na secagem são folhas (de chá, de condimentos, de plantas medicinais etc.) e grãos alongados, como o arroz e a linhaça. Lucas *et al.* (1986) verificaram que as equações mais comuns para o cálculo da velocidade de mínima fluidização apresentam desvios em relação ao valor experimental devido à não-consideração da forma da partícula. Os autores então propuseram três correlações também baseadas na equação de Ergun, sendo uma para cada faixa de esfericidade das partículas. No caso da linhaça, cuja esfericidade é próxima a 0,50 (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1992; WANG *et al.*, 2007), a correlação de Lucas *et al.* (1986) adequada é:

$$Re_{mf} = \sqrt{32,1^2 + 0,0571Ar} - 32,1 \quad (20)$$

Ambas as correlações foram testadas por Lima (2009) para a fluidização de partículas de baixa esfericidade, como folhas e grãos alongados (aveia em flocos, sementes de girassol e de abóbora). Ainda que a correlação de Wen e Yu (1966) tenha apresentado os menores desvios de velocidade de mínima fluidização em relação aos

dados experimentais, erros relativos de ordem de 100% foram observados para algumas partículas.

### 2.3.2 Secagem em leito fluidizado

A secagem em leito fluidizado é uma operação que tem sido amplamente estudada, tanto para pastas quanto para sólidos. O emprego do leito fluidizado na secagem de sólidos é uma alternativa ao leito fixo, por promover maiores taxas de transferência de calor e massa e, conseqüentemente, reduz o tempo necessário à operação. A intensa agitação da fase sólida faz com que o leito opere como um tanque perfeitamente agitado na maioria dos casos. Porém, dependendo da qualidade da distribuição do ar e do tipo de partícula, pode ocorrer a formação de “zonas mortas” e fluidização de má qualidade, e conseqüente não-uniformidade do produto (LAW e MUJUMDAR, 2006).

A temperatura do fluido de secagem para materiais biológicos é dependente do uso do material após o processo e da sensibilidade do material à temperatura. Encontram-se na literatura pesquisas em que materiais biológicos foram secos em leito fluidizado a temperatura próxima à ambiente, para materiais termosensíveis, como sementes (CORRÊA, ARRIECHE e SARTORI, 2011; DREW, 1987; FUMAGALLI, 2007), ou mesmo a cerca de 200°C, para arroz com casca (INPRASIT e NOOMHORM, 2001).

Por um lado, o uso de altas temperaturas reduz o tempo de secagem, por aumentar a taxa de transferência de calor. Por outro, pode contribuir para a formação de altos gradientes de umidade no interior dos grãos, gerando estresse e diminuindo a resistência mecânica dos grãos. Uma solução para este problema é a utilizada por Tuyen *et al.* (2009) para a secagem de arroz em leito fluidizado a altas temperaturas: os autores verificaram que interrupções da operação de secagem para o equilíbrio da umidade nos grãos com posterior secagem em temperaturas inferiores auxiliaram na redução da formação de rachaduras, melhorando a resistência mecânica dos grãos após a secagem.

Valente *et al.* (2009) analisaram a secagem de linhaça em leito fluidizado em batelada, verificando a influência de variáveis como o tempo de secagem, a velocidade do ar e a temperatura do ar sobre a umidade final dos grãos, o índice de acidez do óleo extraído em Soxlet e o rendimento da extração, através de modelos estatísticos. Os

resultados mostram que a única variável que se mostrou estatisticamente significativa sobre a umidade dos grãos após a secagem no intervalo analisado foi a temperatura. Além disso, verificou-se que a temperatura não influenciou significativamente o rendimento de extração de óleo e o índice de acidez no intervalo analisado (24,8°C a 75,2°C), o que mostra que a linhaça é relativamente resistente à temperatura.

## 2.4 Caracterização física de alimentos

Visto que as etapas de tratamento de vários produtos alimentícios são basicamente operações que envolvem fenômenos de transporte, é necessária a caracterização física destes produtos, de modo que se possam verificar modelos que descrevam a operação.

### 2.4.1 Condutividade térmica efetiva

O termo “condutividade térmica *efetiva*” é utilizado para meios porosos para a caracterização da “resistência” do leito à transferência de calor. O conceito é análogo ao da difusividade mássica efetiva, mostrado na seção 2.2: simplificam-se os vários mecanismos de transferência de calor envolvidos (condução de calor no interior dos grãos e entre os grãos, convecção natural da fase fluida que percola as partículas etc.) a um único mecanismo condutivo *efetivo* que os representa.

Para alimentos, um dos métodos consagrados na literatura (KUROZAWA *et al.*, 2008; PEREIRA, 2010; PIETROBON, 1988; RIBEIRO *et al.*, 2007; SINGH e GOSWAMI, 2000) para a determinação dessa propriedade é o método da sonda linear. O equipamento consiste de um cilindro longo em cujo eixo há uma fonte contínua de calor a baixa potência. Próximo a essa fonte, há um ponto de medição de temperatura. Mede-se, então, a temperatura nas proximidades da fonte de calor em função do tempo.

O fenômeno pode ser modelado fisicamente como uma transferência de calor em um cilindro infinito com geração de calor a uma taxa constante no eixo de simetria. O cilindro é considerado infinito na direção axial devido à relação entre o comprimento e o diâmetro, fazendo com que a transferência axial de calor seja desprezível em relação à radial; e considerado infinito no raio devido ao fato de a fonte de calor no centro ser de baixa potência, fazendo com que a perda de calor pela superfície lateral do cilindro seja

desprezível. Portanto, o modelo resultante é uma equação diferencial parcial proveniente da “lei de Fourier” com duas condições de contorno e uma condição inicial: temperatura inicial conhecida ( $T_0$ ), fluxo de calor constante no eixo de simetria do cilindro ( $q$ ) e temperatura constante  $T_0$  para o raio tendendo a infinito.

Com essas considerações, obtém-se a seguinte solução analítica (PIETROBON, 1988):

$$T - T_0 = -\frac{q}{2\pi k_{ef}} \left[ \gamma + \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i(i!)} \left(\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}\right)^{2i} \right] \quad (21)$$

Para tempos longos, a série tende a zero. Em consequência disso, para o tratamento dos dados experimentais, a solução é truncada até o logaritmo natural, desprezando-se a série. A partir do coeficiente angular da reta de ajuste aos dados de temperatura em função do logaritmo do tempo, para tempos “longos”, obtém-se a condutividade térmica efetiva:

$$\frac{\partial T}{\partial \ln(t)} \cong \frac{q}{4\pi k_{ef}} \quad (22)$$

## 2.4.2 Calor específico

O calor específico é a variável que relaciona a variação de entalpia de um sistema com a variação de temperatura em um processo isobárico (SMITH, VAN NESS e ABBOTT, 2007). As metodologias que se destacam para a obtenção dessa propriedade são a calorimetria convencional, também conhecido por método das misturas, e a calorimetria de varredura diferencial (DSC, do inglês *differential scanning calorimetry*).

O método das misturas consiste em verificar a temperatura de equilíbrio de um meio de capacidade calorífica conhecida (normalmente, um líquido em um sistema considerado adiabático) após a adição do material a ser analisado ao sistema. Devido ao caráter estático dessa análise, não é possível obter a relação do calor específico com a temperatura. Além disso, é comum que o líquido utilizado seja a água, portanto, o material pode sofrer reidratação, interferindo na análise. Apesar disso, é um método bastante utilizado (AVIARA e HAQUE, 2001; RIBEIRO *et al.*, 2007) devido à sua simplicidade.

A calorimetria de varredura diferencial, por outro lado, é uma análise mais sofisticada, em que o material analisado é submetido a variações controladas e pequenas (“diferenciais”) de temperatura. Deste modo, a partir da taxa de transferência de calor à amostra e da variação da temperatura, pode ser obtido o calor específico, dentre outros parâmetros importantes. Devido ao caráter dinâmico da DSC, é possível obter a relação do calor específico com a temperatura. Devido ao detalhamento e ao número de informações que se podem obter a partir de uma análise de DSC, também é um método bastante empregado (SINGH e GOSWAMI, 2000; MARQUES, 2008).

### **2.4.3 Reidratação de grãos para determinação de propriedades físicas**

Para obter a relação das propriedades físicas de grãos com a umidade, existe um método que consiste na adição de água e conservação dos grãos em geladeira, de modo a uniformizar a umidade nos grãos. Após esse período, realizam-se experimentos necessários para a caracterização (COSKUNER e KARABABA, 2007; SELVI, PINAR e YESILOGLU, 2006; SINGH e GOSWAMI, 2000; WANG *et al.*, 2007). A principal vantagem desse método é a simplicidade do procedimento e a possibilidade de o experimentador controlar a umidade das amostras a serem analisadas, já que a umidade da amostra pode ser calculada previamente por balanços de massa.

Caso a umidade inicial da amostra seja suficientemente alta, ela pode ser seca em vez de reidratada para a mesma finalidade (PRADO, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2007). Entretanto, a umidade não é controlada diretamente pelo experimentador, já que dependerá do material e das condições da secagem.

Outra forma já utilizada para se fixar a umidade do sólido, apesar de não ser um valor determinado pelo experimentador, é através da determinação da umidade de equilíbrio.

### **2.4.4 Determinação da umidade de equilíbrio**

A umidade de equilíbrio é uma propriedade essencial no projeto de equipamentos de secagem e estoque de diversos materiais, por estar intimamente relacionada à qualidade do produto após a secagem. Além disso, ela determina a

umidade mínima que um produto pode atingir durante a secagem, conhecida a temperatura e a umidade relativa do ar.

Existem basicamente duas formas de se obter a relação entre a umidade de equilíbrio do material com a temperatura e a umidade relativa do ar. Uma delas é chamada de método dinâmico: ar a temperatura constante escoava sobre uma amostra do material a ser analisado em um sistema fechado, realizando-se medições da umidade do ar até que se atinja um valor constante. Após esse período, a umidade do sólido é medida. Com isso, obtém-se a relação entre a umidade do material com a umidade do ar a uma dada temperatura.

A principal vantagem do método dinâmico é a rapidez do resultado: uma vez que o ar aprisionado no sistema escoava sobre o sólido, há uma menor resistência convectiva, acelerando a transferência de massa. Porém, normalmente, a amostra do material é grande o suficiente para que haja variação da umidade do ar ao longo do experimento. Devido a essa grande quantidade necessária para a obtenção da umidade de equilíbrio, o método dinâmico pode ser inviável para alguns materiais.

A segunda forma para se obter a relação de isoterma de equilíbrio de um material é chamada de método estático: uma amostra do material é colocada em um recipiente fechado hermeticamente, em uma atmosfera de umidade relativa conhecida. Geralmente, utilizam-se soluções salinas saturadas ou soluções concentradas de ácido sulfúrico para o controle da umidade do ar. Mede-se a massa da amostra periodicamente, até que se obtenha massa constante. Posteriormente, analisa-se o material quanto à umidade, obtendo-se a relação entre a umidade do material (medida) e do ar (conhecida, de acordo com a solução utilizada), a uma dada temperatura.

O método estático é vantajoso em relação ao dinâmico no que diz respeito à quantidade de material necessário para a análise, que pode ser reduzida a alguns gramas. Conseqüentemente, há uma maior garantia da uniformidade da umidade na amostra. Porém, é uma análise demorada, o que pode ser limitante para alguns materiais em contato com ar com alta umidade relativa, sob o risco de proliferação de microorganismos.

Para a maioria dos materiais biológicos, a umidade de equilíbrio pode apresentar valores diferentes dependendo se o grão aumentou sua umidade (adsorção) ou diminuiu (dessorção), mesmo que a temperatura e a umidade relativa do ar sejam iguais nos dois casos. Este fenômeno é denominado histerese. Kaminski e Kudra (2000) afirmam que a histerese apresenta importantes implicações teóricas, como a irreversibilidade da sorção



de água por materiais biológicos – já que, por definição, um processo é reversível quando a mesma condição de equilíbrio pode ser atingida para pequenas variações nas condições externas (SMITH, VAN NESS e ABBOTT, 2007). Outra implicação teórica importante é o cuidado ao se proporem equações que descrevam a umidade de equilíbrio, em que se deve considerar a irreversibilidade do processo.

Alguns modelos que relacionam a umidade de equilíbrio com a temperatura e a umidade relativa do ar são mostrados no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2:** Algumas relações de umidade de equilíbrio usadas para a análise de isotermas de sorção e dessorção de grãos e oleaginosas (adaptado de JAYAS e CENKOWSKI, 2006)

Nome da relação	Equação
<b>Henderson modificada</b>	$RH = 1 - \exp \left[ -A(T + C) \left( \frac{X}{100} \right)^B \right] \quad (23)$
<b>Chung-Pfost modificada</b>	$RH = \exp \left( -\frac{A}{T+C} e^{\left( \frac{-BX}{10^4} \right)} \right) \quad (24)$
<b>Halsey modificada</b>	$RH = \exp \left[ \frac{e^{A+BT}}{\left( \frac{X}{100} \right)^C} \right] \quad (25)$
<b>Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B.)</b>	$\frac{X}{100} = \frac{ABC(RH)}{[1-B(RH)][1-B(RH)+BC(RH)]} \quad (26)$

Os parâmetros das equações de Henderson modificada, Chung-Pfost modificada, Halsey modificada e de G.A.B. para grãos de linhaça já foram reportados na literatura por Mazza *et al.* (1990). Os autores verificaram que o cultivar e o método de determinação da isoterma (método estático ou dinâmico) não interferiram nos parâmetros das equações. Os autores também afirmam que nenhuma das equações testadas descreve todo o intervalo analisado de umidade relativa (11 a 96%), e elegeram as equações de Henderson modificada ou de Chung-Pfost modificada para umidades relativas inferiores a 75% e a equação de G.A.B. para umidades relativas superiores a 75%. Quanto à histerese, foi observada que a diferença entre a umidade dos grãos durante a dessorção e a sorção estava no intervalo entre 0,5 e 1,0% e, para umidades relativas menores que 20% ou maiores que 80%, a diferença é menor que 0,5%.

Tendo em vista o que foi exposto na revisão bibliográfica, percebe-se que os grãos de linhaça apresentam versatilidade de aplicações nos setores de produção. Além disso, foi mostrado que a linhaça é um produto que tem ganhado destaque no mercado

brasileiro nos últimos anos. Entretanto, para que haja um pleno desenvolvimento do setor no país, são necessários estudos de tratamentos pós-colheita dos grãos.

Foram encontradas na literatura pesquisas que analisaram ou as propriedades físicas dos grãos em função da umidade (COSKUNER e KARABABA, 2007; SELVI, PINAR e YESILOGLU, 2006; WANG *et al.*, 2007) ou a influência de parâmetros de processo de secagem em variáveis importantes no pós-processamento (VALENTE *et al.*, 2009). Trata-se de estudos importantes para a obtenção de dados para o projeto de equipamentos industriais, como esteiras e silos. Porém, a análise da influência desses parâmetros sobre a cinética de secagem de linhaça não foi encontrada na literatura até o momento.

Assim, apresentar-se-ão no Capítulo 3 metodologias empregadas para a continuidade da pesquisa sobre a caracterização e a secagem de grãos de linhaça marrom.

## CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A linhaça foi adquirida em mercado local e foi submetida a análises para determinação de propriedades físicas. Posteriormente, foram realizados experimentos de secagem nos dois modos (leito fixo e fluidizado), cujos dados foram tratados para que modelos de secagem pudessem ser ajustados.

### 3.1 Caracterização dos grãos

As propriedades físicas dos grãos de linhaça determinadas neste trabalho foram a condutividade térmica efetiva, o calor específico, a densidade real e a do leito (com as quais se determinará a porosidade do leito) e as dimensões dos grãos. As propriedades físicas foram medidas em função da umidade.

