

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

ABIGAIL VASCONCELOS PEREIRA

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE SEMENTES DE PAINÇO
(Setaria italica L.)

SÃO CARLOS

2010

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE SEMENTES DE PAINÇO
(*Setaria italica* L.)

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

ABIGAIL VASCONCELOS PEREIRA

CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE SEMENTES DE PAINÇO
(Setaria italica L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Orientação: Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira

SÃO CARLOS

2010

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

P436cs

Pereira, Abigail Vasconcelos.

Caracterização e secagem de sementes de painço
(*Setaria italica* L.) / Abigail Vasconcelos Pereira. -- São
Carlos : UFSCar, 2010.
92 f.

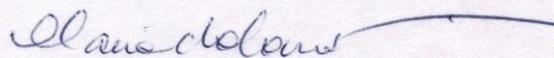
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2010.

1. Condutividade térmica. 2. Gramínea. 3. Propriedades
físicas. I. Título.

CDD: 660.28247 (20^ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ABIGAIL VASCONCELOS PEREIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 20 DE AGOSTO DE 2010.

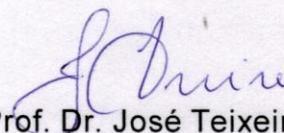
BANCA EXAMINADORA:



Profa Dra Maria do Carmo Ferreira
Orientador, UFSCar



Prof. Dr. Luis Alexandre Pedro de Freitas
USP/FCFRP



Prof. Dr. José Teixeira Freire
DEQ/UFSCar

A Santíssima Trindade,
aos meus pais, Edmundo e Fátima,
aos meus irmãos, Ezequiel, Rute e Edna
e ao meu amado Onias.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que tenho e o que sou.

Aos meus pais pelo apoio, amor e carinho incondicionais e incomparáveis.

Aos meus irmãos, pelo carinho, afeto e saudade que só eles têm.

Ao meu noivo, sempre presente em todos os momentos alegres e difíceis desta caminhada.

Aos meus queridos Sudá, Onísia e Sudanísia pela ajuda, apoio e incentivo.

À Profa. Maria do Carmo pela excelente orientação, amizade, paciência de mãe e pelo apoio desde o nosso primeiro contato.

Ao Prof. José Teixeira Freire, pela amizade, dedicação, paciência e força ao longo do curso, pela experiência de um educador e pesquisador com conselhos importantíssimos para o andamento do trabalho e pela atitude de pai para com seus orientados, comigo e com todos que receberam de alguma forma sua orientação.

À Profa. Ana Maria da Silveira pelas dicas, paciência e contribuição no decorrer do trabalho.

Aos demais professores do DEQ/UFSCar, em especial aos do Centro de Secagem que sempre deram contribuições importantes para o projeto.

Aos técnicos Oscar e Adilson por toda a ajuda e paciência nos momentos complicados devido aos equipamentos que precisavam de manutenção além dos momentos de descontração.

Ao Edilson e a Juliana pelo carinho e amizade que construímos ao longo do curso.

À Renata, Bruna e Robson pelo apoio no decorrer do trabalho, desde as disciplinas do curso.

Ao casal Victor e Maritza que me deram muito apoio e à sua pequenina filha que ganhei como sobrinha, Sami Sayarumi, pelo amor, amizade, alegria e pelas horas divertidas de brincadeiras que só uma criança pode dar.

À Amanda, Andressa, Maribel, Tatiana, Thiago, Diana, Wagner, Lana, e muitos que não caberiam em uma tese.

À Thaís, ao Charles e todos os amigos que deixei em minha terra natal e aos novos que me acolheram em seus corações como a Adriana e sua família.

A CAPES pela concessão do apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho foram determinadas as principais propriedades físico-químicas de sementes de painço (*Setaria itálica*) e sua dependência com o conteúdo de umidade e foi avaliada a secagem das sementes em diferentes condições, visando investigar os parâmetros que afetam o processo e determinar condições adequadas de secagem para a obtenção de um produto em condições de ser armazenado. Para conteúdo de umidade variando entre 13 e 30% (b.s.) foram obtidos dados das dimensões lineares (comprimento, largura e espessura), do perímetro, área superficial, volume, esfericidade, além das massas específicas, real e aparente, das sementes e sua porosidade. Foi observado que as dimensões, a esfericidade e a massa específica aparente apresentaram variação não-significativa na faixa de umidade investigada. O volume e a massa específica real aumentaram linearmente, ambos em cerca de 7%. Foi determinada ainda a condutividade térmica efetiva do leito de sementes, através do método da sonda em regime transiente. Para o leito de sementes com porosidade média de 35% foi obtida uma condutividade térmica efetiva de $0,085 \pm 0,003 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. A partir de medidas da condutividade efetiva de leitos de diferentes porosidades constituídos por sementes em pó, foi obtida a condutividade da fase sólida, igual a $0,152 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Ensaio de secagem em camada fina (leitos com espessura de 1,0 cm) foram efetuados para temperaturas do ar de secagem de 35, 40 e 45 °C e velocidades do ar de 0,5 e 1,5 m/s. Nestas condições, foi possível obter a redução de umidade desejada em cerca de 400 minutos, sendo que a variação de temperatura e velocidade do ar não afetaram o processo de forma significativa. O modelo cinético que melhor se ajustou aos dados experimentais é dado pela equação empírica de Page, com coeficientes $k=0,047$ e $n=0,74$. Os ensaios de secagem em leito fixo foram efetuados em leitos de 35,6 cm de altura e 5,8 cm de diâmetro. A permeabilidade do leito de sementes, determinada através de medidas de queda de pressão em função da velocidade do ar, é igual a $7,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. O arranjo experimental permitiu a obtenção de perfis de umidade e de temperatura ao longo da altura do leito para temperaturas do ar de secagem de 35 e 45 °C. Os resultados indicam que a umidade e temperatura variam ao longo do comprimento e em função do tempo. A umidade variou linearmente para as condições investigadas, enquanto a temperatura variou de forma não-linear, com decréscimo acentuado nas posições mais distantes da base do leito. Um comportamento característico de camada-fina, com temperatura uniforme, foi observado apenas para alturas de leito inferiores a 4 cm. A mesma coluna utilizada nos ensaios de leito fixo foi usada nos ensaios de secagem em modo fluidizado, com leitos de altura estática igual a 13 cm. A velocidade do ar de secagem foi de 0,41 m/s e as temperaturas foram novamente 35, 40 e 45 °C. Neste caso a secagem apresentou características similares às observadas para a secagem em camada fina: o tempo de secagem foi de cerca de 400 minutos, o processo não foi afetado pelo aumento de temperatura. A taxa de secagem pode ser estimada pela equação de Page, com $k=0,0268$ e $n=0,816$. A secagem em leito fluidizado é, em princípio, mais adequada do que em leito fixo pelo fato da intensa mistura evitar a formação de gradientes de temperatura e umidade. Os resultados obtidos neste trabalho podem ser úteis para a modelagem do processo de secagem e dimensionamento de secadores aplicados á sementes de painço ou de características similares.

ABSTRACT

In this work were determined the main physicochemical properties of seeds of millet (*Setaria italica*) and their dependence on the moisture content. The drying of seeds under different conditions was also evaluated in order to investigate the parameters that affect the process and determine appropriate drying conditions to have a product with adequate conditions for storage. For moisture content ranging between 13 and 30% (bs) were obtained the linear dimensions (length, width and thickness), perimeter, area, volume, sphericity. Additionally were obtained the real and apparent specific masses and the seeds porosity. It was observed that the dimensions, sphericity and bulk density did not change significantly in the range of moisture investigated. The volume and specific mass increased linearly, both around 7%. The effective thermal conductivity of the packed-bed of seeds was measured using the technique of transient regime heating probe. For the packed-bed of seeds with average porosity of 35% was obtained an effective thermal conductivity of 0.085 ± 0.003 W/m°C. From measurements of the effective thermal conductivity for beds of powdered seeds with different porosities was obtained the conductivity of the solid phase, equals to 0.152 W/m°C. Drying experiments were carried out on a thin layer of seeds (thickness of 1.0 cm) for air drying temperatures of 35, 40 and 45 °C and air velocities of 0.5 and 1.5 m/s. The desired moisture reduction was obtained in approximately 400 minutes, and it was verified that the variation of temperature and air velocity did not affect the process in the conditions evaluated. The kinetic model that best fitted experimental data is given by empirical equation of Page, with coefficients $k = 0.047$ and $n = 0.74$. The drying experiments were performed in fixed packed-beds using a 35.6 cm high and 5.8 cm diameter column. The permeability of the packed-bed of seeds, determined by measurements of pressure drop as a function of air velocity, was equal to 7.9×10^{-10} m². The experimental setup allowed the measurements of moisture and temperature profiles along the bed height for air temperatures of 35 and 45 °C. The results indicate that moisture and temperature varied along the length and time. The moisture varied linearly for the conditions investigated, while the temperature variation was not linear and decreased sharply in the positions more distant from the base of the bed. A characteristic behavior of thin-layer bed, with uniform temperature, was observed only for bed heights less than 4 cm. The same column of fixed bed tests was used in the drying experiments performed in the fluidized mode, with a static bed height equals to 13 cm. The drying air velocity was 0.41 m/s and the temperatures were 35, 40 and 45 °C. In this case the drying showed characteristics similar to those observed for the thin layer drying: drying time around 400 minutes and no influence of the increase in the temperature. The drying rate can be estimated by the Page, with $k = 0.0268$ and $n = 0.816$. Fluidized bed drying is in a first analysis preferable than fixed bed drying because the intense mixture prevents the formation of temperature and moisture gradients. The results of this work may be useful for modeling the drying process and design of dryers to be developed for millet or similar seeds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sementes de painço.....	16
Figura 2.2: Esquema de um elipsóide triaxial e seus eixos principais com as dimensões das sementes medidas com paquímetro: L, W e T'.	21
Figura 2.3: Queda de pressão do leito em função da velocidade do ar.	32
Figura 2.4: Teor de umidade, temperatura e taxa de secagem em função do tempo de secagem (Park <i>et al.</i> , 2007).	34
Figura 3.1: Fração mássica das sementes em função do diâmetro da peneira.....	40
Figura 3.2: Sistema de medidas para determinação da condutividade térmica (LUCCAS <i>et al.</i> , 2002).....	41
Figura 3.3: Esquema do aparato de umidificação das sementes.....	42
Figura 3.4: Esquema do equipamento utilizado para realização da secagem em camada fina.	43
Figura 3.5: Célula de medida utilizada para experimento de cinética de secagem em camada fina.	44
Figura 3.6: Equipamento utilizado na secagem nos modos de leito fixo e fluidizado.	46
Figura 3.7: Leito composto por anéis ajustáveis.	47
Figura 4.1: U_{bs} sementes de painço em função do tempo no processo de umidificação a 30°C e a 40°C.	50
Figura 4.2: Frações mássicas de sementes obtidas em cada peneira.	52
Figura 4.3: Dimensões da semente (L, W, T' e B) em função de U_{bs}	53
Figura 4.4: Perímetro da semente em função de U_{bs}	54
Figura 4.5: Área projetada em função de U_{bs}	55
Figura 4.6: Área superficial em função de U_{bs}	55
Figura 4.7: Massa de 1000 sementes em função de U_{bs}	56
Figura 4.8: Volume de 1000 sementes em função de U_{bs}	57
Figura 4.9: Redondeza da semente em função de U_{bs}	58
Figura 4.10: Esfericidade em função de U_{bs}	58
Figura 4.11: Massa específica real em função de U_{bs}	59
4.12: Massa específica aparente em função de U_{bs}	59
Figura 4.13: Porosidade da partícula em função de U_{bs}	60
Figura 4.14: Temperatura em função de $\ln(t)$ dos ensaios para o leito de sementes inteiras. ..	61