#### 3.1.1 Método “tradicional” de reidratação

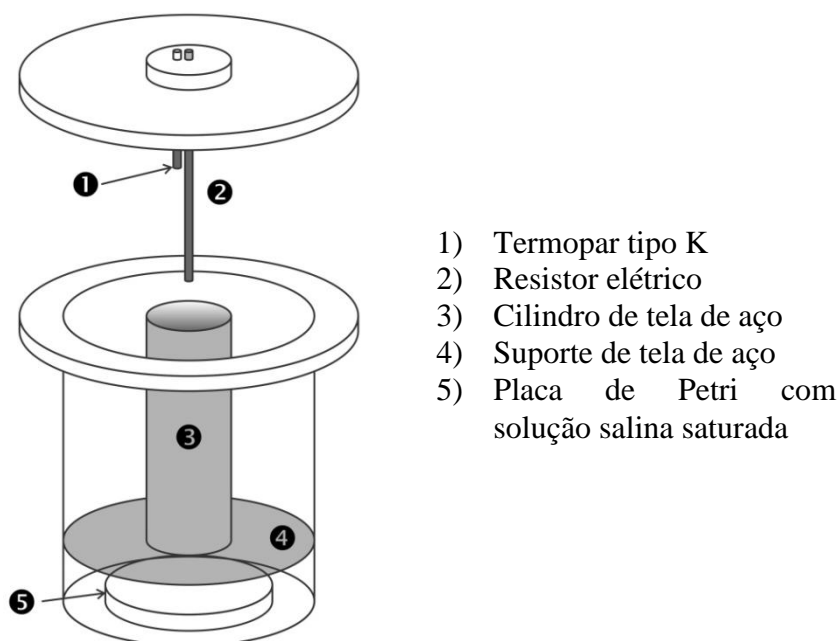
Uma vez que os grãos adquiridos já foram submetidos à secagem, foi feita a reidratação dos grãos para que a umidade fosse fixada em diferentes valores para a caracterização. Duas metodologias foram utilizadas. A primeira delas – aqui chamada de método “tradicional” – é análoga à reportada por outros autores (SINGH e GOSWAMI, 2000; SELVI, PINAR e YESILOGLU, 2006; WANG *et al.*, 2007; COSKUNER e KARABABA, 2007), ou seja, 600 g de grãos com umidade inicial conhecida foram colocados dentro de sacos de polietileno e foi adicionada uma massa calculada de água, de modo que a umidade final fosse pré-estabelecida, através de um balanço de massa. Os sacos plásticos foram então fechados e mantidos em geladeira doméstica por 15 dias, para distribuição da umidade. Posteriormente, três amostras de grãos em posições distintas foram retiradas do saco plástico, perfurando-o com um tubo metálico; evitando, assim que os grãos se misturassem durante a amostragem. As amostras foram analisadas quanto à umidade através do método da estufa a 105°C por 24 h. Com isso, verificou-se se as umidades nas três posições eram iguais às calculadas previamente.

A outra forma para se fixar a umidade dos grãos para a caracterização foi o condicionamento dos grãos em um recipiente hermético com uma solução salina

saturada até que se atingisse umidade constante. Porém, uma vez que os grãos seriam caracterizados quanto a propriedades térmicas, propôs-se uma nova metodologia para a caracterização de grãos, a ser descrita na seção 3.1.2.

### 3.1.2 Condutividade térmica – “método da sonda modificado”

Para a determinação da condutividade térmica, foi usado o método da sonda linear. O equipamento já foi utilizado anteriormente por Pereira (2010) para caracterizar sementes de painço (*Setaria italica* L.). Entretanto, para que se obtivesse a relação da condutividade térmica com a umidade dos grãos, foram feitas modificações no equipamento, com a finalidade de controlar a umidade relativa do ar em uma câmara através de soluções salinas saturadas. A Figura 3.1 mostra um esquema do equipamento proposto para a medição da condutividade térmica.



**Figura 3.1:** Esquema do equipamento proposto para medição da condutividade térmica.

O cilindro externo apresenta 18,0 cm de diâmetro e 32,0 cm de altura, e foi confeccionado em PVC. Na “tampa”, que apresenta 27 cm de diâmetro, há uma vedação com dois anéis de borracha; garantindo que, ao se fechar a câmara, o meio fique hermeticamente fechado.

Primeiramente, foram preparados 50 mL de solução de um dos sais da Tabela 3.1 com presença de precipitado; garantindo, assim, a saturação. Essa solução foi

transferida a uma placa de Petri sem a parte superior e inserida dentro do equipamento. Posteriormente, a tela de aço foi colocada para separar a sonda linear propriamente dita do contato com a solução salina.

**Tabela 3.1:** Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura (adaptado de BARROZO, 1995).

Solução salina	Temperatura (°C)				
	25	30	40	45	50
<b>LiCl</b>	0,113	0,113	0,112	0,111	0,111
<b>CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>K</b>	0,225	0,216	0,204	0,195	0,192
<b>MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O</b>	0,328	0,324	0,318	0,314	0,312
<b>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	0,432	0,432	0,432	0,432	0,433
<b>NaNO<sub>2</sub></b>	0,645	0,635	0,616	0,603	0,597
<b>NaCl</b>	0,753	0,750	0,748	0,747	0,746
<b>KCl</b>	0,843	0,834	0,818	0,808	0,802

O cilindro de tela de aço, que apresenta 4,5 cm de diâmetro e 28,0 cm de comprimento, foi preenchido com os grãos de linhaça. Para garantir que os grãos estejam acomodados no cilindro, ele foi agitado manualmente após seu preenchimento. Posteriormente, ele foi colocado no interior da câmara e ela foi fechada.

A vedação com dois anéis de borracha presentes na “tampa” do equipamento e o uso da solução salina saturada garantem que a umidade relativa está praticamente constante, a menos de pequenas variações da temperatura ambiente. Porém, conforme verificado na Tabela 3.1, a umidade relativa do ar varia pouco com variações “ambientais” da temperatura.

As dimensões do resistor elétrico são: diâmetro de 6,4 mm e comprimento de 26,5 cm. Suas especificações são: potência nominal de 600 W para uma tensão elétrica de 220 V. Além do resistor, está também fixado na tampa um termopar tipo K de 1,5 mm de diâmetro, com comprimento igual à metade do resistor.

Após o fechamento da célula, o experimento foi então iniciado ao se aplicar uma corrente elétrica contínua de intensidade 0,10 A ao resistor, fornecida por uma fonte DC de marca Protek modelo 3003B. Foram obtidos então dados experimentais de temperatura em função do tempo. Com a corrente elétrica fixada em 0,10 A e conhecendo as especificações do resistor elétrico, foi possível calcular a potência dissipada por unidade de comprimento, necessária para a determinação da condutividade térmica efetiva.

Uma vez que o modelo resultante do truncamento da Equação 21 para a determinação da condutividade térmica efetiva é válido para tempos “longos”, foi necessário determinar a “melhor” reta que se ajusta aos dados de temperatura em função do logaritmo natural do tempo. Para isso, foi feita uma rotina no *software* Matlab<sup>®</sup>, de tal modo que se descartem pontos experimentais de tempos iniciais até que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) fosse maior ou igual a 0,99.

Foram realizados experimentos periodicamente, até que se obtivesse condutividade térmica constante no tempo, quando se assumiu que o sistema atingiu equilíbrio termodinâmico. Obteve-se, então, um valor para a condutividade térmica para cada solução salina (consequentemente, para cada umidade dos grãos). Utilizou-se como valor final da condutividade térmica efetiva para dada umidade a média dos dois últimos experimentos.

Posteriormente, a câmara foi aberta e foram retiradas três amostras de grãos (em três alturas distintas do cilindro, divididas visualmente), que foram analisadas quanto à umidade, através do método da estufa a 105°C por 24 h. A média dos três valores de umidade foi comparada com a umidade de equilíbrio calculada pela equação de Henderson modificada para grãos de linhaça (MAZZA *et al.*, 1990):

$$X = \ln \left[ \frac{1-RH}{0,0176(T+56,228)} \right]^{1,9054} \quad (27)$$

Resumidamente, o “método da sonda linear modificado” é um procedimento de determinação de isoterma de equilíbrio através do método estático, porém a propriedade que serve como critério de equilíbrio não é a massa, mas sim a condutividade térmica efetiva; com a vantagem de se obter esta propriedade de transferência de calor em função da umidade, além da umidade de equilíbrio em si.

Além da análise de umidade, os grãos foram analisados também quanto ao calor específico, através de calorimetria de varredura diferencial no equipamento da marca Shimadzu modelo DSC-50; à densidade das partículas, através de picnometria líquida a isopropanol; e à densidade do leito, através de gravimetria em proveta de 50 mL.

O empacotamento dos grãos na proveta para medição da densidade do leito foi feito em analogia ao procedimento adotado por Zotin (1985). Metade da proveta foi preenchida com os grãos. Para a acomodação dos grãos, foram feitas dez batidas na proveta e, posteriormente, a proveta foi preenchida até o volume máximo. Mais dez

batidas foram feitas e finalmente mediu-se a massa dos grãos e o volume ocupado por eles.

Todas as análises após a determinação da condutividade térmica efetiva foram repetidas para cada solução saturada dos sais mostrados na Tabela 3.1; obtendo-se, assim, as propriedades físicas em função da umidade dos grãos. Para que os grãos não tenham sua umidade alterada pela exposição ao ar após a abertura da câmara da sonda, elas foram feitas o mais rapidamente possível.

### **3.2 Reidratação como simulação da umidade pós-colheita**

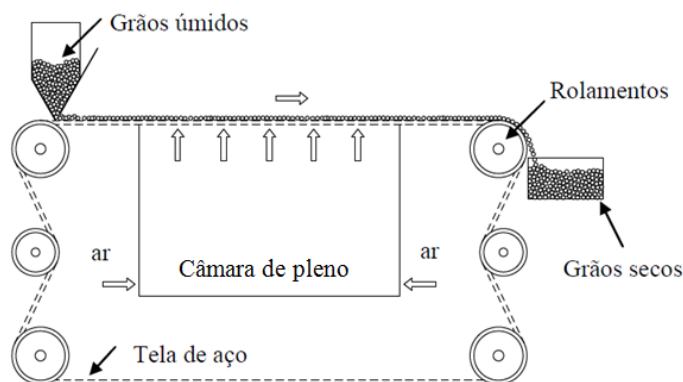
Conforme mencionado na seção 3.1.1, os grãos foram adquiridos em mercado local, portanto, já foram submetidos a um processo de secagem. A aquisição de grãos recém-colhidos seria o ideal para o estudo da secagem, porém é inviável por questões logísticas. Uma forma a reproduzir a umidade dos grãos logo após a colheita é a reidratação dos grãos.

O procedimento para a reidratação dos grãos foi o acondicionamento no equipamento Binder, um equipamento que, a princípio, é utilizado para a análise de germinação de sementes. O equipamento foi configurado para manter uma atmosfera a 30°C saturada de umidade, sem a presença de luz; evitando, assim, uma possível germinação.

Com a finalidade de reduzir perdas de material por excesso de tempo de reidratação, foi realizado um experimento de cinética de reidratação: uma bandeja com uma camada de cerca de 1 cm de grãos de linhaça foi colocada dentro da câmara de germinação. Após 12 horas, outra bandeja foi colocada, e assim por diante, até que se completassem cinco bandejas. Quando a última bandeja foi colocada, uma pequena amostra foi retirada de cada bandeja. Posteriormente, novas amostras foram retiradas a cada hora, totalizando 60 amostras, correspondendo ao período de 59 h de reidratação. Todas as amostras foram analisadas quanto à umidade pelo método da estufa a 105°C por 24 h. Com isso, foi estabelecido o tempo para a reidratação dos grãos antes da realização dos experimentos de secagem.

### 3.3 Secagem

O equipamento utilizado para a secagem é o mesmo empregado para a secagem de sementes de gramíneas da espécie *Brachiaria brizantha* em outros trabalhos (ARNOSTI JÚNIOR, 1997; FUMAGALLI, 2007; MIRANDA, VIEIRA e FREIRE, 2011). Um esquema do equipamento é mostrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Esquema do equipamento utilizado para a secagem dos grãos.

O equipamento consiste de um soprador radial, duas válvulas gaveta para o controle da vazão (sendo uma delas uma purga de ar); tubulações de aço carbono de 2 polegadas de diâmetro nominal; um aquecedor elétrico, cuja potência dissipada era controlada por um controlador de temperatura da marca Flyever modelo FE50RP; uma câmara de pleno com 0,80 m de altura; e o leito propriamente dito, constituído por uma tela de aço sobre rolagens e pela célula de secagem, com 0,10 m de largura e 0,60 m de comprimento. A alimentação de grãos foi feita por um silo e pelo acionamento de um motor de corrente contínua com 0,5 cv de potência, que movia a tela de aço até a posição desejada.

Foi feita a instalação de um sistema digital de aquisição de dados de temperatura, pressão no leito e vazão de ar, de modo que os dados experimentais fossem obtidos em um microcomputador. Para isso, foram instalados os seguintes periféricos:

- dois transdutores de pressão, sendo um deles com queda de pressão máxima de 1 in H<sub>2</sub>O, para a medição da queda de pressão no leito; e outro com queda de pressão máxima de 1 psi, para a medição da queda de pressão em uma placa de orifício e, conseqüentemente, da vazão de ar.
- onze termopares tipo T, sendo um para o controlador de temperatura, três para o monitoramento da temperatura na entrada do leito, abaixo da tela



de aço; e sete para a parte superior da célula de secagem, colocados a cada 10 cm no sentido do comprimento.

Após o período de reidratação, o secador esteira foi regulado quanto à temperatura, à velocidade do ar e à altura da guilhotina. Alimentaram-se os grãos no secador pelo silo e o motor de corrente contínua foi acionado até o preenchimento total da célula de secagem. Quando a célula foi preenchida, desligou-se o motor. As secagens foram, portanto, realizadas em batelada.

Retiraram-se amostras de grãos da parte superior do leito periodicamente a cada 10 cm no sentido do comprimento do leito, com o uso de uma espátula. As amostras foram analisadas quanto à umidade através do método da estufa a 105°C por 24 h. A qualidade da distribuição de ar foi analisada através do desvio da média da umidade entre as amostras retiradas a cada tempo de secagem.

A secagem foi analisada quanto à influência de três variáveis: a velocidade do ar, a temperatura do ar e a altura de leito estático. Para a velocidade do ar, foram escolhidos níveis de velocidade do ar de modo que se opere em leito fixo (85% do valor da velocidade de mínima fluidização) e em leito fluidizado (115%), determinados a partir das curvas fluidodinâmicas, cuja obtenção será descrita no item 3.4. As temperaturas escolhidas foram 50, 65 e 80°C, por não se tratar de secagem de sementes para plantio. Já para a altura de leito estático, foram empregados os níveis de 1, 3 e 5 cm. Os níveis de a altura de leito estático foram escolhidos de acordo com as limitações do equipamento, já que a menor medida que a saída tipo guilhotina do silo permite é de 1 cm e que não há como empregar alturas maiores que 5 cm.

Os dados foram então tratados de modo a se obterem as constantes para os modelos cinéticos de secagem mostrados nas Equações 1 a 6, através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos.

A minimização da soma dos quadrados dos resíduos foi feita com a rotina Solver do software Microsoft Excel 2007. A qualidade do ajuste do modelo foi avaliada através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), calculado com a função “correl” do *software*, e de gráficos de resíduos.

### 3.4 Caracterização fluidodinâmica

Uma vez que seriam realizados experimentos de secagem para dois modos de operação (leito fixo e fluidizado), foi necessário determinar parâmetros de mínima fluidização (queda de pressão e velocidade). Eles foram obtidos experimentalmente, através do gráfico da queda de pressão no leito em função da velocidade do ar, para as alturas de leito estático de 1, 3 e 5 cm.

O procedimento adotado foi a medição da queda de pressão em função da velocidade do ar, medidas com os transdutores de pressão e a placa de orifício, para vazões crescentes e decrescentes. A princípio, os experimentos foram feitos em triplicata, sem o reempacotamento do leito, ou seja, foram feitas três fluidizações e “desfluidizações” sucessivas.

A determinação do ponto de mínima fluidização foi feita de forma análoga à determinação do coeficiente angular da reta dos dados da sonda linear: uma reta foi ajustada aos dados de queda de pressão em função da velocidade do ar para todos os pontos experimentais correspondentes à vazão decrescente. Posteriormente, o ponto com a maior velocidade foi descartado e uma nova reta foi ajustada, repetindo-se o descarte do “último” ponto experimental (aquele com maior velocidade) até o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) atingir o valor de 0,95. A maior velocidade do ar resultante deste procedimento foi considerada a velocidade de mínima fluidização. A queda de pressão de mínima fluidização foi o valor da queda de pressão correspondente a esta velocidade. O procedimento de eliminação de pontos experimentais também foi feito em uma rotina em Matlab<sup>®</sup>, assim como no método da sonda linear.

Os resultados encontrados para os parâmetros de mínima fluidização foram comparados com os calculados pelas equações de Wen e Yu (1966), Lucas *et al.* (1986), Ergun e pelo balanço de forças sobre a partícula.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

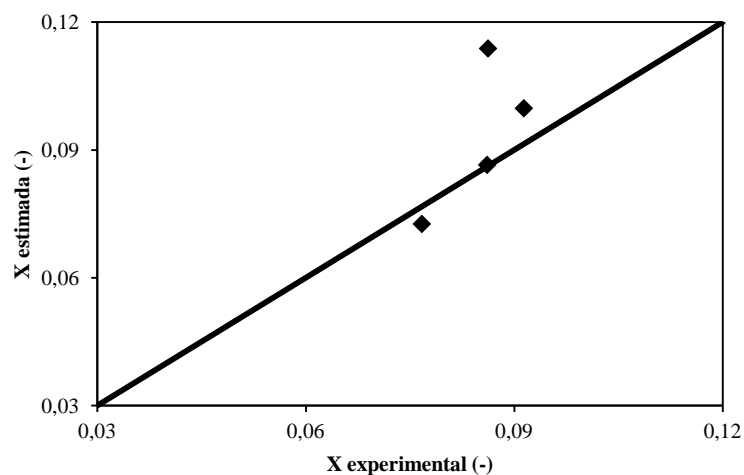
Neste capítulo, apresentar-se-ão os resultados obtidos com a metodologia descrita no Capítulo 3, além da discussão acerca dos dados experimentais.

### 4.1 Caracterização dos grãos

Primeiramente, serão mostrados os dados resultantes dos experimentos com a sonda linear modificada e, posteriormente, os resultados das demais análises (DSC, picnometria líquida e gravimetria em proveta).

#### 4.1.1 Condutividade térmica

A Figura 4.1 mostra a umidade obtida experimentalmente através do método “tradicional” em função da umidade desejada (estimada pelo balanço de massa) através desta metodologia.



**Figura 4.1:** Umidade estimada em função da umidade experimental para reidratação feita pelo método “tradicional”.

Percebe-se que, para umidades mais baixas, a metodologia é válida, porém, o mesmo não pode ser afirmado para umidades superiores. De fato, após o período de reidratação, ocorreu agregação dos grãos, crescimento de fungos ou mesmo emergência da radícula para a umidade mais alta (Figura 4.2). O resultado pode ser explicado

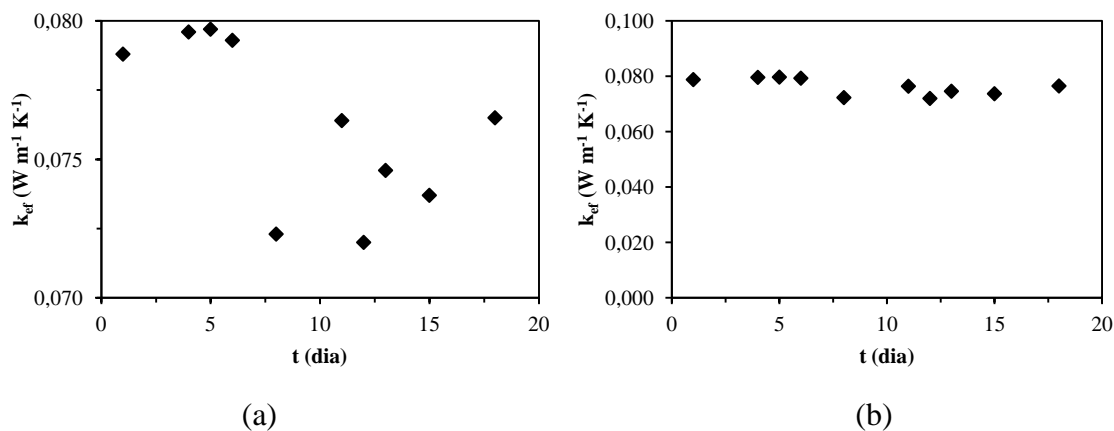
devido à má distribuição da água adicionada, o que compromete a validade do método “tradicional”. A agregação dos grãos e o crescimento de fungos possivelmente se devem à remoção da mucilagem, já que o procedimento comum para isso é a adição de água (FEDENIUK e BILIADERIS, 1994).



**Figura 4.2:** Fotografia dos grãos de linhaça após 15 dias de reidratação pelo método “tradicional”.

Com a retirada da mucilagem, pode ter havido mudança na composição dos grãos, e conseqüentemente, os dados poderiam não representar as propriedades físicas reais da linhaça. Com isso, optou-se pela caracterização dos grãos após a fixação da umidade em atmosfera controlada pelas soluções salinas.

A Figura 4.3 mostra a condutividade térmica em função do tempo transcorrido desde o fechamento da câmara, para o experimento com a solução de LiCl.

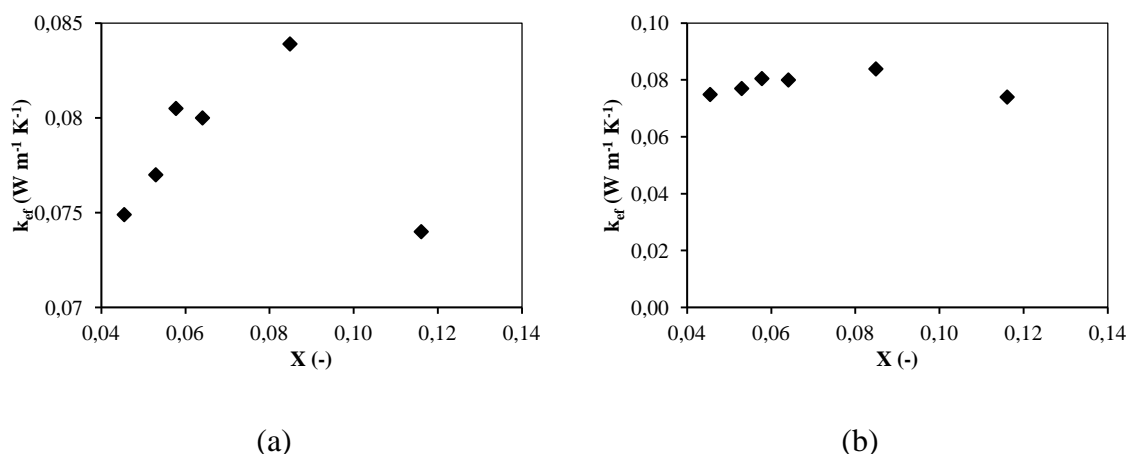


**Figura 4.3:** Condutividade térmica efetiva em função do tempo de fechamento da câmara para o experimento com a solução de LiCl.

(a) Escala expandida; (b) Escala não-expandida.

Há uma tendência de decréscimo na condutividade ao longo dos dias, de onde se afirma que a condutividade térmica efetiva é uma variável que pode ser usada como critério de equilíbrio de sorção. Porém, esse decréscimo só é notado visualmente devido à expansão na escala no eixo das abscissas – o desvio-padrão das medidas durante todo o período é de apenas 4% da média para esta solução salina. Desvios da mesma ordem de grandeza foram notados para as demais soluções. Isso pode ser decorrente do fato de a linhaça ser um grão cuja umidade de equilíbrio é baixa, mesmo quando exposto a altas umidades relativas. Com isso, houve uma pequena variação da umidade e, conseqüentemente, das propriedades físicas que dependem dela. Possivelmente, essas oscilações serão menos notadas para materiais mais higroscópicos, o que é uma motivação para testar a metodologia com outros materiais.

A Figura 4.4 mostra a condutividade térmica efetiva do leito de linhaça em função da umidade dos grãos.



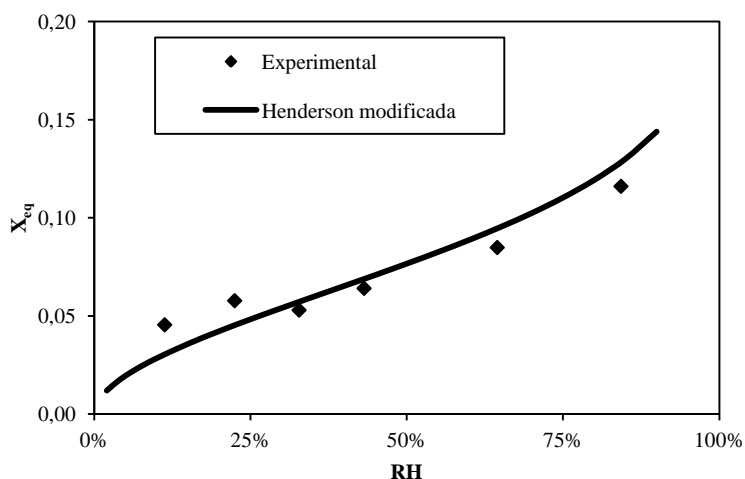
**Figura 4.4:** Condutividade térmica efetiva da linhaça em função da umidade.

(a) Escala expandida; (b) Escala não-expandida.

Para umidades altas, a condutividade térmica efetiva da linhaça apresentou um comportamento não esperado, já que, se desprezado o ponto experimental para a maior umidade (solução de KCl), poder-se-ia afirmar que a condutividade térmica se relaciona linearmente com a umidade. Porém, assim como o que ocorreu para a Figura 4.3, só foi possível visualizar a tendência linear após a expansão da escala no eixo das ordenadas. Devido à pequena variação da condutividade térmica com a umidade, é preferível optar pelo uso da média dos valores obtidos experimentalmente:  $(78 \pm 4) 10^{-2} W m^{-1} K^{-1}$ . Uma

possível razão para que ocorra essa fraca dependência é, conforme já dito anteriormente, a pouca água sorvida pelo grão, mesmo quando exposto a atmosferas muito úmidas.

A Figura 4.5 mostra a umidade dos grãos após a abertura da câmara (média de três amostras) em função da umidade relativa do ar, juntamente com a isoterma de equilíbrio de adsorção de água a 25°C calculada pela equação de Henderson modificada, com os parâmetros determinados por Mazza *et al.* (1990).

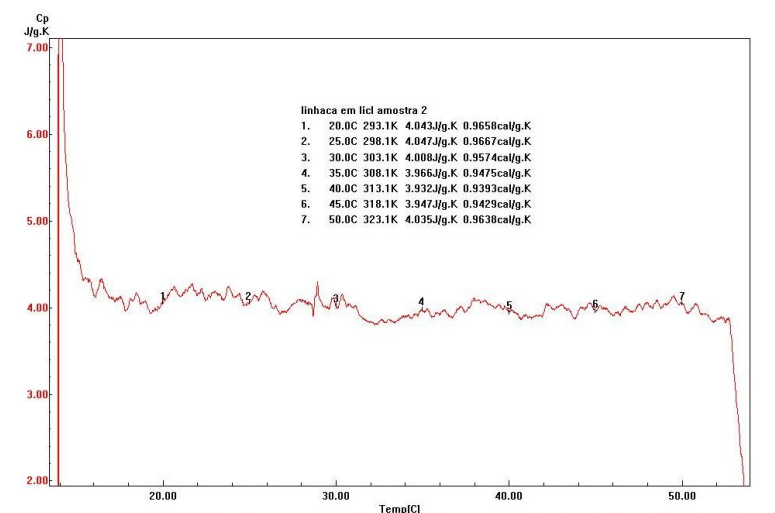


**Figura 4.5:** Umidade de equilíbrio dos grãos de linhaça em função da umidade relativa da atmosfera controlada.

Mesmo com a variação de temperatura necessária para a determinação da condutividade térmica e mesmo que não tenha havido um controle de temperatura análogo ao utilizado no método estático, a umidade de equilíbrio obtida experimentalmente foi próxima ao resultado da literatura (considerando-se nos cálculos que a temperatura foi de 25°C).

#### 4.1.2 Calor específico

A Figura 4.6 mostra um dos resultados provenientes da calorimetria de varredura diferencial. Como exemplo, será mostrado o calor específico da linhaça em função da temperatura para os grãos previamente acondicionados na presença da solução saturada de LiCl.

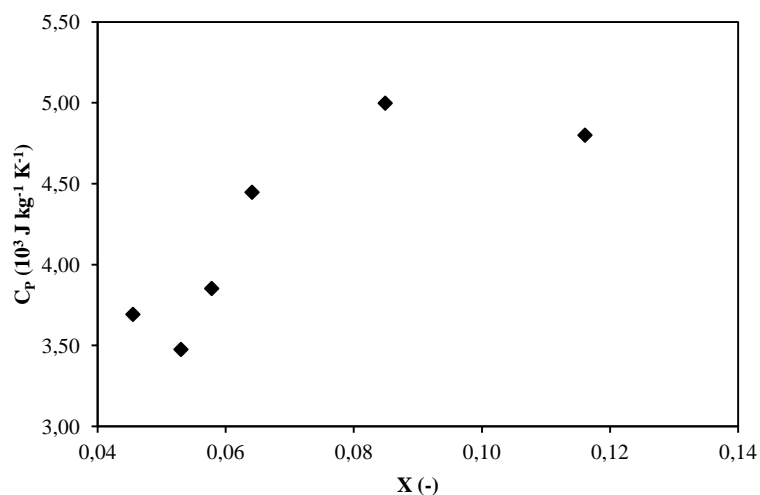


**Figura 4.6:** Calor específico da linhaça em função da temperatura para os grãos acondicionados na presença de solução de LiCl.

No intervalo analisado de temperaturas, o calor específico apresenta um valor praticamente constante, apesar de haver pequenas oscilações. Estas oscilações são decorrentes de ruídos durante a análise.

Esperava-se que, a partir dos dados da DSC, fosse possível obter uma relação do calor específico da linhaça com a umidade e a temperatura. Porém, a variável não se mostrou sensível à temperatura no intervalo analisado. Em decorrência disso, preferiu-se utilizar o valor médio para cada umidade e, a partir disso, obter uma relação do calor específico com a umidade dos grãos.

A partir das médias dos resultados da calorimetria de varredura diferencial, a Figura 4.7 mostra o calor específico da linhaça em função da umidade.



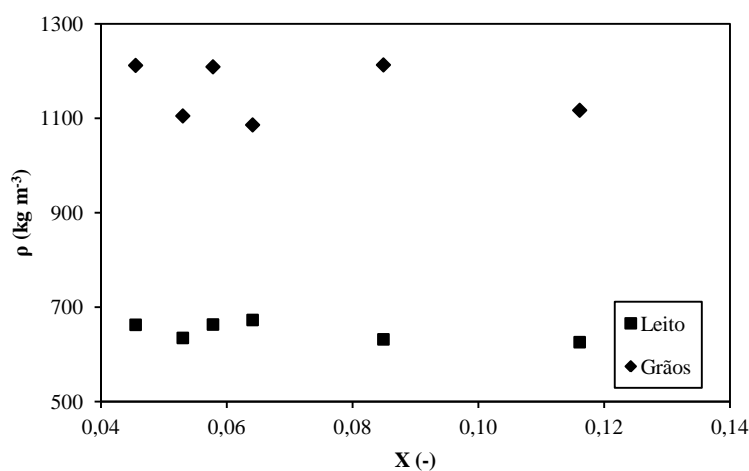
**Figura 4.7:** Calor específico médio da linhaça em função da umidade.