Figura 4.15: K_{ef} para o leito fixo de sementes com $\varepsilon_b^{med} = 0,359$ em função do número de medidas sucessivas.	62
Figura 4.16: K_{ef} para o leito fixo das sementes em pó em função do número de medidas sucessivas.....	63
Figura 4.17: K_{ef} dos leitos de sementes em função do número de medidas sucessivas, para $\varepsilon_b^{med} = 0,359$	64
Figura 4.18: K_{ef} dos leitos das sementes em pó em função do número de medidas sucessivas, para diferentes ε_b^{med}	65
Figura 4.19: K_{ef} em função da ε_b do leito de sementes em pó.....	65
Figura 4.20: K_{ef} em função de U_{bs} para o leito de sementes em pó.	66
Figura 4.21: MR em função do tempo para a secagem em camada fina das sementes de painço nas temperaturas a) 35°C; b) 40°C e c) 45°C, parametrizados na velocidade do ar de secagem.....	68
Figura 4.22: MR em função do tempo para a secagem em camada fina das sementes de painço.....	68
Figura 4.23: MR em função do tempo de secagem, dados experimentais de secagem em camada fina e preditos pela equação de Page.....	71
Figura 4.24: $\Delta P/L$ em função de U a temperatura do ar de a) 35°C e b) 45°C.	72
Figura 4.25: U_{bs} em função da altura do leito para a secagem em leito fixo a 35°C, parametrizado no tempo de secagem.	73
Figura 4.26: U_{bs} em função do tempo para a secagem em leito fixo com temperatura do ar de secagem de 35°C parametrizada na altura do leito.	74
Figura 4.27: Temperatura do leito em função do tempo de secagem a 35°C parametrizados na altura do leito.	75
Figura 4.28: U_{bs} em função da altura do leito parametrizado no tempo de secagem.	76
Figura 4.29: U_{bs} em função do tempo para a secagem em leito fixo a 45°C, parametrizado na altura do leito de sementes.....	77
Figura 4.30: Temperatura do leito em função do tempo de secagem, parametrizada na altura do leito de sementes.....	77
Figura 4.31: ΔP no leito em função de U para sementes secas (SS) e sementes úmidas (SU).78	
Figura 4.32: MR em função do tempo de secagem das sementes em leito fluidizado parametrizado na temperatura do ar de secagem, $U=1,0$ m/s.	79

Figura 4.33: MR em função do tempo de secagem, parametrizados nos dados experimentais de secagem em leito fluidizado e preditos pela equação de Page..... 80

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1: Composição nutricional de painço em 100g de porção.....	17
Tabela 4.1: Propriedades físico-químicas das sementes de <i>Setaria italica</i> L.....	52
Tabela 4.2: Valores de K_{ef} para leitos de sementes.....	62
Tabela 4.3: Valores de K_{ef} para leitos de sementes em pó.....	63
Tabela 4.4: Valores de K_{ef} do leito de sementes.....	64
Tabela 4.5: Valores de K_{ef} do leito do pó das sementes.....	64
Tabela 4.6: Parâmetros das equações ajustadas para secagem em camada fina.....	69
Tabela 4.7: Valores de R^2 , de SE e de P das equações ajustadas aos dados de cinética de secagem em camada fina das sementes.....	70

Quadro 2.1: Equações utilizadas para representar a cinética de secagem em camada fina.....	35
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Área projetada da partícula	$[L^2]$
B	Diâmetro da parte esférica da sementes	$[L]$
C	Fator C, constante de Forchheimer	$[-]$
D	Diâmetro	$[L]$
D_i	Abertura da peneira i	$[L]$
\bar{D}	Diâmetro médio de Sauter	$[L]$
d_e	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula	$[L]$
d_l	Diâmetro da partícula	$[L]$
k_1	Constante de permeabilidade Darcyana	$[-]$
k_2	Constante de permeabilidade não Darcyana	$[-]$
K_{ef}	Condutividade térmica efetiva	$[EL^{-1}\theta^{-1}]$
K_f	Condutividade térmica do ar	$[EL^{-1}\theta^{-1}]$
K_s	Condutividade térmica da fase sólida da semente	$[EL^{-1}\theta^{-1}]$
L	Comprimento da semente e espessura do meio poroso	$[L]$
m	Massa	$[M]$
MR	Adimensional de umidade	$[-]$
MR_{exp}	Adimensional de umidade experimental	$[-]$
MR_{pred}	Adimensional de umidade predita	$[-]$
n	Número de parâmetros da equação	$[-]$
N	Número de dados observados	$[-]$
p	Perímetro	$[L]$
ΔP	Queda de pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
q	Calor	$[EL^{-1}]$
Q_m	Vazão mássica	$[EL^{-1}]$
Q_v	Vazão volumétrica	$[-]$
r	Raio	$[L]$
R	Coefficiente de correlação	$[-]$
$RMSE$	Raíz quadrada do erro médio	$[-]$
S	Área superficial da semente	$[L^2]$
t	Tempo	$[T]$

T	Temperatura	[θ]
T'	Espessura da semente	[L]
U	Velocidade do ar de secagem	[LT^{-1}]
U ₀	Umidade inicial da amostra	[-]
U _{bs}	Umidade da amostra em base seca	[-]
U _{bu}	Umidade da amostra em base úmida	[-]
U _d	Umidade da amostra em equilíbrio dinâmico	[-]
U _{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[LT^{-1}]
v	Velocidade do fluido	[MT^{-1}]
V	Volume	[L^3]
V _a	Volume da câmara da amostra	[L^3]
V _{ap}	Volume aparente da massa de sementes	[L^3]
V _b	Volume do leito de sementes	[L^3]
V _e	Volume da câmara de expansão	[L^3]
V _s	Volume real da massa de sementes	[L^3]
x	Fração mássica	[-]

Símbolos gregos

α	Difusividade térmica do meio poroso	[L^2T^{-1}]
ε_s	Porosidade da semente	[-]
ε_b	Porosidade do leito (bulk)	[-]
ε_t	Porosidade total do leito	[-]
μ	Viscosidade	[$ML^{-1}T^{-1}$]
ρ_{ap}	Massa específica aparente	[ML^{-3}]
ρ_b	Massa específica do leito (bulk)	[ML^{-3}]
ρ_s	Massa específica real	[ML^{-3}]
ϕ	Esfericidade	[-]
χ^2	Chi-quadrado	[-]

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS E QUADROS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
SUMÁRIO	12
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. GENERALIDADES SOBRE AS SEMENTES	16
2.2. CARACTERIZAÇÃO	18
2.2.1. <i>Propriedades físicas das sementes</i>	18
2.2.2. <i>Propriedades do leito de sementes</i>	23
2.3. SECAGEM	29
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. CARACTERIZAÇÃO	37
3.2. PROCESSO DE UMIDIFICAÇÃO	42
3.3. SECAGEM EM CAMADA FINA.....	42
3.4. SECAGEM EM LEITO FIXO	45
3.5. SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO.....	48
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. PROCESSO DE UMIDIFICAÇÃO	50
4.2. CARACTERIZAÇÃO DE SEMENTES E DO LEITO DE SEMENTES	51
a) <i>Dimensões e perímetro</i>	53
b) <i>Área</i>	54
c) <i>Massa de 1000 sementes</i>	56
d) <i>Volume</i>	56

e) <i>Fator de forma</i>	57
f) <i>Massa específica real</i>	59
g) <i>Massa específica aparente</i>	59
h) <i>Porosidade da partícula</i>	60
i) <i>Condutividade Térmica Efetiva</i>	60
4.3. SECAGEM EM CAMADA FINA.....	67
4.4. SECAGEM EM LEITO FIXO	71
4.5. SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO.....	78
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	81
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O painço (*Setaria italica* L.) é uma planta nativa da China e uma das culturas mais antigas cultivadas no mundo (Plant Resources of Tropical Africa – PROTA, 2009), entretanto, no Brasil esta planta apenas recentemente começa a ganhar espaço. Em 2008, no município de Tucunduva, maior produtor do Rio Grande do Sul, foram cultivados 1500 hectares de painço (GLOBO RURAL, 2009).

As sementes do painço são bastante utilizadas na alimentação de aves, no preparo de cerveja, de vinho, de álcool e na alimentação humana, na forma de grão cozido ou de farinha. A planta é cultivada para feno e silagem e seu farelo pode servir para cobertura de solos para aumentar os nutrientes e a biodiversidade do solo na entressafra (DENUCCI; PORTAS; BONATTI, 2008).

Camacho *et al.* (2004) comentaram que após a colheita, geralmente, as sementes são secas em terreiros, necessitando de grandes espaços de terra e mão de obra, onde o período de secagem vai depender das condições climáticas. Desta forma, além do produto ficar sujeito à contaminação, as sementes sofrem danos físicos e fisiológicos, devido aos processos alternados de sorção e de dessorção de água, sendo armazenadas para comercialização com teores de umidade acima do recomendado. De acordo com Camacho *et al.* (2004), as sementes normalmente atingem a maturidade fisiológica com teores de água superiores a 30%, iniciando a perda de sua qualidade a partir daí, quando são colhidas mecanicamente.

Existem muitos estudos envolvendo a caracterização e secagem de sementes de gramíneas como *Brachiaria brizantha* nos trabalhos de Arnosti Jr. (1997), Chicaroni (1999), Fumagalli (2007) e Melo (2001), além de trabalhos como os de Barrozo (1995) e de Prado (1999, 2004) que utilizaram sementes de soja e de mamão papaya, respectivamente.

Para o painço, foram encontrados na literatura consultada, trabalhos que tratam da determinação da densidade “bulk”, dos coeficientes de fricção estática e interna e das propriedades térmicas em função do teor de umidade (SUBRAMANIAN; VISWANATHAN, 2003, 2007; CORRÊA; ANDRADE; AFONSO JÚNIOR, 2004), além da determinação das isotermas de sorção (CORRÊA *et al.*, 2006), mas não foram encontrados dados de secagem para este material.

Para a análise do processo de secagem e posterior modelagem é importante conhecer não apenas as propriedades das sementes úmidas, mas também como elas variam com o teor de umidade.

Assim, este trabalho teve como objetivos:

- i. caracterizar as sementes de painço, determinando-se propriedades físico-químicas (dimensões, massa, volume, forma, massa específica, porosidade) além da condutividade térmica efetiva do leito das sementes e do pó das sementes; permeabilidade do leito de partículas e velocidade de mínima fluidização;
- ii. analisar a influência do teor de umidade nas propriedades físico-químicas e
- iii. avaliar a secagem das sementes em camada fina, em leito fixo de camada espessa e em leito fluidizado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as características gerais das sementes de *Setaria italica* L. A revisão abordará ainda trabalhos que enfocam a obtenção de propriedades físico-químicas e secagem de sementes, os fundamentos do processo de secagem e os principais métodos de secagem utilizados para este material.

2.1. Generalidades sobre as sementes

Painço é o nome genérico que se dá a um grupo de grãos produzidos por plantas diversas. Os tipos mais conhecidos são os painços verdadeiros, originados na África, cuja família é a *Poaceae*, do gênero *Panicum* e nome científico *Panicum miliaceum* (L.). O painço verdadeiro é chamado de milho alvo em muitas regiões. Existe outra planta que produz um grão semelhante ao dos painços verdadeiros, conhecida como painço português, de gênero *Setaria* e nome científico *Setaria italica* (L.). O painço português (Figura 2.1) tem origem na China e pode também ser chamado de Moha (no Sul do Brasil, Uruguai e Argentina e em outros países) ou milho miúdo, conforme a região (DENUCCI; PORTAS; BONATTI, 2008).



Figura 2.1: Sementes de painço.

As sementes de *Setaria itálica* (L). têm ciclo anual, com média de 1,0 m de altura, boa capacidade de perfilhamento e com panícula (inflorescência) característica da espécie, do tipo rabo-de-gato (ZANCANELLA; BONATTI; MARTUCCÍ, 2008).

De acordo com o USDA (2009), o diâmetro médio da semente de *Setaria italica* L. é cerca de 1,6mm e possui comprimento médio de 2,3 mm, enquanto que o diâmetro

médio do *Panicum miliaceum* (L). é cerca de 2,1 mm e o comprimento médio é de 3,3 mm (USDA, 2008). Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (2008b), os grãos são de diversas cores e retirada a casca fina da semente pode-se verificar sua pequena forma convexa, oval ou elíptica.