Nota-se que há uma variação significativa do calor específico com a umidade para umidades inferiores a 0,07, além da qual o calor específico é praticamente constante. Considerando-se apenas o valor médio, tem-se que o calor específico da linhaça é de  $(4,2 \pm 0,6) 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

O ponto experimental relativo à maior umidade (solução de KCl) teve um comportamento diferenciado em relação aos demais, assim como o que ocorreu com a condutividade térmica efetiva. Porém, não se pode considerar um desvio pequeno devido ao aumento da escala. Recomenda-se, pois, uma investigação mais profunda para as propriedades físicas da linhaça a altas umidades.

### 4.1.3 Densidade real e aparente

A Figura 4.8 mostra as densidades dos grãos de linhaça e do leito em função da umidade.



**Figura 4.8:** Densidade do leito e dos grãos em função da umidade.

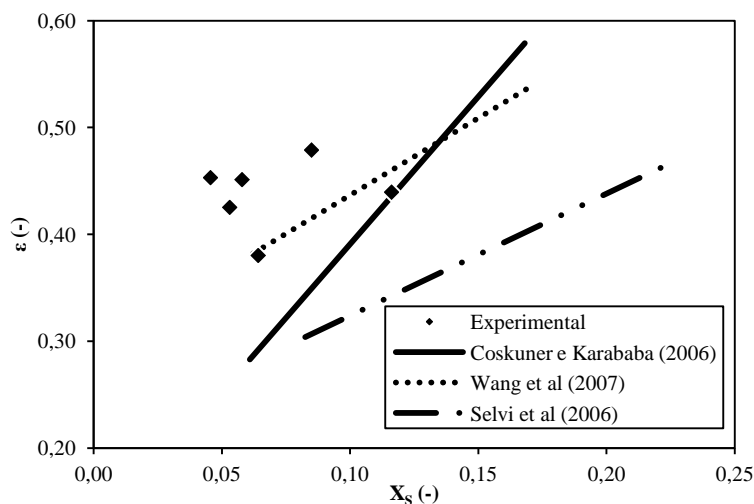
As densidades dos grãos e do leito não apresentaram uma dependência significativa com a umidade dos grãos. Os valores médios experimentais foram, respectivamente,  $(1157 \pm 60) \text{ kg m}^{-3}$  e  $(649 \pm 20) \text{ kg m}^{-3}$ .

Os resultados diferem dos da literatura: Singh *et al.* (2000), Coskuner e Karababa (2007) e Wang *et al.* (2007) obtiveram relações lineares com coeficientes de determinação superiores a 0,95 para as variáveis mostradas. Porém, a umidade dos grãos foi fixada através do método “tradicional”, que, conforme discutido



anteriormente, não garante que a água adiciona se distribua uniformemente sobre os grãos, comprometendo a análise.

A Figura 4.9 mostra a porosidade do leito (calculada a partir da densidade dos grãos e do leito) em função da umidade dos grãos, juntamente com as relações lineares encontradas por Coskuner e Karababa (2007), Wang *et al.* (2007) e Selvi, Pinar e Yesiloglu (2006), nos intervalos em que foram determinadas.



**Figura 4.9:** Porosidade do leito em função da umidade.

Não se nota uma dependência significativa entre a porosidade do leito e a umidade dos grãos. De fato, não se notou expansão visível do leito ou turgescência dos grãos em relação ao início do experimento da sonda linear, de onde já se esperava que a porosidade se mantivesse praticamente constante com a umidade. Possivelmente, a variação da porosidade com a umidade é decorrente de desvios experimentais, resultando em um valor médio de  $0,44 \pm 0,03$ .

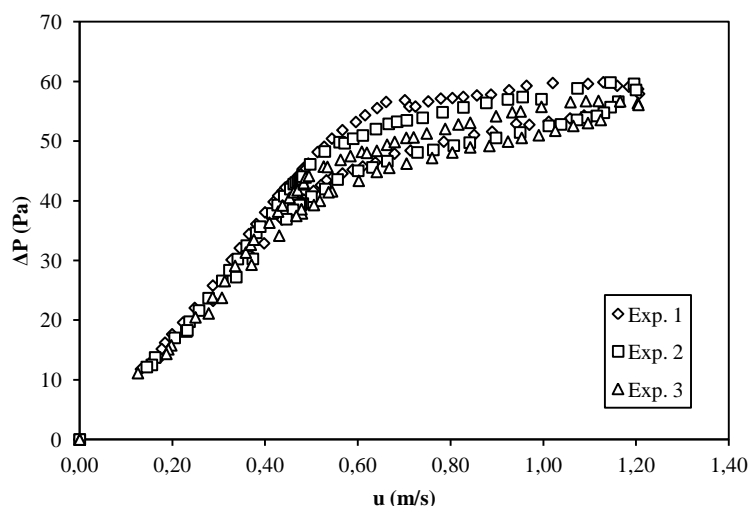
Jayas e Cenkowski (2007) apresentam dados de porosidade de leitos de vários grãos distintos e, em sua maioria, são em torno de 40%, similar ao determinado experimentalmente neste trabalho. Porém, quando comparados aos dados obtidos por Coskuner e Karababa (2007), Wang *et al.* (2007) e Selvi, Pinar e Yesiloglu (2006), os dados diferem significativamente: a porosidade do leito apresentou uma clara tendência linear crescente, com coeficientes de determinação iguais a 0,99, 0,99 e 0,94, respectivamente. Os autores não justificam esse aumento de porosidade com a umidade, tampouco o bom ajuste do modelo linear aos dados experimentais, e somente comparam os resultados com grãos de diferentes espécies. Coskuner e Karababa (2007) afirmam

que, com o aumento da umidade, houve maior aumento de volume do que de massa no leito.

Há a possibilidade de os grãos de linhaça utilizados serem de tipos distintos dos empregados neste trabalho. Porém, Mazza *et al.* (1990), durante a determinação de isotermas de equilíbrio de sorção, verificaram que diferentes tipos de grãos não interferiram significativamente nos parâmetros das equações das isotermas. Possivelmente, caso o tipo de linhaça exercesse influência sobre as propriedades físicas analisadas pelos autores, esse resultado seria notado também nas equações de isotermas de equilíbrio. Além disso, porosidades da ordem de 60%, como a obtida por Coskuner e Karababa (2007) para a umidade mais alta, normalmente são encontradas quando há um fluido em escoamento, como em leitos fluidizados e transportes pneumáticos em fase densa, e não em leitos fixos.

## 4.2 Caracterização fluidodinâmica

A Figura 4.10 mostra a queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos de caracterização fluidodinâmica para um leito estático de 1 cm de altura, para os experimentos em batelada.



**Figura 4.10:** Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em batelada para o leito estático de 1 cm de altura.

O comportamento observado para o leito é típico de um leito fluidizado, conforme discutido na seção 2.3. Na Figura 4.10, notam-se os regimes de leito fixo e fluidizado bem-caracterizados.

Também se observa que, a cada fluidização, ocorre um pequeno decréscimo na queda de pressão de mínima fluidização. Isso pode ser explicado pela forma não-esférica do grão de linhaça: após cada experimento, ocorria o rearranjo dos grãos no leito, de forma que a maior área se orientasse perpendicularmente ao escoamento do ar, fazendo com que a energia necessária para a fluidização diminuísse a cada experimento. Apesar da diminuição da queda de pressão na mínima fluidização, a velocidade de mínima fluidização se mantém praticamente constante.

Como forma de ilustrar a orientação dos grãos, a Figura 4.11 e a Figura 4.12 mostram duas fotografias do leito, sendo a primeira antes da primeira fluidização e a segunda, após a última fluidização. Nota-se claramente a orientação dos grãos, de modo que a maior superfície dos grãos se encontra perpendicularmente ao escoamento do ar no segundo caso.



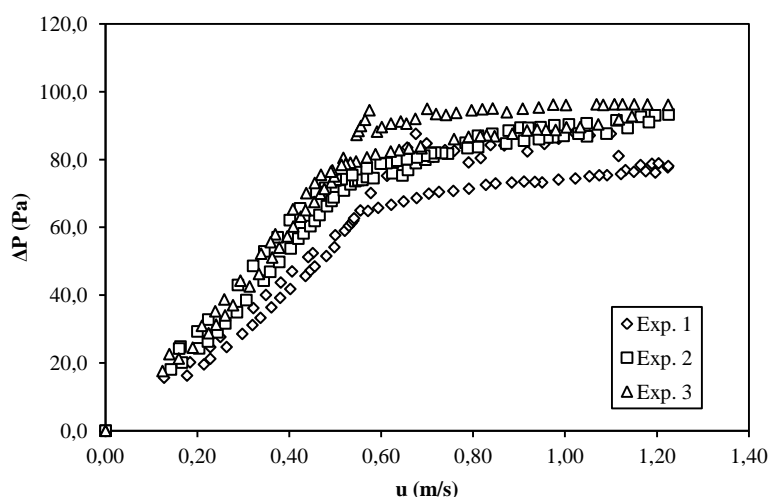
**Figura 4.11:** Fotografia dos grãos de linhaça no leito antes da primeira fluidização em batelada.



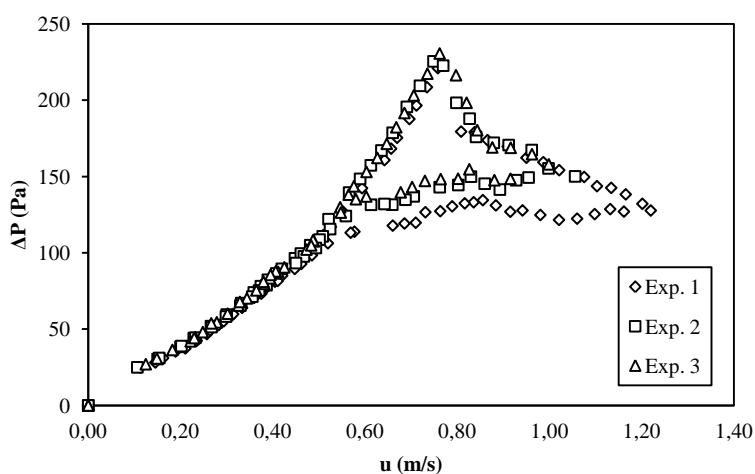
**Figura 4.12:** Fotografia dos grãos de linhaça no leito após a última fluidização em batelada.

Lima (2009) analisou a fluidodinâmica de partículas de baixa esfericidade e verificou que as partículas se agregavam (no caso de folhas pilosas) ou proporcionavam a formação de canais preferenciais devido à forma das partículas. A progressiva redução da queda de pressão na mínima fluidização observada para os grãos de linhaça pode ser devido ao mesmo fenômeno observado para as folhas e partículas planas.

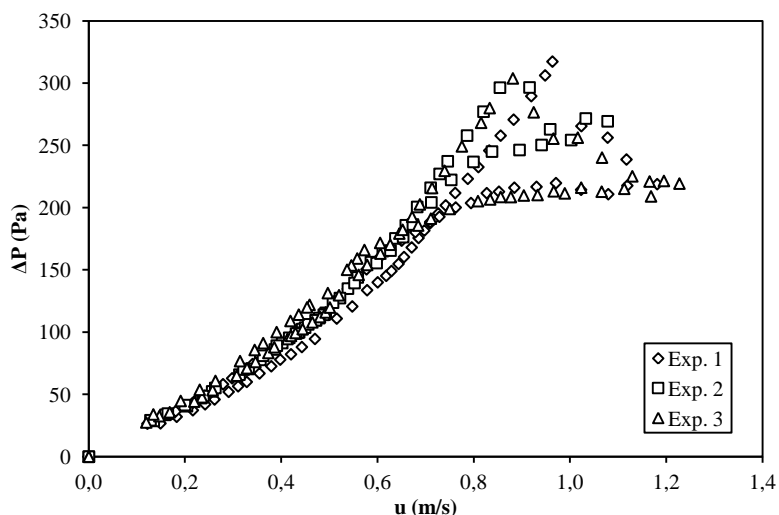
Para verificar se há influência do rearranjo dos grãos sobre a fluidodinâmica do leito, novos experimentos foram realizados, porém com contínua alimentação de sólidos (modo esteira). Dessa forma, a orientação dos grãos era dada pelo deslizamento dos grãos para fora do silo e pelo transporte pela esteira durante todo o experimento. As Figuras 4.13 a 4.15 mostram a queda de pressão em função da velocidade do ar para estes experimentos no leito estático de 1, 3 e 5 cm de altura, respectivamente.



**Figura 4.13:** Queda de pressão em função da velocidade do ar do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 1 cm de altura.



**Figura 4.14:** Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 3 cm de altura.



**Figura 4.15:** Queda de pressão em função da velocidade do ar para os experimentos fluidodinâmicos em modo esteira para o leito estático de 5 cm de altura.

Com a contínua alimentação de sólidos com as mesmas condições de orientação (resultantes do escoamento dado pelo silo), as réplicas forneceram resultados mais próximos, comprovando a hipótese de que a diminuição da queda de pressão de mínima fluidização era decorrente da orientação dos grãos.

O comportamento fluidodinâmico para o leito de 1 cm de altura foi o típico de um leito fluidizado. Por outro lado, para os experimentos para 3 e 5 cm de altura de leito, a queda de pressão apresenta um máximo para uma vazão crescente. Após o valor máximo, a queda de pressão diminui, mantendo-se em um valor constante para maiores vazões. Esse comportamento fluidodinâmico é típico de leitos de jorro, em que a energia necessária para a formação de um canal preferencial no leito fixo é superior à necessária para a manutenção do regime de jorro (EPSTEIN e GRACE, 2011). De fato, verificou-se experimentalmente a formação de numerosos e pequenos canais preferenciais ao longo do leito, com lançamento vertical de grãos, o que está relacionado com o distribuidor de ar utilizado, que foi a própria esteira. Entretanto, quando se analisam os dados experimentais a vazões decrescentes, o comportamento é típico de leitos fluidizados, conforme discutido na seção 2.3. Por esta razão, o leito ainda foi considerado como um leito fluidizado.

A partir dos dados de fluidização com o leito no modo esteira, obtiveram-se os parâmetros de mínima fluidização, que são mostrados na Tabela 4.1, onde também são mostrados os valores dos parâmetros calculados pelas correlações mostradas na seção 2.3.

**Tabela 4.1:** Velocidade e queda de pressão de mínima fluidização experimentais e calculadas pelas correlações.

	$u_{mf}$ (m/s)			$\Delta P_{mf}$ (Pa)		
	Experimental	Wen e Yu	Lucas <i>et al.</i>	Experimental	Balanco de forças	Ergun
<b>1 cm</b>	$0,52 \pm 0,06$	0,63	0,80	$70 \pm 5$	66	45
<b>3 cm</b>	$0,60 \pm 0,02$	0,63	0,80	$127 \pm 12$	197	136
<b>5 cm</b>	$0,72 \pm 0,1$	0,63	0,80	$200 \pm 35$	328	227

Para o cálculo dos parâmetros de mínima fluidização (e, posteriormente, para o ajuste do modelo difusivo truncado), considerou-se como raio da partícula a metade do diâmetro médio determinado por análise granulométrica em peneiras. Após a análise, praticamente todos os grãos ficaram retidos em -10 +12 (série Tyler), enquanto uma pequena parcela de grãos quebrados ou pulverizados ficou retida no fundo da série de peneiras. Com isso, o diâmetro médio encontrado por esse método foi de 1,85 mm e, portanto, o raio considerado foi de 0,925 mm. Na equação de Ergun, assumiu-se esfericidade igual a 0,5, conforme dados médios da literatura (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1992; WANG *et al.*, 2007).

Uma análise de variância sobre os dados experimentais de velocidade de mínima fluidização mostram que, a um nível de significância de 5%, há influência da altura de leito estático sobre a velocidade de mínima fluidização. Porém, tanto a equação de Wen e Yu (1966) quanto a equação de Lucas *et al.* (1986) não são sensíveis à altura de leito estático. De fato, ambas as equações apresentam como variável dependente somente o número de Arquimedes, que relaciona propriedades físicas da partícula e do fluido, e não as dimensões do leito.

Conforme discutido na seção 2.3, uma das grandes dificuldades de se obter equações que reproduzam a velocidade de mínima fluidização é decorrente da dificuldade na medição da porosidade do leito na mínima fluidização. Essa aparente dependência da velocidade de mínima fluidização com a altura de leito estático é, na verdade, uma dependência com a porosidade do leito na mínima fluidização, modificada devido ao rearranjo das partículas no leito.

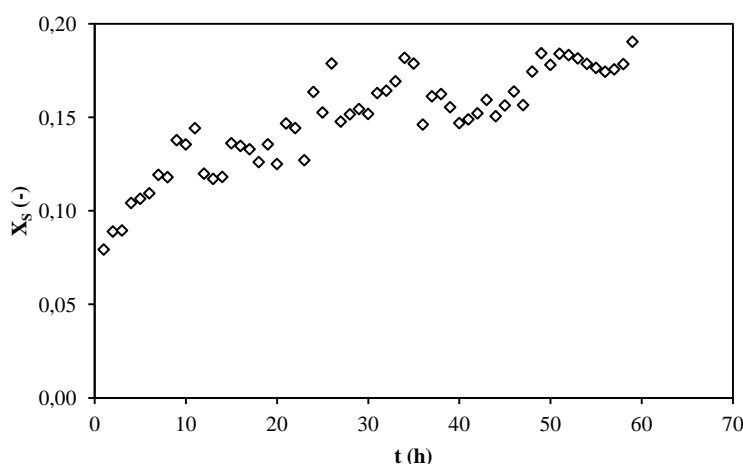
A equação de Lucas *et al.* (1986) superestimou a velocidade de mínima fluidização em todos os casos, enquanto que a de Wen e Yu (1966) resultou em valores de velocidade de mínima fluidização mais próximos aos experimentais. Mesmo que a equação de Lucas *et al.* (1986) tenha sido obtida especificamente para partículas não-

esféricas, opta-se pela equação de Wen e Yu (1966) para o cálculo da velocidade de mínima fluidização. Com isso, utilizou-se o valor encontrado através desta equação para o cálculo da queda de pressão de mínima fluidização pela equação de Ergun.

Tanto o balanço de forças quanto a equação de Ergun para o cálculo da queda de pressão de mínima fluidização superestimaram o parâmetro para as condições de 3 e 5 cm, sendo que a equação de Ergun apresentou menores desvios para estes leitos. Por outro lado, ambas subestimaram a queda de pressão de mínima fluidização para 1 cm, sendo o menor desvio para o balanço de forças. Possivelmente, o melhor ajuste da equação de Ergun para os leitos mais espessos se deve ao fato de ela ser baseada em escoamentos em meios porosos, ou seja, pressupõe-se que há um percurso aleatório a ser percorrido pelo fluido ao longo do leito. Este percurso tende a ser mais aleatório quanto maior a altura de leito estático. Dessa forma, a equação de Ergun se ajustou melhor aos dados para os leitos de 3 e 5 cm. Analogamente, o balanço de forças se ajustou melhor aos dados experimentais para o leito de 1 cm porque o caminho percorrido pelo fluido no leito não foi suficientemente aleatório, sendo o comportamento fluidodinâmico mais bem representado quando se iguala o peso do leito com o empuxo.

### 4.3 Reidratação como simulação da umidade pós-colheita

A Figura 4.16 mostra a umidade em função do tempo para o experimento de reidratação no equipamento Binder.

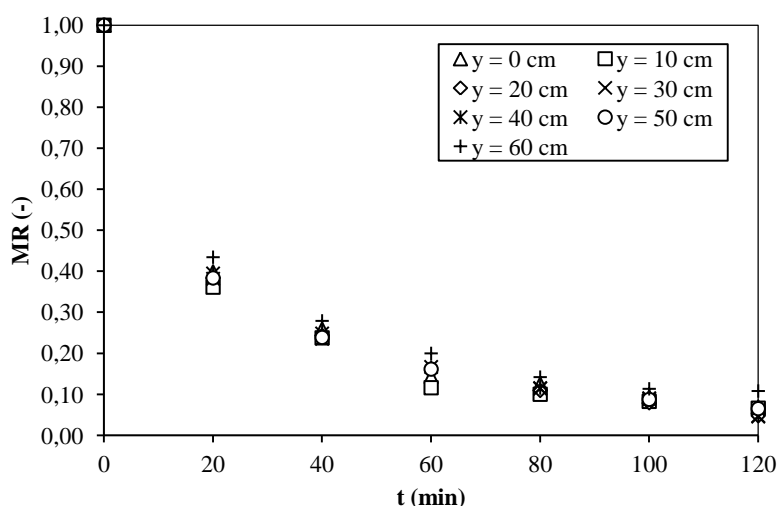


**Figura 4.16:** Umidade dos grãos de linhaça em função do tempo para o experimento de reidratação pré-secagem.

Como esperado, os grãos apresentaram tendência de aumento da umidade até uma aparente estabilização, com umidade em base seca final próxima a 0,18. Com isso, o tempo de reidratação foi fixado em cerca de 60 h. Um tempo superior a 60 h poderia resultar no crescimento de fungos e consequente perda de material.

#### 4.4 Secagem

Como um exemplo do conjunto de dados experimentais, a Figura 4.17 mostra a razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 50°C e 1 cm, parametrizada pela posição em que a amostra foi retirada.



**Figura 4.17:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 50°C e 1 cm, parametrizada na posição em que a amostra foi retirada.

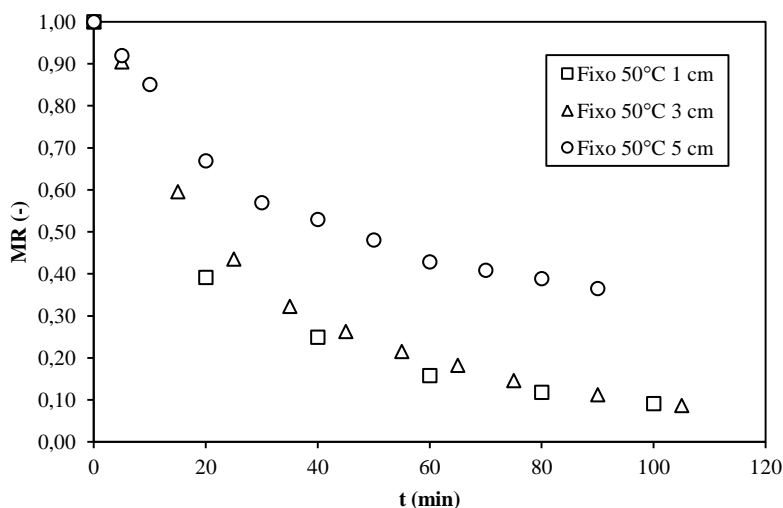
Para um mesmo tempo de secagem, a razão de umidade apresentou valores muito próximos, de onde se afirma que a secagem ocorreu à mesma taxa em todas as posições e que a distribuição de ar foi satisfatória. A partir disso, todos os dados experimentais de razão de umidade a cada instante foram representados pela média das sete posições.

Para uma melhor análise dos dados resultantes dos experimentos de secagem, eles serão primeiramente parametrizados na altura de leito estático e na vazão de ar, discutindo-se os dados com base no conceito de camada delgada nos mecanismos que controlam a transferência de calor e massa durante a secagem. Posteriormente, os mesmos dados serão parametrizados na temperatura.



#### 4.4.1 Secagem a 50°C

A Figura 4.18 mostra a razão de umidade (MR) em função do tempo para os experimentos no modo fixo a 50°C, parametrizada na altura de leito estático.



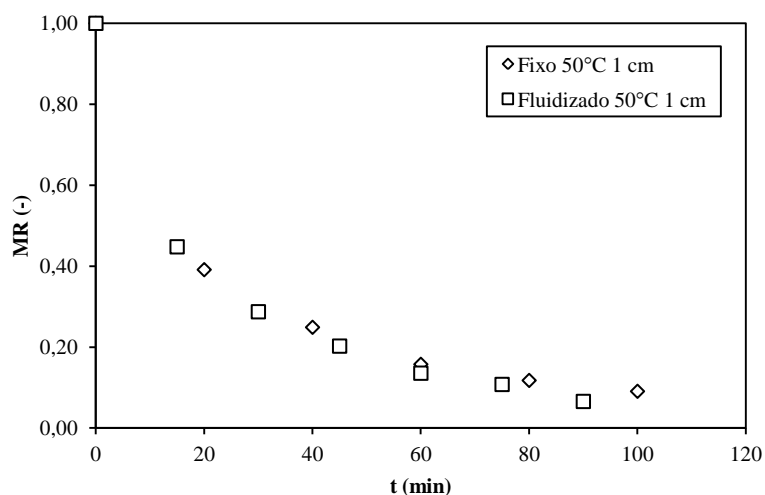
**Figura 4.18:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 50°C, parametrizada na altura de leito estático.

A secagem ocorreu praticamente da mesma forma para os leitos de 1 e 3 cm, isto é, a razão de umidade apresentou valores próximos para cada instante de amostragem. No entanto, para a altura de 5 cm, a secagem ocorreu de forma mais lenta. Isso pode ser explicado levando-se em conta que a energia que o ar fornece é a mesma nos três casos (já que a temperatura e a vazão de ar são as mesmas), mas a quantidade de material é maior, ou seja, a energia necessária para manter a mesma taxa de secagem é maior quanto maior a altura de leito. Por outro lado, a energia adicional necessária para manter a mesma taxa de secagem entre as alturas de leito estático de 1 e 3 cm não é suficientemente alta para ser “mensurável”; o que define a espessura de camada delgada, conforme discutido na seção 2.2. Portanto, afirma-se que a espessura da camada delgada deve estar compreendida entre 3 e 5 cm para a temperatura de 50°C.

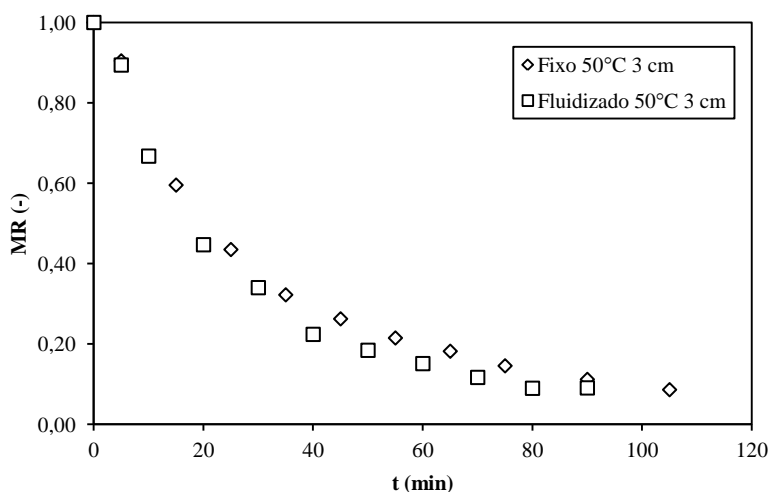
As Figuras 4.19 a 4.21 mostram a razão de umidade em função do tempo para 50°C, parametrizada no tipo de leito, para cada altura de leito estático.

Não há influência significativa da vazão de ar sobre a cinética de secagem para os experimentos a 1 e 3 cm. . A partir disso, afirma-se que a secagem é controlada pela difusão para os leitos de 1 e 3 cm. Entretanto, quando a altura de leito estático é

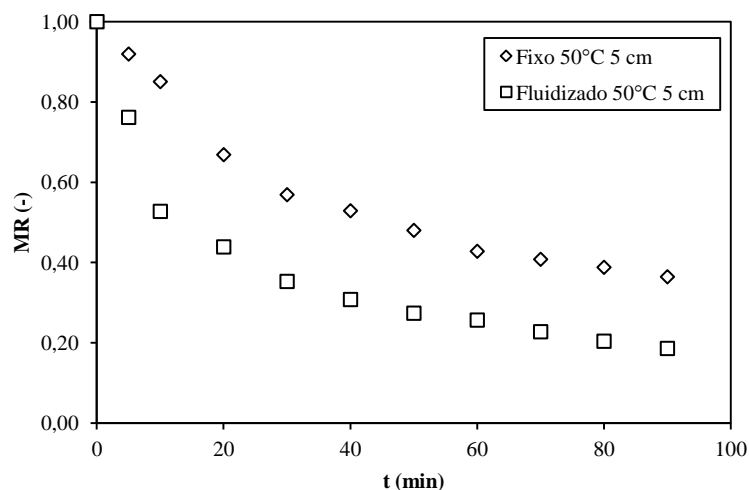
aumentada para 5 cm, a secagem ocorre mais rapidamente para o leito fluidizado em relação ao fixo. Isso é decorrente da mistura decorrente da mistura decorrente da fluidização, que faz com que (idealmente) todos os grãos estejam em contato com ar à mesma temperatura e umidade; enquanto que, no leito fixo, os grãos estão em contato com ar com maior temperatura e menor umidade na base do leito, resfriando-se e umidificando-se à medida que o ar percola o leito. Levando-se em conta que a secagem não ocorre mais em camada delgada (havendo, pois, indícios de que existem gradientes de temperatura e umidade), e visto que as amostras eram retiradas pela parte superior do leito, as amostras retiradas pela parte superior não representam a umidade de todos os grãos no leito.



**Figura 4.19:** Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 1 cm, parametrizada no tipo de leito.

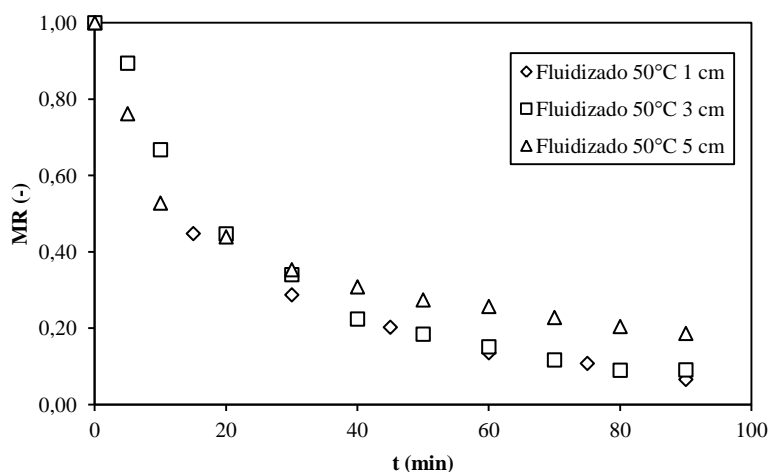


**Figura 4.20:** Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 3 cm, parametrizada no tipo de leito.



**Figura 4.21:** Razão de umidade em função do tempo para 50°C e 5 cm, parametrizada no tipo de leito.

A Figura 4.22 mostra a razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado, parametrizado na altura de leito estático.

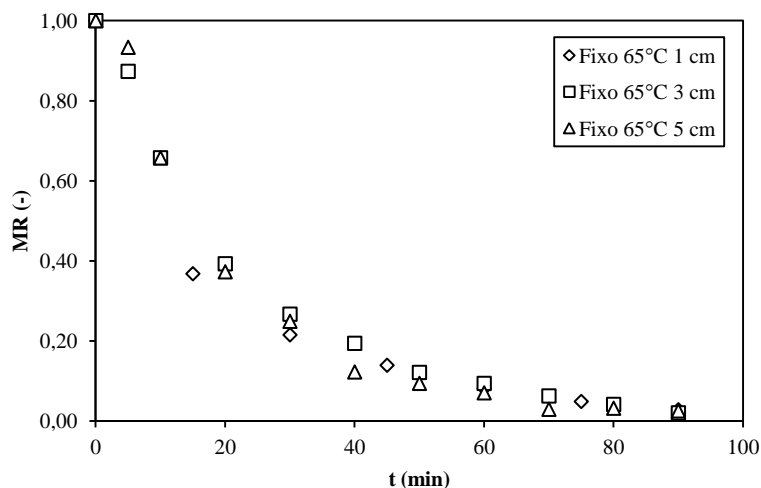


**Figura 4.22:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem a 50°C em leito fluidizado, parametrizada na altura de leito estático.