Para Denucci, Portas e Bonatti (2008), o painço pode ser utilizado na alimentação de pássaros, como fonte alimentar única ou misturado com outras sementes como alpiste, niger, colza, girassol e outros; na formação de palha adequada e suficiente para o sistema de Plantio Direto na Palha (PDP); na produção de grãos para composição de ração de aves e de outros animais. É usado também como pastagem temporária por ser altamente palatável e de excelente valor nutritivo, tanto para bovinos como para ovinos e outros animais, tendo em vista a rápida produção de forragem; para fenação e em coberturas de solos na entressafra, ou em ruas de pomares, com o objetivo de reciclar nutrientes e aumentar a biodiversidade.

Segundo a FAO (2008a), a semente de painço possui uma boa composição nutricional se comparada a outros grãos, como milho ou arroz (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Composição nutricional de painço em 100g de porção.

Água(%)	12,00
Energia (kcal)	340,00
Proteínas(g)	10,00
Gorduras (g)	4,00
Cálcio(mg)	22,00
Ferro(mg)	21,00
b-caroteno(µg)	25,00
Vit B1 (mg)	0,30
B2 (mg)	0,22
Vit. C (mg)	3,00

Fonte: West, Pepping e Temalilwa, 1988

As importações do painço português para suprir a demanda nacional ainda são significativas. A possibilidade de comercialização dos grãos do painço português como alimento para aves pode trazer grandes lucros para o produtor, principalmente em épocas de menor oferta do produto. Por ter um valor nutritivo elevado, esses grãos podem ser utilizados na composição de rações para outros animais, além dos pássaros. Em termos energéticos, é

bastante próximo ao milho, possuindo maior valor protéico. Em muitos casos, pode substituir, parcialmente, o milho em produção de rações (DENUCCI; PORTAS; BONATTI, 2008).

2.2. Caracterização

A caracterização de uma partícula ou de um conjunto de partículas é importante para aplicações tecnológicas. Com dados das propriedades do material é possível realizar a descrição apropriada do processo de secagem, o dimensionamento de secadores, de sistemas de armazenamento e a avaliação de processos envolvendo transferência de calor. Também é desejável conhecer como estas propriedades variam com o teor de umidade, o que permite prever sua variação ao longo do processo de secagem.

Nesse tópico será mostrada uma breve revisão sobre os métodos de caracterização mais comuns e que poderão ser aplicados no presente trabalho.

2.2.1. Propriedades físicas das sementes

Dimensões

Existem muitas técnicas à disposição do pesquisador para determinar as dimensões de uma partícula; a escolha vai depender da partícula a ser analisada. Alguns autores usaram mais de uma técnica nessas determinações.

Fumagalli (2007) e Almeida (2002), trabalhando com sementes de *B. brizantha* e brócolos, respectivamente, utilizaram a técnica de peneiramento para efetuar uma análise granulométrica, classificar as sementes em diversos diâmetros, medir a massa das sementes retidas em cada peneira e calcular o diâmetro médio de Sauter (\bar{D}) através da seguinte equação:

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x}{D_i}} \quad (2.1)$$

onde x_i é a fração mássica das sementes retidas na peneira i e D_i é a abertura da peneira i . Já para determinar a área projetada, o perímetro, o comprimento e a largura daquelas sementes, Fumagalli (2007) utilizou o software de análise de imagens Image Pró-Plus[®] que captou a projeção das sementes em microscópio Galai Macro Viewer e forneceu os outros dados.

De acordo com Prado (2004), vários pesquisadores utilizaram micrômetro e paquímetro para determinar o tamanho de grãos e sementes através da medida das dimensões dos três principais eixos da partícula. Esta técnica foi também utilizada por Amin, Hossain e Roy (2004), Coskuner e Karababa (2007b) e Sánchez-Mendoza et al. (2008) com sementes de lentilha, de linhaça e de *Hibiscus sabdariffa* L., respectivamente.

O diâmetro da parte esférica da semente (B) pode ser determinado com os dados de altura e espessura da partícula pela seguinte equação:

$$B = (W \cdot T')^{0,5} \quad (2.2)$$

onde W e T' são, respectivamente, a largura e a espessura da semente.

Aviara, Gwandzang e Haque (1999), determinaram as dimensões de sementes de uma variedade africana de melancia em função do teor de umidade, verificando um aumento linear nas três dimensões para umidades entre 4,5 e 28,2% (b.u). Já Baryeh (2001), trabalhando com grãos de avelã, observou expansão em todas as dimensões até umidade de 25% (b.u).

Prado (2004) observou uma redução em torno de 10 a 23 % no diâmetro da partícula projetada e no diâmetro linear máximo de sementes de mamão papaya submetidas à secagem, verificando o fenômeno de encolhimento durante o processo.

Amin, Hossain e Roy (2004) verificaram que, com o aumento no teor de umidade de 10,3% para 21,0% (b.u), houve aumento do diâmetro e da espessura de lentilha de 5,7% e 13,8%, respectivamente. Zewdu e Solomon (2007) verificaram aumento do comprimento, da largura e da espessura das sementes de Tef (*Eragostris tef* (Zucc.) Trotter) para a faixa de umidade entre 5,6 e 29,6%. O mesmo comportamento foi observado por Sánchez-Mendoza et al. (2008) com sementes de *Hibiscus Sabdariffa* L. para umidades entre 12,8 e 24,81%.

Coskuner e Karababa (2007b) verificaram que comprimento e largura das sementes de linhaça aumentaram linearmente para a faixa entre 6,09 e 16,81% (b.u), enquanto que a espessura aumentou, mas não de forma linear.

Com os dados de dimensões obtidas com paquímetro, pode-se calcular a área superficial da semente (S), de acordo com Jain e Bal (1997), através da equação:

$$S = \frac{\pi B L^2}{2L - B} \quad (2.3)$$

onde L e B são, respectivamente, o comprimento e o diâmetro da parte esférica da semente.

Esfericidade

As técnicas de picnometria e de análise de imagens são bastante utilizadas para a determinação de fator de forma.

Com os dados da área projetada (A_p) e do perímetro (p) fornecidos pelo software de análise de imagens é possível calcular a redondeza com a seguinte equação (Fumagalli, 2007; Arnosti Jr., 1997):

$$\phi = \frac{p^2}{A_p} \cdot 4\pi \quad (2.4)$$

De acordo com Mohsenin (1970) a base geométrica da esfericidade repousa sobre a propriedade isoperimétrica de uma esfera. Na literatura são fornecidas diferentes definições para esfericidade. Assim, a esfericidade de um objeto pode ser estimada usando a seguinte definição:

$$\phi = \frac{d_e}{d_l} \quad (2.5)$$

onde d_e é o diâmetro de uma esfera do mesmo volume do objeto e d_l é o diâmetro da partícula (Curry *apud* Mohesin, 1970). Esta expressão de esfericidade expressa a forma característica de um sólido relativo à esfera de mesmo volume.

Sartori (1986), Prado (2004) e Zewdu e Solomon (2007) determinaram a esfericidade pela equação (2.5). Segundo Aviara, Gwandzang e Haque (1999), não foi observada nenhuma variação significativa na esfericidade das sementes de melancia em relação ao teor de umidade, indicando que ocorreu aumento uniforme das dimensões com o aumento da umidade.

Outra definição considera que o volume do sólido é igual ao volume de um elipsóide triaxial com eixos perpendiculares entre si (Figura 2.2): L, W e T', e que o diâmetro da esfera circunscrita é o maior eixo da elipsóide (L). Assim, o grau de esfericidade também pode ser expresso da seguinte forma (Mohsenin, 1970):

$$\phi = \left(\frac{\text{Volume de um sólido}}{\text{Volume de esfera circunscrita}} \right)^{1/3} = \left[\frac{(\pi/6)LWT}{(\pi/6)L^3} \right]^{1/3} = \left(\frac{WT}{L^2} \right)^{1/3} \quad (2.6)$$

$$\phi = \frac{\text{Diâmetro geométrico médio}}{\text{Diâmetro maior}} = \frac{\sqrt[3]{W.T'.L}}{L} \quad (2.7)$$

onde L, W e T' são as dimensões relativas aos três eixos, comprimento, espessura e largura.

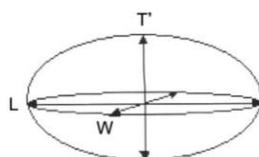


Figura 2.2: Esquema de um elipsóide triaxial e seus eixos principais com as dimensões das sementes medidas com paquímetro: L, W e T'.

Sánchez-Mendoza *et al.* (2008) utilizaram a Equação (2.7) para determinar a esfericidade das sementes de *Hibiscus sabdariffa* L.. Dessa forma, verificaram que o aumento da umidade provocou aumento da esfericidade das sementes do cultivar Sudão e redução dessa propriedade nos cultivares do México e da China.

Já Zewdu e Solomon (2007) notaram que a esfericidade da semente de Tef diminuiu de 0,7 para 0,63 para a faixa entre 5,6 e 21,43% na umidade devido ao maior aumento no comprimento. A esfericidade voltou a aumentar de 0,63 para 0,69, entre a faixa de 21,43 e 29,6% na umidade devido ao aumento proporcional das dimensões.

Massa e volume das sementes

A massa das sementes pode ser medida com o auxílio de uma balança digital (AMIN; HOSSAIN; ROY, 2004). O volume da semente pode ser determinado por picnometria líquida ou, de acordo com Jain e Bal (1997), pela equação:

$$V = \frac{\pi B^2 L^2}{6(2L-B)} \quad (2.5)$$

Coskuner e Karaba (2007b), Zewdu e Solomon (2007) e Amin, Hossain e Roy (2004) verificaram um aumento linear na massa das sementes de linhaça, Tef e de lentilha, respectivamente. Sánchez-Mendoza *et al.* (2008) observaram um aumento linear na massa de

sementes dos cultivares da China e do Sudão e um aumento não linear na massa do cultivar do México para a faixa de umidade entre 12,8 e 24,81%.

Massa específica

A determinação da massa específica de sementes pode ser realizada por picnometria através da medida de sua massa e volume. Existem duas definições de massa específica para materiais porosos como grãos e sementes.

A massa específica real ou absoluta é aquela dada pela razão entre a massa do material e o volume da estrutura sólida, que inclui cadeias poliméricas e líquidos como, água, ácidos etc, excluindo os poros da partícula e pode ser representada pela equação (KARATHANOS; KANELLOPOULOS; BELESSIOTIS, 1996):

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (2.6)$$

A massa específica aparente é definida como a razão entre a massa da partícula e o volume total ocupado pela partícula, incluindo os poros segundo a equação:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (2.7)$$

Na determinação da massa específica real a utilização de picnômetros gasosos tem sido amplamente difundida. O instrumento utiliza o princípio de Arquimedes de deslocamento de gás, de acordo com o qual o gás é capaz de penetrar todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula. O gás a hélio, com raio atômico de 3Å, é geralmente utilizado nos experimentos, sendo que apenas poucos poros fechados podem não ser atingidos por suas moléculas (KARATHANOS; KANELLOPOULOS; BELESSIOTIS, 1996).

Sobre a massa específica aparente de sementes encontram-se trabalhos como o de Chang (1988), citado por Prado (2004), de Amin, Hossain e Roy (2004) que determinaram as densidades aparente de milho, trigo e sorgo, de lentilha. Para determinar o volume aparente, cada semente de uma amostra foi recoberta por imersão em cera de parafina líquida aquecida, de modo a isolar todos os poros intra-partícula, tornando-os inacessíveis ao gás utilizado no picnômetro. A quantidade de cera utilizada foi determinada a partir da diferença de massa das sementes antes e depois do recobrimento. As amostras de sementes recobertas

tiveram suas massas medidas e seus volumes determinados por picnometria gasosa. O volume aparente da amostra foi obtido subtraindo o volume da cera do volume da amostra de sementes recoberta. As densidades aparentes apresentaram-se 5 a 13% menores que a densidade real, como esperado.

Fumagalli (2007) determinou a massa específica aparente das sementes de *Brachiaria brizantha* por picnometria líquida com hexano. Coskuner e Karababa (2007b) observaram um crescimento linear da massa específica aparente com o aumento do teor de umidade com sementes de linhaça.