Os dados mostram que a cinética de secagem é praticamente a mesma para os três experimentos. Esse resultado é explicado devido à intensa mistura dos sólidos decorrente da fluidização, resultando em uma alta transferência convectiva de calor e massa. Com isso, o mecanismo que controla a secagem é o mesmo nos três casos – a difusão da água do centro do grão até a superfície.

#### 4.4.2 Secagem a 65°C

A Figura 4.23 mostra a razão de umidade em função do tempo para os experimentos no modo fixo a 65°C, parametrizada na altura de leito estático.



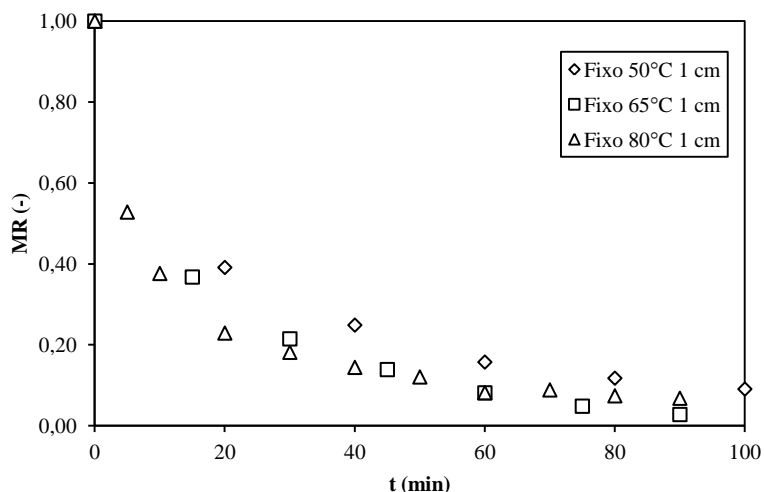
**Figura 4.23:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo a 65°C, parametrizada na altura de leito estático.

A secagem ocorreu de forma semelhante nestes três experimentos. Assim como discutido na Figura 4.18, pode-se afirmar que nestes três casos, a secagem ocorreu em camada delgada e que, para a temperatura de 65°C, a espessura de camada delgada é igual ou superior a 5 cm. Uma vez que o secador permite alturas de leito estático de até 5 cm somente, não foi possível obter um intervalo para a espessura de camada delgada em temperaturas superiores a 65°C.

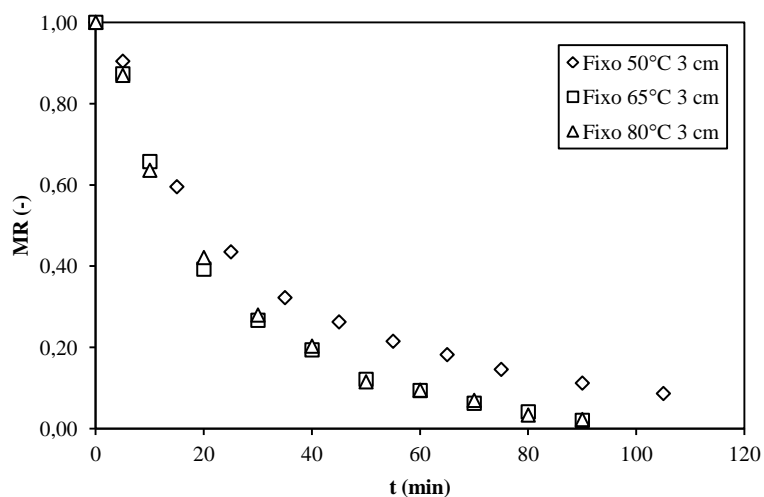
Em consequência de a espessura de camada delgada ser superior a 5 cm para as temperaturas superiores a 65°C, a secagem ocorreu de forma semelhante quando se comparam os experimentos à mesma altura de leito estático e temperatura, variando-se o tipo de leito (fixo ou fluidizado), resultando nas mesmas análises já feitas na Figura 4.19 e na Figura 4.21.

#### 4.4.3 Influência da temperatura

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram a razão de umidade em função do tempo para as secagens em leito fixo a 1 e 3 cm, respectivamente, parametrizadas na temperatura.



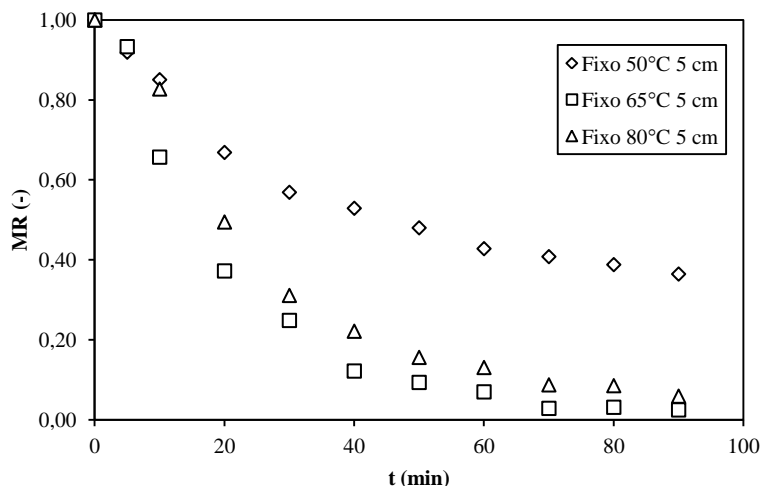
**Figura 4.24:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 1 cm, parametrizada na temperatura.



**Figura 4.25:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 3 cm, parametrizada na temperatura.

Nota-se que a influência da temperatura sobre a secagem é pequena, sendo mais notada à medida que a altura de leito estático aumenta. Já que a secagem é controlada pela difusão para estas alturas de leito estático (conforme discutido sobre a Figura 4.19 e Figura 4.20), então, pode-se afirmar que a influência da temperatura sobre a difusão é pequena para estes casos.

A Figura 4.26 mostra a razão de umidade em função do tempo para as secagens em leito fixo a 5 cm, parametrizadas na temperatura.

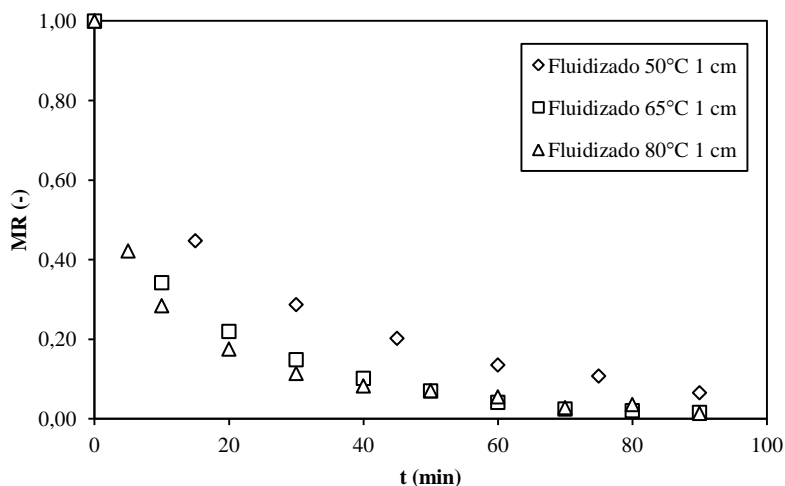


**Figura 4.26:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fixo e altura de leito estático de 5 cm, parametrizada na temperatura.

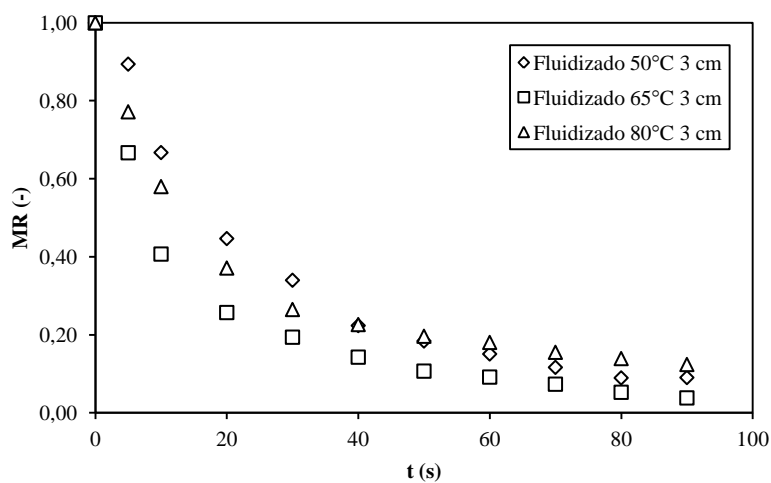
A proximidade entre os dados experimentais a 65°C e 80°C também podem ser explicados pela pequena influência da temperatura sobre a difusão, fato já observado nos demais dados.

Convém lembrar que o “primeiro” mecanismo de transferência de calor é a convecção, isto é, o ar transfere calor aos grãos através da convecção, para que haja aquecimento dos grãos, necessário para a vaporização da água e posterior transferência de massa. Assim, à temperatura de 50°C, os dados da Figura 4.26 indicam que essa energia transferida por convecção ainda é limitante, já que a secagem foi mais lenta neste caso. Isso não ocorreu para as temperaturas de 65 e 80°C, onde houve energia disponível e somente a difusão controlou o processo.

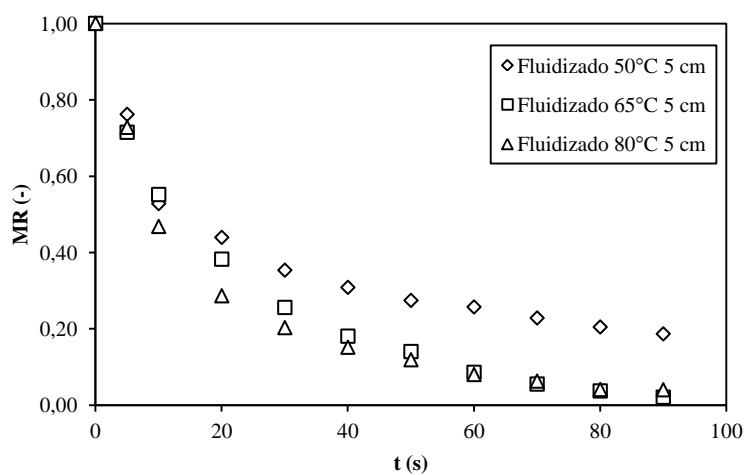
As Figuras 4.27 a 4.29 mostram a razão de umidade em função do tempo para os experimentos em leito fluidizado, parametrizadas pela temperatura, para os leitos de 1, 3 e 5 cm, respectivamente.



**Figura 4.27:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 1 cm, parametrizada na temperatura.



**Figura 4.28:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 3 cm, parametrizada na temperatura.



**Figura 4.29:** Razão de umidade em função do tempo para a secagem em leito fluidizado e altura de leito estático de 5 cm, parametrizada na temperatura.

Assim como observado anteriormente, a temperatura exerce pouca influência sobre a taxa de secagem em leito fluidizado, sendo levemente mais significativa quanto menor a altura do leito. O fato de a fluidização aproximar o leito a uma mistura perfeita faz com que o mecanismo controlador da secagem seja a difusão, que é pouco influenciada pela temperatura nas condições analisadas. Mesmo assim, o aporte de energia térmica ao sistema limita a secagem para a temperatura de 50°C, analogamente ao que ocorreu para o leito fixo (Figura 4.26).

#### 4.4.4 Ajustes dos modelos de secagem em camada delgada

A Tabela 4.2 mostra as constantes cinéticas dos modelos de Lewis, de Page e de Overhults ajustadas aos dados experimentais de secagem em leito fixo.

Para os experimentos à temperatura de 50°C ou 65°C, o coeficiente de determinação apresentou valores superiores a 0,95, o que indica um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Porém, à temperatura de 80°C, o coeficiente de determinação não foi superior a 0,9 em nenhum dos casos. Devido à alta temperatura, pode ter ocorrido a desnaturação de componentes dos grãos de linhaça, fazendo com que tenha havido mudanças de composição química, afetando a cinética de secagem.

Em todos os casos, o modelo de Lewis apresentou uma soma de quadrados dos resíduos superior ao dos outros dois modelos. Isso é consequência do fato de o modelo de Lewis apresentar somente um parâmetro ( $k$ ). Com o parâmetro  $n$ , os modelos de Page e de Overhults apresentam um “grau de liberdade maior”, melhorando o ajuste.

O parâmetro  $n$ , a soma dos quadrados dos resíduos e o coeficiente de determinação dos modelos de Page e de Overhults apresentam o mesmo valor em todos os ajustes. O resultado era esperado, já que um simples rearranjo das equações e uma parametrização permitem verificar que as equações são equivalentes. De fato, é comum que o modelo de Overhults seja denominado na literatura como “modelo de Page modificado”. A vantagem do modelo de Overhults em relação ao de Page é que, naquele modelo, a constante  $k$  tem dimensão de inverso de unidade de tempo; enquanto neste, a dimensão é dependente do valor de  $n$ . Mesmo que o parâmetro  $k$  não tenha interpretação física em ambos os modelos, o fato de a dimensão do parâmetro no modelo de



Overhults ser independente de  $n$  permite que o parâmetro  $k$  seja um índice da taxa de secagem, em analogia ao modelo de Lewis.

**Tabela 4.2:** Constantes cinéticas dos modelos de Lewis, de Page e de Overhults ajustadas aos dados experimentais de secagem em leito fixo.

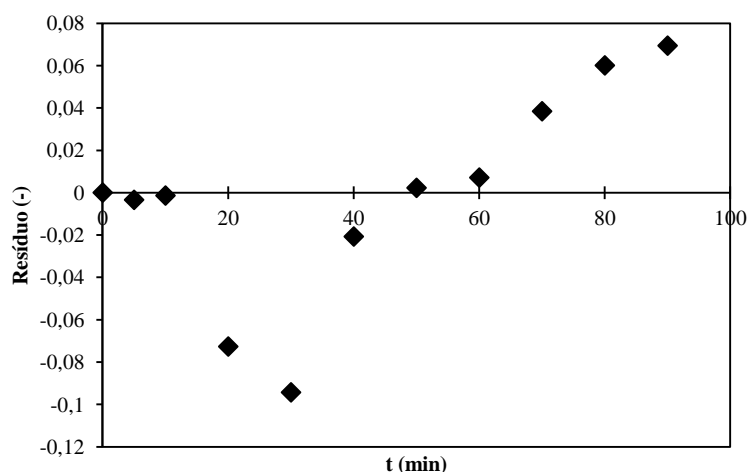
<b>T (°C)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Lewis</b>	<b>Page</b>	<b>Overhults</b>
50°C	1 cm	k	0,036	0,146	0,044
		n	-	0,616	0,616
		r <sup>2</sup>	0,983	0,999	0,999
		SQR	0,024	4,75 10 <sup>-4</sup>	4,75 10 <sup>-4</sup>
	3 cm	k	0,029	0,045	0,030
		n	-	0,886	0,886
		r <sup>2</sup>	0,989	0,991	0,991
		SQR	0,013	0,009	0,009
	5 cm	k	0,019	0,041	0,019
		n	-	0,807	0,807
		r <sup>2</sup>	0,974	0,985	0,985
		SQR	0,025	0,011	0,011
65°C	1 cm	k	0,055	0,156	0,064
		n	-	0,680	0,680
		r <sup>2</sup>	0,990	0,999	0,999
		SQR	0,012	6,00 10 <sup>-4</sup>	6,00 10 <sup>-4</sup>
	3 cm	k	0,042	0,037	0,042
		n	-	1,040	1,040
		r <sup>2</sup>	0,995	0,996	0,996
		SQR	0,006	0,006	0,006
	5 cm	k	0,045	0,022	0,045
		n	-	1,222	1,222
		r <sup>2</sup>	0,988	0,992	0,992
		SQR	0,022	0,012	0,012
80°C	1 cm	k	0,083	0,299	0,092
		n	-	0,507	0,507
		r <sup>2</sup>	0,637	0,620	0,620
		SQR	0,078	0,002	0,002
	3 cm	k	0,041	0,039	0,041
		n	-	1,016	1,016
		r <sup>2</sup>	0,832	0,834	0,834
		SQR	0,004	0,005	0,005
	5 cm	k	0,034	0,022	0,034
		n	-	1,130	1,130
		r <sup>2</sup>	0,853	0,864	0,864
		SQR	0,020	0,017	0,017

A Tabela 4.3 mostra a quantidade de ajustes dos modelos de camada delgada cujo resíduo se mostrou aleatório ou tendencioso, o que evidencia a qualidade do ajuste.