Zewdu e Solomon (2007) verificaram uma diminuição linear na massa de sementes de Tef com o aumento de 5,6 para 29,6% na umidade. Amin, Hossain e Roy (2004) também observaram uma decréscimo linear na densidade aparente das sementes de lentilha em relação ao aumento da umidade de 10,33 para 21,00% (b.u). Sánchez-Mendoza *et al.* (2008) verificaram que a massa específica aparente das sementes de *Hibiscus Sabdariffa* L. de três cultivares, México, China e Sudão, diminuiu com o aumento da umidade de 12,8 para 24,81%.

Ribeiro *et al.* (2007) e Corrêa, Andrade e Afonso Júnior (2004) verificaram a diminuição das massas específicas aparentes do trigo, milho, alpiste e painço, com o aumento do teor de umidade.

Com base nas definições de massa específica, pode-se calcular a porosidade da partícula pela relação entre o volume de poros abertos e o volume total de partículas, ou seja, pela relação entre a massa específica aparente e real da partícula Prado (2004):

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad (2.8)$$

2.2.2. Propriedades do leito de sementes

Densidade “bulk”

A densidade “bulk” ou volumétrica é dada pela razão entre a massa e o volume do leito empacotado de sementes, dada por:

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (2.9)$$

O método mais empregado na determinação da densidade “bulk” é a utilização de um recipiente graduado cheio com uma massa conhecida de sementes e nivelando-se a superfície para a medida da altura. Amin, Hossain e Roy (2004), utilizaram um recipiente padrão graduado, deixando a amostra cair sempre de uma mesma altura para provocar a sedimentação do mesmo no cilindro para a determinação da densidade “bulk” através da relação entre a massa da amostra e seu volume.

Corrêa *et al.*(2004) observaram tendência de diminuição da densidade do leito de sementes de painço com o aumento do teor de umidade, mas o comportamento da densidade aparente do grão não foi avaliado por estes autores.

Coskuner e Karababa (2007), Zewdu e Solomon (2007) e Amin, Hossain e Roy (2004) observaram uma decréscimo linear na densidade “bulk” das respectivas sementes de linhaça, Tef e lentilha em relação ao aumento da umidade. Sánchez-Mendoza *et al.* (2008) verificaram a densidade “bulk” das sementes de *Hibiscus Sabdariffa* L. de três cultivares, México, China e Sudão, diminuiu com o aumento da umidade de 12,8 para 24,81%.

Subramanin e Viswanathan (2007), determinando algumas propriedades de sementes e farinha, verificaram um decréscimo linear da densidade “bulk” das sementes de painço português (*Setaria itálica* L.), painço verdadeiro (*Panicum miliaceum* L.), milheto pequeno (*Panicum miliare*), (*Eleusine coracana*), (*Paspalum sorobiculatum*) e (*Echinochola colona*) e um crescimento logarítmico da ρ_b farinhas destas sementes para a faixa entre 8,63 e 28,21% (b.u).

Porosidade

Com base nas definições de massa específica, obtêm-se diferentes definições de porosidade. A porosidade “bulk” ou do leito é dada pela relação entre o volume de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito, ou, massa específica “bulk” e aparente:

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{ap}} \quad (2.13)$$

Foi observado um aumento da porosidade bulk em relação à umidade nos trabalhos de Zewdu e Solomon (2007) com sementes de Tef, Coskuner e Karababa (2007b) com sementes de linhaça, Sánchez-Mendoza *et al.* (2008) com sementes de *Hibiscus sabdariffa* L. e Amin, Hossain e Roy (2004) com sementes de lentilha.

A porosidade total do leito é definida pela relação entre o volume de poros abertos intrapartícula e de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito, ou massa específica “bulk” e real:

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2.14)$$

Fumagalli (2007) determinou a porosidade do leito (bulk) através do volume externo das sementes (V_{ap}), determinado por picnometria líquida com hexano e do volume do leito (de partículas numa proveta, levando em consideração a altura do empacotamento) pela seguinte equação:

$$\varepsilon_b = \frac{V_b - V_{ap}}{V_b} = 1 - \frac{4.V_{ap}}{\pi.d^2.T'} \quad (2.15)$$

onde V_{ap} , V_b , d e T' , são, respectivamente, volume aparente da massa de sementes, volume do leito de sementes, diâmetro e espessura da semente.

Permeabilidade em meios porosos

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor facilidade que um fluido terá ao passar através de seus poros ou vazios (MOREIRA *et al.*, 2002). O escoamento do fluido provoca uma perda de energia na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso. A porosidade do leito de partículas, dependendo da geometria destas, pode mudar com o tipo de organização das partículas no leito, causando modificação na permeabilidade do leito.

Darcy, em 1856, trabalhando com meios granulares não-consolidados, propôs que, para baixas velocidades, a queda de pressão (ΔP) de um fluido incompressível com viscosidade (μ), escoando através da espessura (L) de um meio poroso fosse dada por (Massarani, 1997):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v \quad (2.16)$$

onde k_1 é a permeabilidade Darciana e v é a vazão volumétrica pela área de seção transversal, perpendicular ao escoamento do fluido. A Equação (2.16) é válida para escoamento laminar de fluido incompressível em meios porosos incompressíveis.

Já para velocidades elevadas, Forchheimer propôs uma relação quadrática entre a queda de pressão no meio poroso e a velocidade, dada por:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v + \frac{\rho}{k_2} v^2 \quad (2.17)$$

onde k_2 é a constante de permeabilidade não-Darcyana.

O primeiro e o segundo termos, k_1 e k_2 , da Equação (2.17), representam, respectivamente, os efeitos viscoso e cinético da interação fluido-partícula. A constante k_2 pode ser escrita com $\sqrt{k_1}/c$, onde o fator c é a constante de Forchheimer.

De acordo com Massarani (1997), a porosidade, a permeabilidade e o fator c são parâmetros que caracterizam a matriz porosa na percolação de um fluido homogêneo através deste meio. A permeabilidade e o fator c podem ser determinados, experimentalmente, por permeamtria através de um conjunto de medidas de vazão por unidade de área (v) e gradiente de pressão ($\Delta P/\Delta z$) efetuada com a amostra.

Condutividade térmica

De acordo com Mohsenin (1980) e Rossi e Roa (1980), citado por Corrêa, Andrade e Afonso Júnior (2004), para predizer as mudanças de temperatura interna de um produto sujeito aos processos de secagem e armazenamento, torna-se necessário a determinação de algumas de suas propriedades térmicas, sendo a condutividade térmica uma das principais.

Os métodos existentes para determinar a condutividade térmica podem ser classificados em dois grupos: métodos de transferência de calor em regime estacionário e em regime transiente (MOHSENIN, 1980). Segundo Kazarian e Hall (1965) e Freire (1981), o método do regime permanente apresenta a desvantagem de requerer muito tempo para se realizar o experimento, podendo acarretar numa migração de umidade da amostra no caso de sementes úmidas.

O método em regime transiente consiste na realização de medidas de temperatura ao longo do tempo durante o aquecimento da amostra. Segundo Blackwell

(1952), a geometria da sonda é um importante fator a ser considerado e a geometria cilíndrica parece ser a mais adequada, pois já foi amplamente testada e aprovada.

O aumento da temperatura em um ponto contido numa massa infinita de material aquecido por uma fonte de calor linear perfeita é expresso pela equação (CARSLAW e JAEGER, 1959):

$$T(r, t) = \left(\frac{q}{2\pi K_{ef}} \right) \cdot I(x) \quad (2.18)$$

onde $x = \frac{r}{2(at)^{0,5}}$;

$$I(x) = \gamma - \ln(x) + \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{8} + \dots \quad (2.19)$$

e $\gamma = 0,5772$ (constante de Euler).

Se x for pequeno, os termos de ordem x^2 e os superiores podem ser desprezados. A solução é dada pela seguinte equação:

$$T - T_0 = \frac{qA}{2\pi K_{ef}} - \frac{q}{2\pi K_{ef}} \ln\left(\frac{1}{2} r \alpha^{-1/2}\right) + \frac{q}{4\pi K_{ef}} \ln(t) \quad (2.20)$$

A partir desta solução simplificada, é obtida uma relação logarítmica para a variação de temperatura medida no eixo central ($r=0$) ao longo do tempo e a condutividade térmica efetiva pode ser obtida por:

$$K_{ef} = \frac{q/4\pi}{d\Delta T/d\ln t} \quad (2.21)$$

Segundo Muramatsu *et al.* (2007), o K_{ef} de um meio poroso é afetado por vários fatores: a condutividade térmica da substância sólida e do fluido que preenche os vazios, a fração de vazios e a densidade volumétrica, portanto, um modelo de transferência de calor estrutural seria valioso para uso prático.

Vários são os estudos em busca de correlações que possam estimar o K_{ef} do meio de materiais pela relação entre a condutividade térmica do sólido, do fluido e da fração de vazios.

Dentre os modelos existentes na literatura para a estimativa do K_s , são comuns os baseados em regras de mistura, que consideram a contribuição de cada fase que compõe o leito fixo (MURAMATSU, 2007). Entre estes podem ser citados o modelo da média ponderada, que considera que as duas fases são termicamente paralelas em relação ao fluxo de calor (TSAO, 1961):

$$K_{ef} = K_f \varepsilon_b + K_s (1 - \varepsilon_b) \quad (2.22)$$

O modelo da média harmônica propõe que as duas fases contribuem em série com relação ao fluxo térmico (TSAO, 1961):

$$K_{ef} = \frac{K_s \cdot K_f}{K_s \cdot \varepsilon_b + K_f (1 - \varepsilon_b)} \quad (2.23)$$

O modelo da média geométrica ou modelo aleatório (Woodside e Messmer, 1961) buscou representar o grau de desorganização do meio poroso:

$$K_{ef} = K_f^{\varepsilon_b} \cdot K_s^{(1-\varepsilon_b)} \quad (2.24)$$

Subramanin e Viswanathan (2003), determinando as propriedades térmicas de sementes e farinha das mesmas, verificaram um decréscimo da difusividade térmica e um crescimento do calor específico e da condutividade térmica efetiva tanto das sementes quanto da farinha das sementes de painço português (*Setaria itálica* L.), painço verdadeiro (*Panicum miliaceum* L.), milho pequeno (*Panicum miliare*), (*Eleusine coracana*), (*Paspalum sorobiculatum*) e (*Echinochola colona*) para a faixa entre 10 e 30% (b.u).

Corrêa *et al.* (2004) observaram que a elevação do teor de umidade de 0,113 para 0,263 (b.s) provocou um aumento linear de K_{ef} do leito de sementes de painço de 0,123 para 0,1479 W/m.°C.

Ribeiro *et al.* (2007) determinaram a condutividade térmica efetiva do leito de grãos de trigo, observando que a K_{ef} variou de 0,133 a 0,152 W/m.°C para o aumento de 11 a 26% (b.s).

2.3. Secagem

A produção de sementes de alta qualidade possui elevados custos, demandando muita mão de obra no período de colheita e secagem. Sementes em geral são colhidas com teores de umidade de 40 a 60%, conforme Macedo et al. (1987). Para as condições brasileiras, o teor de umidade ideal para a armazenagem de grãos e sementes é de 13%. Este valor foi estipulado por estabilizar a atividade aquosa do produto e assim inviabilizar, principalmente, o desenvolvimento de fungos e de bactérias (SILVA, 1997).

Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos: natural ou artificial. Na secagem natural o processo é totalmente dependente das condições climáticas disponíveis (CARVALHO, 1994). Apesar de apresentar baixo custo, este método é lento, gera baixo rendimento e necessita do uso intensivo de mão-de-obra. As sementes devem ser expostas em camadas inferiores a 6,0 cm e submetidas a revolvimento periódico (MAIA, 1995).

Na secagem artificial, o processo é executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas e o ar, que atravessa a massa de sementes, é forçado (CAVARIANI, 1996). Este método apresenta as vantagens de permitir o controle da temperatura, do fluxo do ar de secagem e do tempo de exposição das sementes ao ar aquecido, fatores fundamentais para garantir a eficiência do processo (CARVALHO, 1994).

Quanto à periodicidade no fornecimento de calor o processo pode ser contínuo ou intermitente que é caracterizado pela permanência das sementes em contato com o ar aquecido por períodos curtos, intercalados com períodos sem exposição ao fluxo de ar aquecido. Quanto à movimentação da massa de sementes a secagem artificial pode ser estacionária, onde o fluxo de ar é forçado através de uma camada de sementes, que permanece estática no interior do secador, ou contínuo, que implica em manter as sementes em constante movimento no interior do secador (GARCIA, 2004).

Os limites da temperatura do ar de secagem são determinados em função da sensibilidade dos componentes químicos que determinam a viabilidade da semente, uma vez que o produto, durante a secagem, em períodos à taxa decrescente, tem a sua temperatura aumentada, aproximando-se daquela na qual o processo se desenvolve (GARCIA, 2004).

No geral, a temperatura do fluxo de ar de secagem não deve ultrapassar a 40°C para não causar danos a qualidade das sementes (PESKE, 1991). No caso de sementes de sorgo, a temperatura da massa das sementes dentro do secador não deve ultrapassar 43°C, assim, se for um secador estacionário a temperatura do ar não deve ultrapassar 45°C e, se for

um secador intermitente, a temperatura média do ducto de entrada de ar quente deve ser, no máximo, 70°C para que a temperatura da massa de sementes não ultrapasse 43°C (EMBRAPA, 1983; GRUPO PRÓ-SORGO, 1989; MARTINS *et al.* 1999; LORINI *et al.* 2002; FONSECA, 2002). Nos trabalhos de secagem de sementes a temperatura do ar de secagem utilizada encontra-se numa faixa entre 30 e 60°C (ABALONE *et al.*, 2006; ARNOSTI JR., 1997; BARROZO, 2005; CARLESSO *et al.*, 2007; CORRÊA *et al.*, 2003; CORRÊA *et al.*, 2007; FERREIRA, 2004; PRADO, 2004; RIZZI JUNIOR, 2009).

Além da temperatura do ar de secagem, a velocidade do ar usada no processo de secagem é outro fator relevante na qualidade fisiológica das sementes submetidas à secagem. Em algumas situações, uma vez aumentada a vazão do ar, pode ocorrer aumento da taxa de água removida, ocasionando diminuição do tempo de secagem e alterações qualitativas no produto. Dessa forma, a combinação desses dois parâmetros irá interferir diretamente na taxa de secagem, podendo contribuir de forma significativa na diminuição do tempo gasto no processo, impedindo a degradação das sementes submetidas à secagem (CARLESSO *et al.* 2005).

A velocidade do ar de secagem utilizada nos trabalhos de secagem de sementes está entre 0,3 e 2,8m/s (ABALONE *et al.*, 2006; ARNOSTI JR., 1997; BARROZO, 2005; CARLESSO *et al.*, 2007; CORRÊA *et al.*, 2003; CORRÊA *et al.*, 2007; FERREIRA, 2004; PRADO, 2004; RIZZI JUNIOR, 2009). Dependendo do modo de operação do secador, como leito fluidizado, a velocidade do ar não pode ser muito alta, pois pode provocar fissuras nas sementes.

A secagem convectiva é a mais empregada, podendo ser efetuada numa grande variedade de equipamentos, caracterizados por configurações distintas, como em leito fixo, deslizante, fluidizado ou em transporte pneumático. Apesar de o aquecimento ser o meio mais empregado para secagem de sementes, sua operação demanda a adequação da eficiência na remoção da água à preservação das propriedades fisiológicas (Silva, 1998).

A escolha da técnica de secagem depende de fatores como aqueles associados às características do próprio sistema particulado e às propriedades e produção requeridas para o produto final (Strumillo e Kudra, 1986; Brooker, Bakker-Arkema e Hall, 1992). Sementes de soja têm sido secas em leito deslizantes com escoamentos cruzados (Barrozo, 1995), ao passo que feijão e milho (Mancini, 1996), trigo e canola (Lang *et al.*, 1993) têm sido secos em leito fixo. Quanto à secagem de gramíneas, esta tem sido realizada tanto em leito fixo como em leito tipo esteira com escoamentos cruzados (Arnosti Jr., 1997) e nos modos leito fixo e fluidizado na esteira (Fumagalli, 2007).

Secador de leito fixo

O secador de leito fixo surgiu com a necessidade de se secar os grãos após a colheita, minimizando o tempo, mão-de-obra e área necessária para secagem sem deixar o produto exposto às condições climáticas adversas, podendo armazenar um produto com qualidade. Para pequenos e médios produtores, secador de leito fixo é o mais acessível, pois, além de se tratar de um método de secagem relativamente simples, possui custo inicial de implantação relativamente baixo.

O secador de leito fixo é importante por ser a base para compreensão dos fenômenos fundamentais de transferência de calor e de massa que permeiam os estudos em outros leitos particulados. Além disto, estes secadores apresentam algumas vantagens em relação aos secadores de leitos móveis como a não necessidade de energia para mover as partículas sólidas ao longo do leito e a menor incidência de danos mecânicos e a preservação das qualidades fisiológicas do produto, germinação e vigor (Prado, 2004).

Uma desvantagem é a necessidade de se revolver a massa de grãos no secador de camada fixa, em intervalos regulares de tempo, para evitar os problemas que tal secador apresenta quanto à formação de gradientes de temperatura e de umidade do produto ao longo da altura do leito.

Rizzi Junior (2009) secou sementes de *Brachiaria brizantha* em leito fixo visando à modelagem do processo. Fumagalli (2007), trabalhando com essas mesmas sementes, investigou o limite da camada delgada em leito fixo com altura de 21 cm. Ferreira (2004), trabalhando com sementes de *Pennisetum glaucum* estudou a interação entre partículas e fluido na operação de leito fixo de camada espessa.

Secador de leito fluidizado

O processo do leito fluidizado se aproxima de uma mistura perfeita sendo caracterizada pelo escoamento uniforme do fluido através do leito de partículas com velocidade acima da de mínima fluidização e pela intensa mistura das mesmas, promovendo uma alta intensidade na troca de calor e massa.

A secagem em leito fluidizado adquiriu uma importante posição entre as principais técnicas de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Essa técnica é usada principalmente para sólidos particulados, contudo pode ser aplicada também na secagem de soluções, de pastas etc (CASTILHO, 2005).

É possível caracterizar a fluidodinâmica de um leito fluidizado convencional através do comportamento da queda de pressão no leito, em função da velocidade ou da vazão

de ar que o percola, obtida na curva característica do leito (BOTTERILL, 1975) como mostra a Figura 2.3:

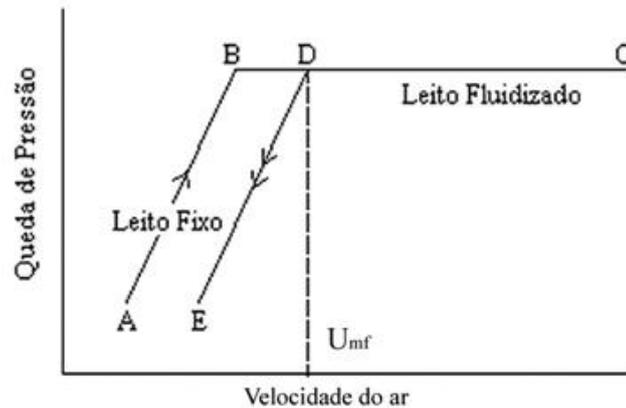


Figura 2.3: Queda de pressão do leito em função da velocidade do ar.

Uma boa estimativa para determinação da U_{mf} é feita através da intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, uma tangente à curva do leito fixo e outra à curva do leito fluidizado.

A velocidade de mínima fluidização é um parâmetro importante, pois caracteriza o início do regime de fluidização no leito, ocorrendo quando a força de arraste nas partículas, causada pelo escoamento do gás, iguala-se ao peso do leito de partículas. Na prática, é comum operar um leito fluidizado com velocidades de duas a três vezes a de mínima fluidização. A queda de pressão por unidade de comprimento do leito permanece constante para velocidades acima da velocidade de mínima fluidização para um regime fluidodinâmico estável e com fluidização de boa qualidade (ALMEIDA; ROCHA, 2002).

Poucos são os dados sobre a secagem de sementes neste tipo de secador, provavelmente porque a agitação do material pela corrente de ar ocasiona um alto atrito, o que pode causar a perda do poder germinativo da semente (FUMAGALLI, 2007).

Almeida e Rocha (2002), analisando a fluidodinâmica das sementes de brócolos em leito fluidizado, verificaram que o atrito semente-semente e semente-parede decorrente da exposição das sementes a movimentos cíclicos dentro do leito por 60 minutos, causou danos pouco evidentes de fissura e quebras, sendo que menos de 1% das sementes fluidizadas apresentaram parte do seu tegumento quebrado.

Drew (1987), em seu trabalho com sementes *Brassica napus L.*, concluiu que a fluidização acima de 30 minutos, para temperaturas superiores a 36°C, reduziu,

significativamente, o poder germinativo das sementes, sendo o uso do equipamento recomendado em condições restritas.

Secador do tipo esteira

A secagem em esteira é bastante utilizada em indústrias com produtos granulares e necessitam de um processo contínuo de secagem com o mínimo de choque no transporte das partículas (FUMAGALLI, 2007).

A principal vantagem deste secador é o pequeno impacto sofrido pelas partículas, pois cada partícula permanece fixa em uma posição em relação às outras partículas (MUJUMDAR, 1995). Isto faz com que a o processo de secagem tenha pouca interferência na qualidade fisiológica da partícula. O transporte do material através do secador do tipo esteira paralelo ao processo de secagem garante que o material seco seja colocado em qualquer ponto da unidade de beneficiamento. A única desvantagem, no caso do não aproveitamento do transporte do material, é o tamanho da área de instalação devido ao comprimento do equipamento, entretanto já é possível a construção do equipamento com vários estágios, que podem ser adaptados na vertical ou em diagonal de acordo com a disponibilidade do local (FUMAGALLI, 2007).

Fumagalli (2007) utilizou um secador do tipo esteira com 3 modos de operação: leito fixo, fluidizado e esteira para secagem de *Brachiaria brizantha*. Observou-se que o processo foi vantajoso quando comparado ao secador de esteira tradicional, pois foi possível reduzir em até 80% os tempos de residência necessários para obter uma determinada redução de umidade. A secagem neste secador promoveu um produto com teor de umidade mais homogêneo e nenhum dos modos de operação utilizados afetou a qualidade física e fisiológica da semente.

Cinética de secagem

O estudo da cinética de secagem é importante para entender a simulação e o projeto de secadores em camada espessa, além de serem indispensáveis na predição das equações de taxa de secagem utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência de calor e massa em leitos de camada espessa (MASSARANI e TELLES, 1992).

Segundo Ferreira (2004), o estudo em camada fina é o mais empregado para a determinação da cinética de secagem. Nos experimentos em camada delgada, em condições constantes de umidade, temperatura e fluxo mássico, o fluido escoava através de uma fina camada do material úmido e a variação de umidade deste é então observada em determinado

período de tempo. Assim, é possível a determinação de parâmetros de secagem e equações para a taxa de secagem. Souza et al. (1993) e Barrozo (1995) demonstram o sucesso deste tipo de abordagem.

De acordo com Cavariani (1996), a taxa de secagem expressa o percentual de água retirado das sementes em função do tempo e está relacionada com a movimentação da água do interior para a superfície das sementes; é dependente do genótipo, do estágio de maturação, do teor de água, da permeabilidade da camada protetora, da composição física da semente, da temperatura, da umidade relativa do fluxo do ar e do método de secagem. A velocidade de secagem pode também ser função da composição química das sementes e do método utilizado no processo.

A curva da cinética de secagem que mostra a variação de umidade em função do tempo pode ser constituída pelos períodos de aquecimento (0), de secagem à taxa constante (1) e de secagem à taxa decrescente (2) como mostra a Figura 2.4 (CARVALHO, 1994).