**Tabela 4.3:** Análise dos resíduos dos ajustes dos modelos cinéticos de secagem em leito fixo.

Tendência do ajuste	Lewis	Page	Overhults
Aleatório	4	8	8
Tendencioso	5	1	1

A causa para o modelo de Lewis ter apresentado mais ajustes tendenciosos do que os demais é o fato de ele ter somente um parâmetro, enquanto que os demais apresentam dois. Ressalta-se, porém, que essa afirmação não pode ser generalizada, já que ajustes podem se tornar tendenciosos devido ao excesso de parâmetros (*overfitting* ou superajuste). Como forma de exemplificar a tendência observada no ajuste do modelo de Lewis, a Figura 4.30 mostra um gráfico de resíduos para este ajuste.



**Figura 4.30:** Resíduo do ajuste do modelo de Lewis aos dados de secagem em leito fixo, a 50°C e 5 cm de altura de leito estático em função do tempo de secagem.

Devido ao bom ajuste aos dados experimentais, à possibilidade de interpretação física do parâmetro  $k$  do modelo e da aleatoriedade dos resíduos, o modelo de Overhults foi escolhido como sendo o mais adequado para representar a secagem dos grãos em camada delgada.

#### 4.4.5 Ajuste do modelo difusivo truncado

A escolha do termo da série em que foi feito o truncamento foi feita com base no valor da parcela após o ajuste. Verificou-se que, a partir do décimo termo, o valor do termo da soma para o instante inicial foi menor que 0,01, considerado suficientemente pequeno. Portanto, para todos os ajustes do modelo difusivo, a série foi truncada no décimo termo.

A Tabela 4.4 mostra os parâmetros resultantes do ajuste do modelo difusivo truncado para as secagens controladas pela difusão.

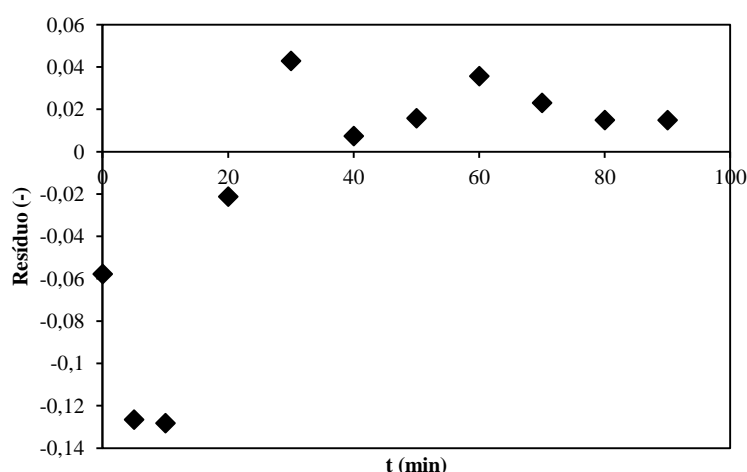
**Tabela 4.4:** Parâmetros de ajuste do modelo difusivo truncado para o leito fixo.

T (°C)	h (cm)	Parâmetro	Valor
50	1 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,90 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,994
		SQR	0,006
	3 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,47 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,979
		SQR	0,048
	5 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$8,40 \cdot 10^{-10}$
		$r^2$	0,979
		SQR	0,041
65°C	1 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$3,00 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,998
		SQR	0,004
	3 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,16 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,974
		SQR	0,077
	5 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,3310^{-9}$
		$r^2$	0,953
		SQR	0,126
80°C	1 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$3,60 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,978
		SQR	0,023
	3 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,13 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,977
		SQR	0,071
	5 cm	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,80 \cdot 10^{-9}$
		$r^2$	0,945
		SQR	0,085

O modelo difusivo se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais, visto que o coeficiente de determinação foi próximo à unidade. Uma das fontes de erro é o fato de a razão de umidade inicial, que por definição é igual a um, apresentou um valor próximo a 0,95 em todos os ajustes. Um truncamento em termos de ordem superior aproximaria o valor da razão de umidade inicial a um e, conseqüentemente, melhoraria o ajuste, mas exigiria um tempo computacional maior. A aproximação da forma do grão para uma esfera é também uma fonte de pequenos desvios.

A difusividade mássica efetiva decresceu com o aumento da altura de leito estático em todas as temperaturas analisadas. A razão para que isso tenha ocorrido é a própria definição do parâmetro: trata-se de uma ferramenta de modelagem para simplificação de todos os fenômenos de transferência de massa que ocorrem na secagem, supondo que eles possam ser representados por um único fenômeno difusivo *efetivo*. Por haver outros menos significativos, mas que dependam de variáveis extensivas (principalmente a convecção), a difusividade mássica efetiva pode se tornar uma propriedade extensiva.

Os resíduos de somente um dos ajustes do modelo difusivo truncado aos dados de secagem em leito fixo não apresentou tendência (a 65°C e 1 cm de leito estático). Como exemplificação da tendência dos resíduos, a Figura 4.31 mostra um dos gráficos de resíduos do ajuste do modelo difusivo.

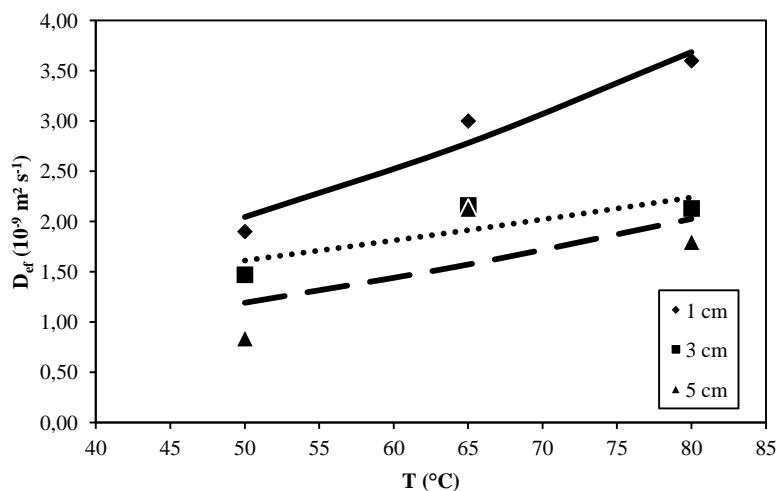


**Figura 4.31:** Resíduo do ajuste do modelo difusivo truncado aos dados de secagem em leito fixo, a 50°C e 5 cm de altura de leito estático em função do tempo de secagem.

Em grande parte dos dados, a secagem foi superestimada nos tempos iniciais (resíduos negativos) e subestimada nos tempos finais (resíduos positivos). Uma das

causas é o erro de truncamento; visto que o adimensional  $D_{ef}\pi^2 t/r^2$ , que determina o erro de truncamento, é menor nos tempos iniciais. Além disso, o modelo difusivo truncado apresenta somente um parâmetro ajustável (a difusividade mássica efetiva). Dessa forma, assim como o que ocorreu com o modelo de Lewis para a secagem em camada delgada, o “grau de liberdade” para o ajuste é menor.

A Figura 4.32 mostra a difusividade mássica efetiva em função da temperatura, parametrizada pela altura de leito estático, com seus respectivos ajustes de Arrhenius. Na Tabela 4.5, mostram-se os resultados dos ajustes mostrados na Figura 4.32.



**Figura 4.32:** Difusividade mássica efetiva em função da temperatura para as secagens em leito fixo, parametrizada pela altura de leito estático.

**Tabela 4.5:** Parâmetros do ajuste de Arrhenius para as secagens em leito fixo.

Parâmetro	1 cm	3 cm	5 cm
$D_0$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$2,12 \cdot 10^{-6}$	$7,84 \cdot 10^{-8}$	$6,16 \cdot 10^{-7}$
$E_a$ (J mol <sup>-1</sup> )	$1,87 \cdot 10^4$	$1,04 \cdot 10^4$	$1,68 \cdot 10^4$
$r^2$	0,949	0,695	0,462
SQR	0,076	0,092	0,485

No geral, o modelo de Arrhenius não apresentou bom ajuste aos dados. Uma das principais razões para isso é o fato de este ser um ajuste resultante de dados que já são resultado de outro ajuste, isto é, a difusividade mássica efetiva utilizada no ajuste do modelo de Arrhenius é proveniente do ajuste do modelo difusivo, que está sujeito a erros de truncamento e de ajuste. Outra razão para isso é a forte dependência da

difusividade mássica efetiva com a temperatura fornecida pelo modelo de Arrhenius, contra a verificação experimental da fraca dependência da taxa de secagem com a temperatura no intervalo analisado.

À medida que a altura de leito estático aumenta, o modelo de Arrhenius perde a qualidade do ajuste, isto é, o coeficiente de determinação diminui. A razão para isso é a influência de outros fenômenos que não são bem representados globalmente pela difusividade mássica efetiva, assim como o que ocorreu anteriormente no ajuste do modelo difusivo truncado.

#### **4.4.6 Leito fluidizado**

A princípio, cogitou-se o uso do modelo de secagem a duas fases para o leito fluidizado devido à possibilidade de formação de gradientes de temperatura e umidade no leito. Porém, os resultados dos experimentos mostram taxas semelhantes e, conseqüentemente, mostram indícios de que não há gradientes de temperatura e umidade no leito. Com essas considerações, as equações do modelo de secagem a duas fases resultam em identidades matemáticas, impossibilitando seu uso. Devido a isso, utilizaram-se os mesmos modelos cinéticos anteriores (Lewis, Page, Overhults e difusivo). A Tabela 4.6 mostra os resultados dos ajustes a estes modelos.

Assim como o que ocorreu na secagem em leito fixo, o modelo de Page e de Overhults foram os que, no geral, apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais. Analogamente, escolhe-se o modelo de Overhults como sendo o mais apropriado para representar a cinética de secagem em leito fluidizado, pelas mesmas razões: melhores ajustes e possibilidade de interpretação física do parâmetro  $k$ , devido à analogia com a taxa de secagem do modelo de Lewis.

**Tabela 4.6:** Parâmetros dos modelos cinéticos ajustados aos dados de secagem em leito fluidizado.

T (°C)	h (cm)	Parâmetro	Lewis	Page	Overhults	Difusivo		
50	1 cm	k	0,04	0,131	0,047	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$2,15 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,664	0,664			
		$r^2$	0,983	0,999	0,999			
		SQR	0,021	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$4,84 \cdot 10^{-3}$			$r^2$
	3 cm	k	0,035	0,046	0,035	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$1,70 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,924	0,924			
		$r^2$	0,990	0,991	0,991			
		SQR	0,012	0,011	0,011			$r^2$
	5 cm	k	0,032	0,152	0,032	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$1,49 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,55	0,55			
		$r^2$	0,930	0,985	0,985			
		SQR	0,089	0,009	0,009			$r^2$
65°C	1 cm	k	0,113	0,607	0,260	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$5,48 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,371	0,371			
		$r^2$	0,951	0,988	0,988			
		SQR	0,058	0,009	0,009			$r^2$
	3 cm	k	0,065	0,152	0,067	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$3,10 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,696	0,696			
		$r^2$	0,986	0,995	0,995			
		SQR	0,030	0,004	0,004			$r^2$
	5 cm	k	0,048	0,094	0,05	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$2,40 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,786	0,786			
		$r^2$	0,992	0,999	0,999			
		SQR	0,015	0,001	0,001			$r^2$
80°C	1 cm	k	0,130	0,389	0,152	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$5,84 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,501	0,501			
		$r^2$	0,975	0,999	0,999			
		SQR	0,044	$2,83 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$			$r^2$
	3 cm	k	0,041	0,106	0,042	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$1,95 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,708	0,708			
		$r^2$	0,973	0,987	0,987			
		SQR	0,039	0,009	0,009			$r^2$
	5 cm	k	0,059	0,115	0,060	$D_{ef} (m^2 s^{-1})$	$2,87 \cdot 10^{-9}$	
		n	-	0,769	0,769			
		$r^2$	0,988	0,994	0,994			
		SQR	0,022	0,007	0,007			$r^2$
							SQR	0,019

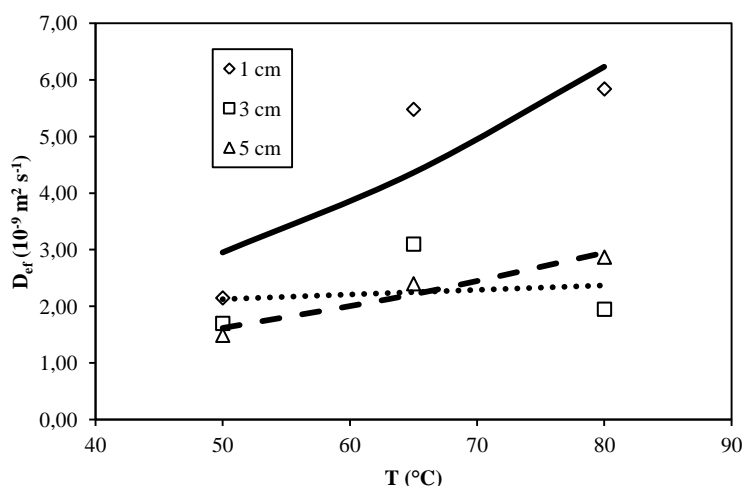
A Tabela 4.7 mostra a quantidade de ajustes dos modelos cujo resíduo se mostrou aleatório ou tendencioso, o que evidencia a qualidade do ajuste.

**Tabela 4.7:** Análise dos resíduos dos ajustes dos modelos aos dados de secagem em leito fluidizado.

Tendência do ajuste	Lewis	Page	Overhults	Difusivo
aleatório	0	3	3	2
tendencioso	9	6	6	7

Em geral, os resíduos também apresentaram tendência. Em relação aos dados da Tabela 4.3, percebe-se que mais ajustes aos dados de secagem em leito fluidizado foram tendenciosos em relação aos de leito fixo, exceto pelo modelo difusivo. As razões para as tendências dos resíduos são as mesmas: o menor “grau de liberdade” para os modelos de Lewis e difusivo, por serem modelos com somente um parâmetro ajustável e o erro de truncamento do modelo difusivo.

A Figura 4.33 mostra a difusividade mássica efetiva em função da temperatura, para as secagens em leito fluidizado, parametrizada pela altura de leito estático. A Tabela 4.8 mostra os resultados dos ajustes do modelo de Arrhenius para estes dados.

**Figura 4.33:** Difusividade mássica efetiva em função da temperatura para as secagens em leito fluidizado, parametrizada pela altura de leito estático.**Tabela 4.8:** Parâmetros do ajuste de Arrhenius para as secagens em leito fluidizado.