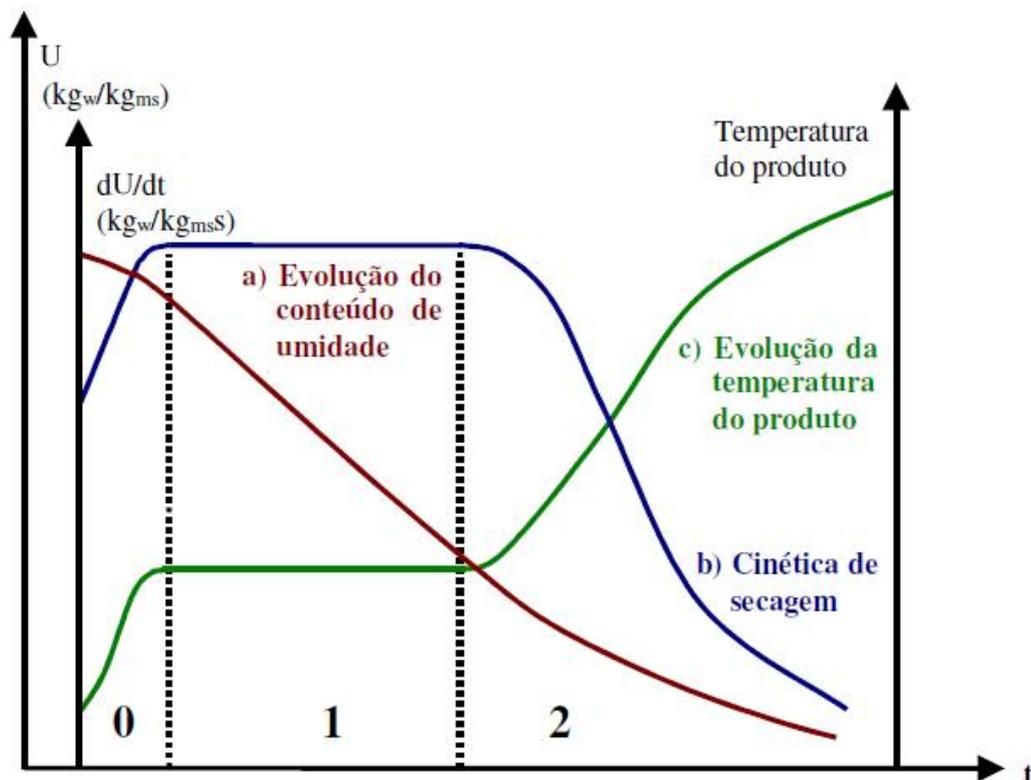


Figura 2.4: Teor de umidade, temperatura e taxa de secagem em função do tempo de secagem (Park *et al.*, 2007).

Para a secagem de sementes, o período de taxa decrescente pode ser bem mais amplo que o período a taxa constante, podendo ser subdividido em dois ou mais períodos.

Estes períodos são separados por um teor de umidade do sólido, umidade crítica (Barrozo, 1995). De acordo com Ferreira (2004), a vazão do ar, que influencia bastante na taxa de secagem constante, torna-se menos importante à medida que a taxa de secagem diminui.

Para materiais com alto teor de umidade, existe o período de secagem a taxa constante, pois, nestas condições, a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa de remoção do vapor d'água da superfície. Já para grãos e cereais, este período existe quando são colhidos em estado imaturo ou quando estão excessivamente reumidificados (FERREIRA, 2004).

É necessária a obtenção de dados experimentais para saber qual equação pode ser aplicada para o tipo de material estudado, escolhendo a que melhor possa representar o processo nas condições de operação pré-estabelecidas. As equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas para grãos e sementes se encontram no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Equações utilizadas para representar a cinética de secagem em camada fina.

Nome do Modelo	Equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas para grãos e sementes	Referência
Page ou Exponencial modificado	$MR = \exp(-kt^n)$ onde $k = \exp(-b/T_f)$ (2.25)	Page (1949)
Henderson e Henderson	$MR = c \cdot \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$ onde $K = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T_f}\right)$ (2.26)	Henderson e Henderson (1968)
Overhultz <i>et al.</i>	$MR = \exp[-(kt)^n]$ onde $k = \exp(a+b/T_f)$ (2.27)	Overhultz <i>et al.</i> (1973)
Brooker <i>et al.</i>	$MR = c \cdot \exp(-Kt)$ onde $K = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T_f}\right)$ (2.28)	Brooker <i>et al.</i> (1974)
Srzdenick <i>et al.</i>	$MR = a \cdot \exp[-k_1 \cdot \exp(-E_1/T_f) \cdot t] +$ $b \cdot \exp[-k_2 \cdot \exp(-E_2/T_f) \cdot t]$ (2.29)	Srzdenick <i>et al.</i> (1996)
Ezeike e Otten	$MR = a \cdot \exp(-bt) + e \cdot \exp(-dt)$ (2.30)	Ezeike e Otten, (1991)

No trabalho de Barrozo (1995) com sementes de soja e no de Arnosti Jr. (1997) com *B. brizantha*, a equação que melhor representou os dados de cinética de secagem foi a de Overhultz. A equação de Page foi a que melhor representou os dados experimentais de

cinética de secagem das sementes de milho doce (CORRÊA *et al.*, 2003), de *Pennisetum glaucum* (FERREIRA, 2004), de amaranto (ABALONE *et al.*, 2006) e de feijão (CORRÊA *et al.*, 2007). Para representar os dados experimentais de secagem de sementes de maracujá amarelo (CARLESSO *et al.*, 2007) foi escolhida a equação de Henderson (1974).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

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

As sementes de *Setaria itálica* L. foram adquiridas no comércio de São Carlos-SP, sempre da mesma marca e do mesmo fornecedor e passaram por um processo de separação e de classificação através de peneiramento e de catação manual para retirar as impurezas, obtendo-se uma amostragem de sementes com praticamente 100% de pureza.

3.1. Caracterização

As sementes foram adquiridas com umidade inicial de 13% em base seca. Em seguida, foram umidificadas até 30% (b.s.), teor máximo recomendado para evitar a utilização de sementes na maturidade fisiológica e em processo de germinação (CAMACHO, 2004; KERBAUY, 2004).

A caracterização, feita em sementes com diferentes teores de umidade, incluiu dimensões, área, massa e volume, esfericidade, massa específica real e aparente, densidade (bulk), porosidade da partícula, porosidade volumétrica (bulk) e porosidade total do leito e condutividade térmica efetiva do leito de sementes inteiras e pulverizadas. Estas são as principais propriedades que precisam ser conhecidas para a modelagem do processo de secagem e dimensionamento de secadores.

Teor de umidade

O teor de umidade das sementes foi determinado pelo método da estufa a $(105,0 \pm 3,0)^\circ\text{C}$ por 24h (BRASIL, 1980).

Análise granulométrica

A análise granulométrica para determinar o diâmetro médio de Sauter (\bar{D}) foi das sementes feita por peneiramento utilizando um sistema de peneiras da marca Tyler. Uma amostra de 185,6g de sementes foi separada em peneiras com aberturas de diâmetros médios

de 2,0, 1,7 e 1,4mm. As massas das sementes em cada peneira e suas respectivas frações mássicas foram obtidas e o \bar{D} foi calculado pela Equação 2.1.

Dimensões

As dimensões das sementes como, largura (L), altura (W) e espessura (T') (Figura 2.2), foram determinadas com paquímetro de precisão de $\pm 0,01$ mm. As medidas correspondem à média das medidas feitas para um mínimo de dez sementes. O diâmetro da parte esférica da semente (B) foi calculado de acordo com a definição dada pela Equação (2.2).

Através do software de análise de imagens Image Pró-Plus[®], que capta a projeção das sementes em microscópio Galai Macro Viewer, foi obtido o perímetro (p) de cerca de cinquenta sementes. Esta mesma técnica foi usada para a determinação da área projetada. A área superficial (S) da semente foi determinada pela Equação (2.3) de acordo com Jain e Bal (1997), utilizando os dados de largura, altura e espessura medidos com paquímetro.

Fator de forma

A redondeza e a esfericidade das sementes foram calculadas através das Equações (2.4) e (2.7), respectivamente, que são as mais utilizadas na literatura consultada para caracterizar a forma de sementes. Com a área projetada e o perímetro, obtidos por análise de imagens, foi calculada a redondeza média segundo a definição da Equação (2.4). Na Equação (2.7) foram usadas as dimensões medidas com o paquímetro para calcular a esfericidade.

Massa específica real (ρ_s)

A massa específica real foi determinada por picnometria gasosa a hélio através do picnômetro Ultracycrometer 1000 da Quantachrome Instruments, cujo princípio de operação se baseia no deslocamento de gás.

Segundo Moura e Figueiredo (2002), o picnômetro a hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia): a câmara onde se coloca a amostra (aproximadamente 3,0g) e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula (válvula de expansão). Depois de colocada a amostra na câmara, esta é sujeita a um processo de degaseificação, que consiste em repetidas purgas com hélio, para remoção de impurezas e

umidade que eventualmente possa conter. Leva-se, então, o sistema à pressão atmosférica, isola-se a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão, e pressuriza-se a câmara que contém a amostra até uma pressão P_1 . Em seguida, a válvula de expansão é aberta e, em consequência, ocorre uma redução da pressão para P_2 . Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado pela equação a seguir (Smith, 1996):

$$P_1(V_a - V_s) = P_2(V_a + V_s + V_e) \quad (3.1)$$

onde,

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (3.2)$$

em que V_s é o volume do sólido, V_a é o volume da câmara da amostra e V_e é o volume da câmara de expansão.

A massa específica real foi calculada através da relação entre a massa e o volume da amostra por meio da equação (2.9).

Massa específica aparente (ρ_{ap})

Através da técnica de picnometria líquida, utilizando hexano, de acordo com a metodologia da Association of Official Analytical Chemist, AOAC (2000) obteve-se a massa e o volume de sementes, determinando-se, em seguida a massa específica aparente das sementes de *Setaria italica* L.. Estes ensaios foram efetuados com amostras de 300 sementes e em triplicata.

Densidade do leito (bulk) (ρ_b)

Utilizando-se uma proveta de 1000 mL, a amostra de partículas foi empacotada no leito com o auxílio de um funil para derramar as sementes no interior do recipiente. Através da razão entre a massa de partículas e o volume da proveta foi possível determinar a densidade volumétrica (bulk) (Equação 2.12).

Porosidades

A porosidade da partícula (ϵ_s) foi estimada através da Equação (2.11), que relaciona a massa específica aparente com a real. A porosidade bulk (ϵ_b), ou fração de vazios do leito fixo constituído pelas sementes secas, foi estimada pela Equação (2.13). A porosidade total do leito (ϵ_t), ou fração de vazios total do leito de sementes secas, foi estimada pela Equação (2.14).

Condutividade térmica

Para determinação da condutividade térmica efetiva do leito de sementes inteiras e pulverizadas foi utilizado o método da sonda em regime transiente.

As medidas foram efetuadas para leitos de sementes inteiras e pulverizadas. A pulverização foi realizada utilizando-se um moinho analítico e, em seguida, fez-se a análise granulométrica do pó. Encontrou-se para este material uma distribuição da fração granulométrica de 0,005, 0,754, 0,09 e 0,151 para os respectivos diâmetros de peneiras de 0,600, 0,250, 0,212 e 0,125mm (Figura 3.1) e, obteve-se um diâmetro médio de Sauter (\bar{D}) de 0,215mm.

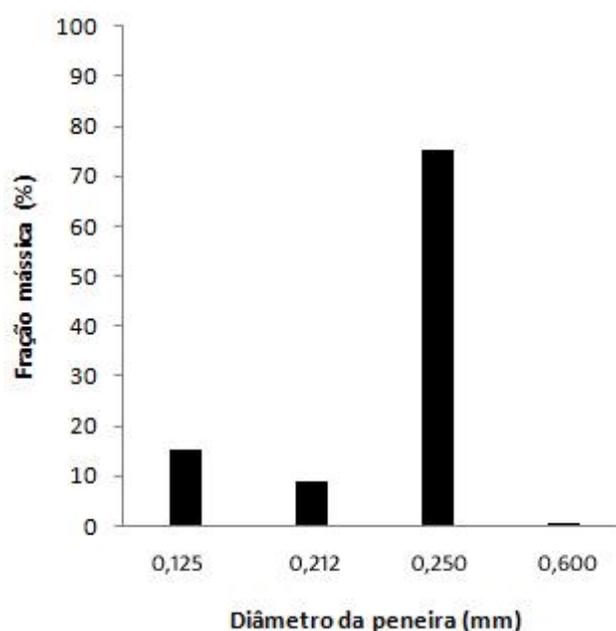


Figura 3.1: Fração mássica das sementes em função do diâmetro da peneira.

O sistema utilizado, mostrado na Figura 3.2, foi desenvolvido e previamente testado por Luccas *et al.* (2002) no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar para sementes de *Brachiaria brizantha*.

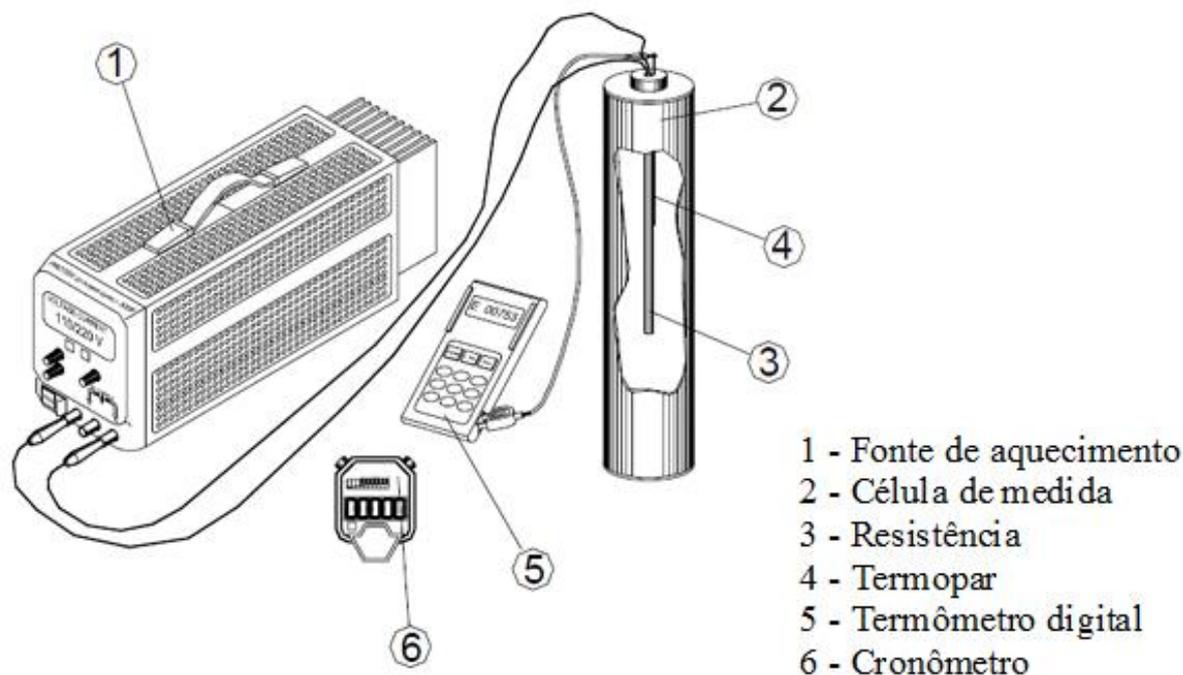


Figura 3.2: Sistema de medidas para determinação da condutividade térmica (LUCCAS *et al.*, 2002).

O aparato experimental consistia de uma célula de medida confeccionada em PVC, com 0,27 m de altura interna e 0,10 m de diâmetro interno, onde a base e topo eram termicamente isolados. No interior da célula foi acoplada uma sonda (0,265m de comprimento) composta por uma resistência (diâmetro igual a $6,4 \times 10^{-3}$ m, 600 W de potência e 220volts) e um termopar de chromel-alumel ($1,5 \times 10^{-3}$ m de diâmetro). A resistência foi ligada a uma fonte elétrica e o termopar conectado a um leitor de temperatura.

As sementes ou o pó foram inseridos no interior da célula de acordo com a técnica recomendada por Zotin (1985), na qual uma quantidade fixa de partículas (cerca de 50 g) era derramada em etapas, de tal forma que a altura de queda se mantivesse constante em cada etapa. A cada porção adicionada eram dadas algumas batidas na base do leito para que ocorresse a acomodação da amostra.

A sonda foi acoplada à célula de medida contendo a amostra e com o auxílio da fonte elétrica aplicou-se uma tensão de $(9,75 \pm 0,15)$ V e uma intensidade de corrente de 0,13 A. Através dos termopares foi possível obter dados de temperatura em função do tempo. Estes dados foram usados para a construção de uma curva da temperatura em função de $\ln(t)$. Obteve-se o coeficiente angular $(q/K_{ef} \cdot 4\pi)$ para a porção linear desta curva e, conhecendo-se a quantidade de calor dissipada e o coeficiente angular da reta, foi obtido o K_{ef} da amostra pela Equação (2.21).

3.2. Processo de umidificação

O processo de umidificação foi feito por exposição das sementes ao vapor de água em ambiente saturado de umidade utilizando-se o aparato experimental (Figura 3.3) construído no Centro de Secagem DEQ/UFSCar, conforme a metodologia que Chicaroni (1999) utilizou.

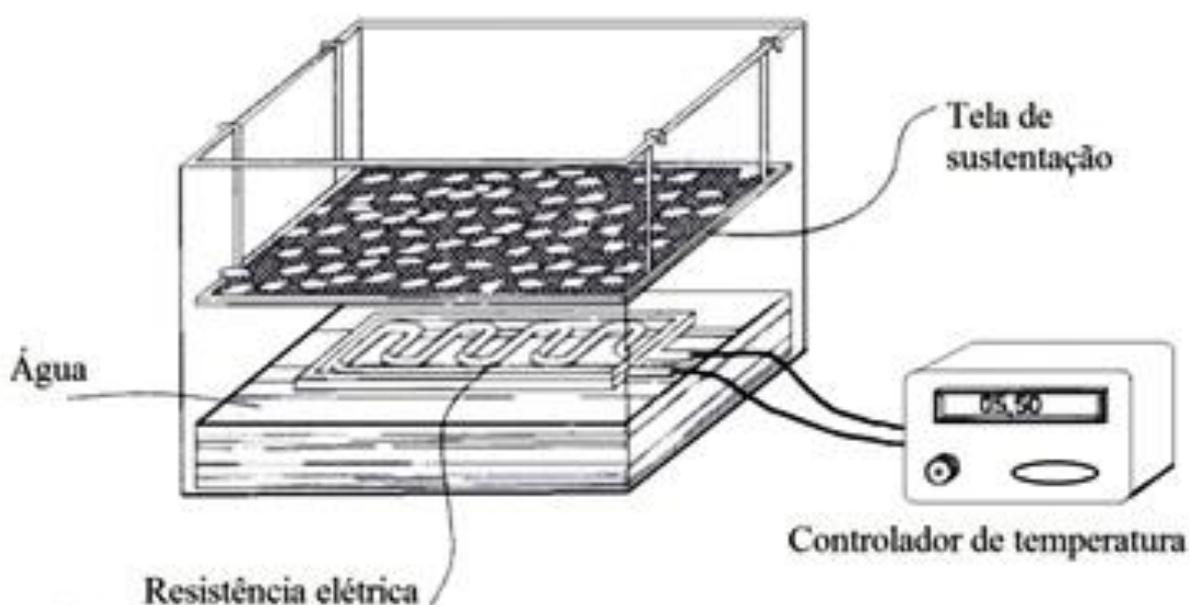


Figura 3.3: Esquema do aparato de umidificação das sementes.

Foi utilizado um volume de sementes que possibilitasse a distribuição uniforme sobre a tela de sustentação, formando uma monocamada. A umidificação foi realizada a temperatura de 30°C. O tempo de contato com o ar atmosférico saturado dependeu da temperatura utilizada durante a umidificação e da umidade desejada. Em determinados intervalos de tempo, a amostra foi pesada e determinado o teor de umidade em base seca da mesma. Com os dados de teor de umidade, foram construídas curvas de umidade em função do tempo.

3.3. Secagem em camada fina

O estudo da cinética de secagem em camada fina das sementes de *Setaria itálica* L. foi realizado com o auxílio de um secador de convecção forçada construído no Centro de Secagem DEQ/UFSCar.

Equipamento

A Figura 3.4 apresenta o equipamento utilizado para os testes de secagem em camada fina.

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1 - Soprador | 5 - Aquecedor elétrico |
| 2 - Trocador de calor | 6 - Variador de tensão |
| 3 - Manômetro de água do tipo U | 7 - Célula de secagem |
| 4 - Medidor de vazão | V ₁ e V ₂ - Válvulas do tipo gaveta |

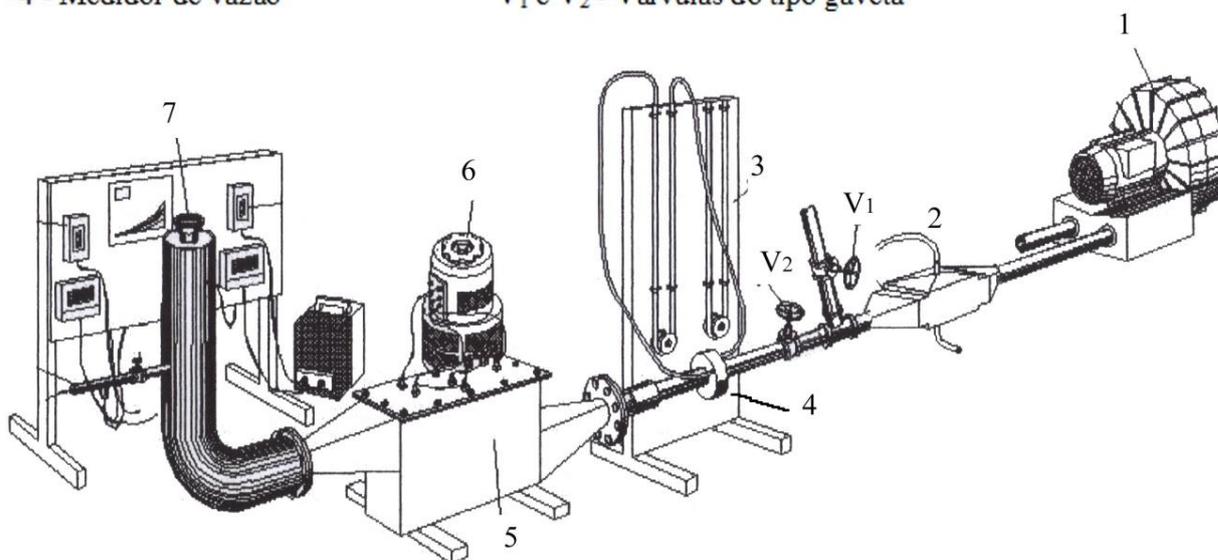


Figura 3.4: Esquema do equipamento utilizado para realização da secagem em camada fina.

No equipamento utilizado (Figura 3.4), o ar é fornecido por um soprador (1) de 0,75 HP, passando por um trocador de calor (2). A medida de vazão do ar é realizada através da leitura da diferença de pressão em um manômetro (3) tipo U com água, ligado a um medidor de vazão (4) do tipo dupla placa de orifício previamente calibrado. A equação de calibração da placa de orifício encontra-se a seguir:

$$Q_m = 0,1311\sqrt{\Delta H} \quad (3.3)$$

onde Q_m é a vazão mássica (kg/min) e ΔH é a diferença de pressão em cm H₂O medida em um manômetro de água do tipo U.

O ar de secagem é aquecido através de um aquecedor elétrico de 2500W (5), ligado a um variador de tensão (6), passando por um tubo de estabilização do escoamento do ar, atingindo a célula de medidas (7) e percolando o leito de sementes com exaustão para a atmosfera. O equipamento ainda possui um psicrômetro, chave seletora e milivoltímetro

digital, termopar de cobre constantan, válvulas do tipo gaveta para regular a vazão (V_1 e V_2). Os termopares de cobre-constantan são ligados ao milivoltímetro digital para medidas de temperatura na célula de secagem.

Secagem em camada fina

Para a realização dos ensaios de secagem em camada fina, foi utilizada uma célula de medida (Figura 3.5) com diâmetro de 0,05m e altura de 0,01m preenchida com sementes, uma vez que a espessura de camada fina determinada para sementes de dimensões similares às do painço foi de 0,01m (PRADO, 2004).