Parâmetro	1 cm	3 cm	5 cm
$D_0$ ( $m^2 s^{-1}$ )	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$7,56 \cdot 10^{-9}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$
$E_a$ ( $J mol^{-1}$ )	$2,37 \cdot 10^4$	$3,40 \cdot 10^3$	$1,90 \cdot 10^4$
$r^2$	0,756	0,031	0,942
SQR	2,049	1,080	0,057



Em geral, o modelo de Arrhenius novamente não apresentou bom ajuste aos dados experimentais. A razão para a má qualidade do ajuste é a mesma para as secagens em leito fixo: os dados utilizados são provenientes de outro ajuste (do modelo difusivo), que está sujeito a erros de truncamento e de ajuste; e o fato de o modelo de Arrhenius fornecer uma forte dependência com a temperatura, mas os dados experimentais mostram o oposto.

## CONCLUSÕES

A partir dos dados experimentais apresentados, conclui-se:

- O método “tradicional” de reidratação, ou seja, a adição direta de água, não garante que a umidade do material seja igual à calculada previamente e não distribui uniformemente a água adicionada.
- A condutividade térmica efetiva é uma variável que pode ser usada como critério para a análise do equilíbrio de sorção de água.
- A umidade de equilíbrio ao final do experimento foi próxima à reportada na literatura e bem distribuída nas três porções do cilindro.
- No geral, as propriedades físicas da linhaça (condutividade térmica efetiva, densidade dos grãos e do leito) não apresentam forte dependência com a umidade. Os valores médios obtidos foram:  $(78 \pm 4) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para a condutividade térmica efetiva,  $(4,2 \pm 0,6) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para o calor específico,  $(1157 \pm 60) \text{ kg m}^{-3}$  para a densidade dos grãos e  $(649 \pm 20) \text{ kg m}^{-3}$  para a densidade do leito.
- A forma não-esférica dos grãos de linhaça influencia no comportamento fluidodinâmico do leito.
- Além da forma dos grãos, o fato de o distribuidor de ar ser a própria esteira contribuiu para a formação de canais preferenciais e para que o comportamento do leito fosse análogo de um leito de jorro para vazões crescentes.
- A equação de Wen e Yu (1966) apresentou melhor correspondência aos dados experimentais de velocidade de mínima fluidização que a equação de Lucas *et al.* (1986).
- A altura de leito estático é um fator a ser considerado na caracterização fluidodinâmica do leito, sobretudo quanto à queda de pressão de mínima fluidização. A equação de Ergun, baseada em escoamento em meios porosos, apresentou melhor correspondência aos dados experimentais para os leitos de 3 e 5 cm, enquanto a equação proveniente do balanço de forças foi a que melhor representou para o leito de 1 cm.
- A espessura de camada delgada para a linhaça à temperatura de 50°C está compreendida entre 3 e 5 cm, enquanto que para as demais temperaturas analisadas (65 e 80°C), a espessura de camada delgada é superior a 5 cm.

- Na maioria dos experimentos de secagem, o mecanismo controlador foi a difusão efetiva.
- A temperatura exerceu pequena influência sobre a taxa de secagem.
- Em geral, os resíduos do ajuste do modelo de Lewis e do modelo difusivo truncado apresentaram tendência, superestimando a taxa de secagem em tempos iniciais e a subestimando no final do processo.
- Dentre os modelos analisados, o mais adequado para representar a cinética de secagem de linhaça em todas as condições analisadas foi o modelo de Overhults.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Para a continuidade da pesquisa iniciada neste trabalho, sugere-se:

- a) Garantir se há sorção ou dessorção de água durante os experimentos na “sonda linear modificada”, fazendo com que a nova metodologia seja uma efetiva junção dos métodos de obtenção de isotermas de equilíbrio e da sonda linear.
- b) Controlar a temperatura externa ao equipamento da “sonda linear modificada”, de forma a garantir que a temperatura seja constante para a determinação de isotermas de equilíbrio.
- c) Testar a “sonda linear modificada” para outros materiais mais higroscópicos que a linhaça, verificando a validade da metodologia.
- d) Verificar a causa da mudança das propriedades térmicas (calor específico e condutividade térmica efetiva) da linhaça a altas umidades.
- e) Verificar algum parâmetro de qualidade da secagem além da umidade em si.

A sugestão (e) é feita não só devido ao ajuste de menor qualidade para as secagens em leito fixo a 80°C, mas também porque experimentalmente verificou-se que, após as análises de umidade a 105°C por 24 h, os grãos de linhaça apresentaram uma coloração mais escura que anteriormente, indicando que pode ter havido mudança de composição química dos grãos. Além disso, Tuyen *et al.* (2009) afirmam que secagens a temperaturas elevadas causam danos mecânicos aos grãos devido ao alto gradiente de umidade em seu interior.

Um exemplo de variável que pode medir essa mudança é a composição do óleo extraído antes e após a secagem. Esta sugestão já foi parcialmente feita por Valente *et al.* (2009) e Melo *et al.* (2009), através de planejamentos fatoriais. Ou ainda, pode-se analisar a resistência mecânica dos grãos, em analogia ao trabalho de Tuyen *et al.* (2009).

- f) Realização de experimentos de secagem no modo esteira na melhor condição experimental dentre as analisadas, verificando-se a reprodutibilidade das condições do modo fixo ou fluidizado.

A “melhor” condição experimental será aquela que gerar a maior taxa de secagem para a maior quantidade de material possível e, ao mesmo tempo, ser mais “energeticamente eficiente”. Sugere-se, então, a condição de secagem em leito fixo a 80°C e 5 cm. A altura de 5 cm garante a maior vazão de sólidos para o modo contínuo e, para a temperatura de 80°C (maior gradiente de temperatura), o leito fluidizado apresenta uma taxa de secagem muito próxima a do leito fixo, não havendo ganho significativo de “eficiência energética” com o uso de uma vazão superior.

Espera-se que os resultados destes experimentos sejam os mesmos da secagem em batelada, ou seja, espera-se que as taxas de secagem sejam as mesmas, já que as condições de temperatura, altura de leito estático e velocidade do ar são as mesmas. Porém, por se tratar de uma secagem contínua, deverá ser feita uma mudança do tratamento dos dados e do procedimento experimental: devem ser escolhidos níveis de velocidade tais que o “tempo de residência” dos grãos de linhaça na esteira seja suficiente para que o teor de umidade diminua a níveis aceitáveis (iguais à umidade antes da reidratação). Como a velocidade da esteira será conhecida, a cada posição do leito está associado um tempo de secagem. Com isso, novas amostras retiradas do leito já são correspondentes a réplicas do experimento. Fundamentalmente, é uma mudança de linguagem euleriana (referencial fixo) para lagrangeana (referencial com a mesma velocidade da esteira).

## REFERÊNCIAS

- ARNOSTI JÚNIOR, S. **Desenvolvimento de um secador transportador do tipo esteira com escoamento cruzado e caracterização de sementes de gramíneas.** São Carlos: UFSCar, 1997. 232 p. Doutorado (Engenharia Química).
- ARRIECHE, L. S.; PICELLI, R. M.; SARTORI, D. J. M. Drying and characterization of pioneer arboreal seeds. **Proceedings of the 17th International Drying Symposium (IDS)**. Magdeburg. 2010. p. 883-889.
- AVIARA, N. A.; HAQUE, M. A. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 47, 2001. P. 103-109.
- BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados.** São Carlos: UFSCar, 1995. 163 p. Doutorado (Engenharia Química).
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Econômico. MDIC - ALICE Web, 2011. Disponível em: <<http://www.aliceweb.desenvolvimento.gov.br>>. Acesso em 7 de julho de 2011.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of oilseeds.** New York: An Avi, 1992. 450 p.
- CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, 29, 2007. 28-37.
- CAVALIERI, F. L. B.; SANTOS, G. T.; SILVA, D. C.; RIGOLON, L. P.; DAMASCENO, J. C.; CAPOVILLA, L. C.; BETINI, C. M.; S., RAMOS F.; PETIT, H. V. Digestibilidade e metabólitos sanguíneos de vacas da raça Holandesa superovuladas que receberam Lac100® ou linhaça em grão como fontes de gordura. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v. 61 n. 4, 2009. 896-902.
- CORRÊA, L. J.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Análise do processo de secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado. **Livro de Resumos do XXXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados.** Vassouras. 2011. p. 261.
- COSKUNER, Y.; KARABABA, E. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 78, 2007. 1067-1073.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion.** 2ª. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.
- CUNNANE, S. C.; GANGULI, S.; MENARD, C.; LIEDE, A. C.; HAMADEH, M. J.; CHEN, Z.-Y.; WOLEVER, T. M. S.; JENKINS, D. J. A. High  $\alpha$ -linolenic acid flaxseed (*Linum usitatissimum*): some nutritional properties in humans. **British Journal of Nutrition**, v. 69, 1993. 443-453.
- DADALI, G.; KILIÇ, K. A.; ÖZBEK, B. Estimation of effective moisture diffusivity of okra for microwave drying. **Drying Technology**, 25, 2007. 1441-1446.

- DAHL, W. J.; LOCKERT, E. A.; CAMMER, A. L.; WHITING, S. J. Effects of flax fiber on laxation and glycemic response in healthy volunteers. **Journal of Medicinal Food**, v. 8, n. 4, 2005. 508-511.
- DREW, R. L. K. The effects of duration and temperature of treatment in a prototype fluidized-bed seed treatment on the subsequent germination of seed of oilseed rape *Brassica napus* L. **Seed Science and Technology**, 17, 1987. 7-13.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (Eds.). **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 340 p.
- FEDENIUK, R. W.; BILIADERIS, C. G. Composition and physicochemical properties of linseed (*Linum usitatissimum* L.) mucilage. **J. Agric. Food Chem.**, 42, 1994. 240-247.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO Statistics. FAOSTAT, 2011. Disponível em: <<http://www.faostat.fao.org>>. Acesso em 6 de julho de 2011.
- 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**, 23, 2005. 1453-1464.
- FUMAGALLI, F. **Estudo da secagem das sementes de *Brachiaria brizantha***. São Carlos: UFSCar, 2007. 149 p. Doutorado (Engenharia Química).
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Research Engineering**, v. 7, 1961. 85-89.
- INPRASIT, C.; NOOMHORM. Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. **Drying Technology**, 19, 2001. 389-404.
- JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. Grain property values and their measurement. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. Cap. 24, p. 575-600.
- KAMINSKI, W.; KUDRA, T. Equilibrium moisture relations for foods and bio-materials. In: MUJUMDAR, A. S. **Drying Technology in Agriculture and Food Sciences**. 1ª ed. Enfield: Science Publishers, Inc., 2000. Cap. 1, p. 1-33.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1969. 534 p.
- KUROZAWA, L. E.; PARK, K. J.; HUBINGER, M. D.; MURR, F. E. X.; AZOLBERL, P. M. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). **Brazilian Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 1, 2008. 78-85.
- LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized bed dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed. Taylor & Francis Group, Inc., 2006. Cap. 8, p. 174-199.

- LIMA, R. A. B. **Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados utilizando partículas planas**. São Carlos: UFSCar, 2009. 150 p. Mestrado (Engenharia Química).
- LUCAS, A.; ARNALDOS, J.; CASAL, J.; PUIGJANER, L. Improved equation for the calculation of the minimum fluidization velocity. **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, 1986. 426-429.
- MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais**. São Carlos: UFSCar, 2008. 293 p. Doutorado (Engenharia Química).
- MASSARANI, G.; SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido. *In*: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: UFSCar, v. 1, 1992.
- MAZZA, G.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. D. G. Moisture sorption isotherms of flax seed. **Transactions of the ASAE**, v. 33 n. 4, 1990. 1313-1318.
- MELO, T. L.; COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G. Análise do processo de secagem em leito fluidizado de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.). **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. Uberlândia. 2009. CD-ROM.
- MIRANDA, V. H. P.; VIEIRA, G. N. A.; FREIRE, J. T. Cinética de secagem de sementes de gramíneas em secador tipo esteira, em leito fixo e fluidizado. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. Maringá. 2011. CD-ROM.
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; CHAGURI, L.; OLIVEIRA, H. Drying of chestnuts (*Castanea sativa* Mill.) after osmotic dehydration with sucrose and glucose solutions. **Drying Technology**, 25, 2007. 1837-1845.
- OPLINGER, E. S.; OELKE, E. A.; DOLL, J. D.; BUNDY, L. G.; SCHULER, R. T. **Flax**. 1997. Disponível em <<http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/flax.html>>. Acesso em 29 de novembro de 2010.
- PARDESHI, I. L.; ARORA, S.; BORKER, P. A. Thin-layer drying of green peas and selection of a thin-layer drying model. **Drying Technology**, 27, 2009. 288-295.
- PELL, M.; DUNSON, J. B. Gas-solid operations and equipment. *In*: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's Handbook of Chemical Engineering**. 7ª ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1999. p. 17-2 - 17-51.
- PEREIRA, A. V. **Caracterização e secagem de sementes de painço (*Setaria italica* L.)**. São Carlos: UFSCar, 2010. 92 p. Mestrado (Engenharia Química).
- PÉTIT, H. V. Antioxidants and dairy production: the example of flax. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, 2009. 352-361.
- PIETROBON, C. L. R. **Desenvolvimento de sistemas para a determinação da condutividade térmica**. São Carlos: UFSCar, 1988. 122 p. Mestrado (Engenharia Química).



- PITA, M. C. G.; PIBER NETO, E.; NAKAOKA, L. M.; MENDONÇA JÚNIOR, C. X. Efeito da adição de ácidos graxos insaturados e de vitamina E à dieta de galinhas e seu reflexo na composição lipídica e incorporação de  $\alpha$ -tocoferol na gema do ovo. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 41, 2004. 25-31.
- PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. São Carlos: UFSCar, 2004. 190 p. Doutorado (Engenharia Química).
- RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Propriedades térmicas de grãos de trigo: determinação e modelagem. **Ciência agrotécnica**, v. 31, n. 2, 2007. 462-467.
- RIZZI JÚNIOR, A. C. **Secagem de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em leito fluidizado**. São Carlos: UFSCar, 2008. 137 p. Doutorado (Engenharia Química).
- SARTORI, D. J. M. **Transferência de calor em leito deslizante**. São Carlos: UFSCar, 1986. 219 p. Doutorado (Engenharia Química).
- SELVI, K. Ç.; PINAR, Y.; YESILOGLU, E. Some physical properties of linseed. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 4, 2006. 607-612.
- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; FARIAS, V. S. O.; GOMES, J. Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation. **Drying Technology**, 30, 2012. 164-174.
- SINGH, K. K.; GOSWAMI, T. K. Thermal properties of cumin seed. **Journal of Food Engineering**, v. 45, 2000. 181-187.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- TUYEN, T. T. T. V.; FUKAI, S.; BHANDARI, B. Effects of high-temperature fluidized bed drying and tempering on kernel cracking and milling quality of Vietnamese rice varieties. **Drying Technology**, v. 27, p. 486-494, 2009.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. National Nutrient Database for Standard Reference. Disponível em:  
<<http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/>>. Acesso em 18 agosto de 2010.
- VALENTE, M. C. C.; SANTANA, E. B.; FARIA, L. J. G.; COSTA, C. M. L. Análise do processo de secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito fluidizado. **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Campinas: Unicamp. 2009. p. 1175-1183. CD-ROM.
- WANG, B.; LI, D.; WANG, L.-J.; HUANG, Z.-G.; ZHANG, L.; CHEN, X.-D.; MAO, Z.-H. Effect of moisture content on the physical properties of fibered flaxseed. **International Journal of Food Engineering**, v. 3, n. 5, 2007. 1-11.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **American Institute of Chemical Engineering (AIChE) Journal**, New York, 2, 1966. 610-612.

ZOTIN, F. M. Z. **O efeito de parede em colunas de recheio**. São Carlos: UFSCar, 1985. 85 p. Dissertação (Engenharia Química).