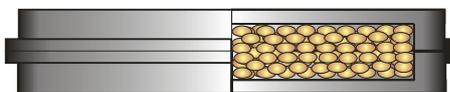


Figura 3.5: Célula de medida utilizada para experimento de cinética de secagem em camada fina.

O equipamento foi ligado com uma célula auxiliar de medida e quando o sistema atingia o regime permanente, ou seja, quando a temperatura e a vazão do ar não apresentaram variação dentre os valores pré-estabelecidos, a célula auxiliar, mantida no equipamento para minimizar as perturbações no sistema, era retirada e substituída pela célula de medida com a amostra. Sob condições operacionais constantes de temperatura, umidade e vazão do ar de secagem, a variação de umidade das partículas foi observada e avaliada por um determinado tempo. Foram realizados alguns ensaios preliminares e como não foi possível manter a temperatura do ar a 30°C, escolheu-se para a faixa de temperatura um mínimo de 35°C, uma temperatura intermediária de 40°C e uma temperatura máxima de 45°C para não afetar a capacidade germinativa das sementes. Com relação à velocidade do ar de secagem, testes preliminares indicaram que a velocidade do ar tinha pouca influência sobre a secagem, assim, foi escolhido um valor mínimo de 0,5m/s e um máximo de 1,5m/s. Em intervalos de tempo determinados, a célula de secagem com a amostra de sementes era pesada com o auxílio de uma balança analítica AND de modelo FR-200 MK II com precisão de $\pm 0,0001$ g. A célula de secagem com a amostra de sementes retornava ao leito para continuar a secagem até que a massa ficasse constante.

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

$$MR = \frac{U_{bs} - U_d}{U_0 - U_d} \quad (3.4)$$

onde U_{bs} é a umidade em determinado tempo do processo, U_d é a umidade de equilíbrio dinâmico e U_0 é a umidade inicial da amostra.

Os dados de MR em função do tempo foram ajustados às equações empíricas (fornecidas no Quadro 2.1). A estimativa dos parâmetros foi efetuada usando o algoritmo de Levenberg-Marquardt, através do software Statística[®]. Os critérios estatísticos utilizados para avaliar os ajustes foram o coeficiente de correlação (R^2), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o chi-quadrado (χ^2):

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N-n} \quad (3.6)$$

onde MR_{exp} é o adimensional de umidade experimental, MR_{pred} é o adimensional de umidade predito pela equação, N é o número de dados observados e n é o número de parâmetros da equação de ajuste.

3.4. Secagem em leito fixo

Equipamento

Para a realização dos ensaios de secagem em leito fixo e fluidizado foi utilizado o secador de leito fluidizado de laboratório, fabricado por Schrewood Scientific Ltd, adquirido pelo Centro de Secagem DEQ/UFSCar (Figura 3.6).

A base do equipamento é composta por um aquecedor elétrico (2kW), um controlador de temperatura PID de precisão de $\pm 1,0^\circ\text{C}$, um soprador e um controlador de velocidade.

O ar é soprado por uma hélice centrífuga, passando através de uma malha de filtro na base do sistema para o aquecedor elétrico através do filtro de malha de aço inoxidável na base do corpo do secador. O ar aquecido atravessa o leito e passa pela placa de orifício. A equação de calibração da placa de orifício é apresentada a seguir:

$$Q_v = 0,0681\sqrt{\Delta H} \quad (3.7)$$

onde Q é a vazão volumétrica em m^3/min e ΔH é a diferença de pressão na placa de orifício em $\text{cm H}_2\text{O}$, que é medida por um micromanômetro da marca Alnor[®], modelo AXD 530, com diferença de pressão máxima de 25,4 $\text{cm H}_2\text{O}$. Um manômetro de água em U conectado abaixo do distribuidor de ar mede a queda de pressão no leito.

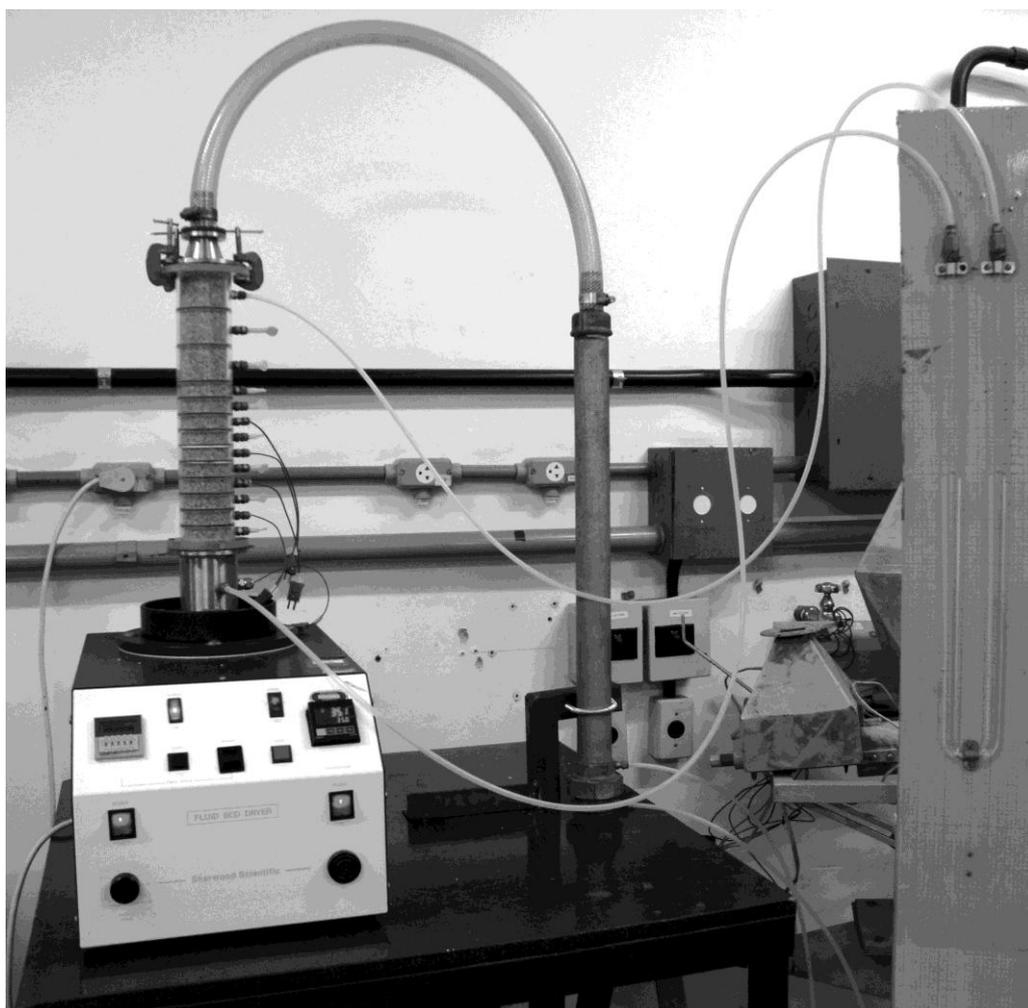


Figura 3.6: Equipamento utilizado na secagem nos modos de leito fixo e fluidizado.

O leito, adaptado pelo Centro de Secagem DEQ/UFSCar, é composto de 13 anéis com diâmetro de 5,8 cm e espessuras de 2,1; 2,5; 4,6 ou 5,0 cm, todos ajustáveis para montar uma coluna de, no máximo, 35,6cm de altura, mostrado na Figura 3.7. Na lateral de cada anel existe uma entrada para conectar um medidor de temperatura ou de pressão. Abaixo do distribuidor de ar estão instaladas uma tomada de pressão e um termopar do tipo T, que são conectados a um manômetro de água em U e a um leitor de temperatura, respectivamente.

Determinação da permeabilidade do leito

Foi determinada a permeabilidade do leito de sementes secas utilizando-se a coluna (Figura 3.7), operando no modo leito fixo. Os testes foram realizados utilizando temperaturas do ar de 35 e 45°C. A coluna foi completamente preenchida com sementes, colocando-se quantidades iguais de aproximadamente 50g sempre de uma mesma altura e dando-se leves batidas na base do leito para a acomodação das partículas. O equipamento foi ligado, inicialmente, com a coluna vazia. Quando a temperatura do ar entrou em regime permanente, o leito de partículas foi acoplado ao secador, iniciando-se o teste. Foram feitas medidas de queda de pressão no leito em função da vazão de ar. Com isso, construiu-se uma curva da velocidade do ar em função da queda de pressão no leito. Para o ajuste dos dados obtidos foram testadas as equações de Darcy (Equação 2.16) e de Forchheimer (Equação 2.17).

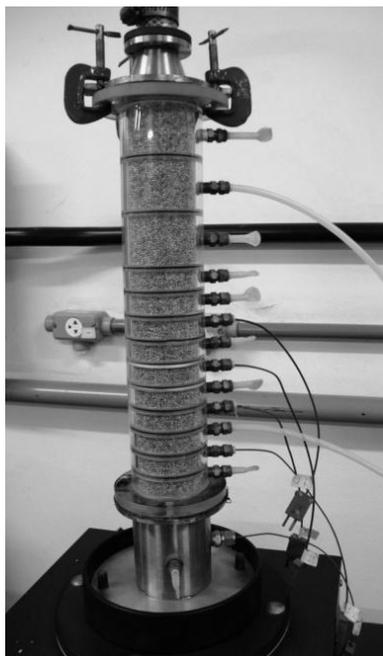


Figura 3.7: Leito composto por anéis ajustáveis.

Secagem em leito fixo

O equipamento foi ligado com uma coluna vazia até que o sistema entrasse em regime permanente. Acoplou-se o leito de partículas, conectando todos os termopares ao leitor de temperatura, as duas tomadas de pressão do leito ao manômetro e as duas tomadas de pressão da placa de orifício ao micromanômetro. Em determinados intervalos de tempo eram anotadas a queda de pressão no leito de partículas e a temperatura em diferentes posições (1,5;

4,0; 8,0; 12,0; 16,0; 20,0; 23,0; 27,5 e 32,0cm). Para obter medidas da umidade das amostras em diferentes tempos de secagem, era necessário retirar cada anel, desestruturando o leito. Assim, os ensaios foram realizados para diferentes intervalos de tempo (entre 10 e 50 minutos), utilizando-se, a cada vez, uma nova amostra. Tomou-se o cuidado de manter a mesma técnica de empacotamento e umidade inicial em cada ensaio. Para a realização deste procedimento foram escolhidos os mesmos valores para a temperatura do ar mínima, intermediária e máxima utilizados nos testes de secagem em camada fina: 35, 40 e 45°C, respectivamente. A velocidade do ar utilizada foi a máxima fornecida pelo soprador, 0,41m/s.

3.5. Secagem em leito fluidizado

Equipamento

Para a secagem em leito fluidizado foi utilizado o mesmo equipamento descrito no item 3.4. Nestes experimentos, trabalhou-se com velocidade do ar acima da U_{mf} .

Obtenção da curva fluidodinâmica

Para a determinação da curva fluidodinâmica do leito de partículas, adotou-se uma altura de leito estático de 13 cm, equivalente a uma massa de 273 g de sementes úmidas. A temperatura utilizada no experimento foi de 35°C. Foram feitos dois experimentos, um aumentando-se a vazão do ar até a fluidização das partículas e outro partindo-se do leito fluidizado e diminuindo-se a vazão do ar até zero. Com as medidas da queda de pressão em função da vazão de ar foi possível construir a curva característica do leito. A velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) foi estimada através da intercessão de duas retas, uma ajustada aos pontos na região do leito fixo e outra ajustada aos pontos da região do leito fluidizado, como mostra a Figura 2.3.

Secagem em leito fluidizado

Os ensaios de secagem em leito fluidizado ocorreram da seguinte maneira: preencheu-se o leito, com a mesma massa de sementes utilizada na obtenção da curva fluidodinâmica, até uma altura de 13 cm. Com o equipamento ligado e a temperatura do ar constante, acoplou-se a coluna de amostra e iniciou-se o experimento ajustando-se a velocidade do ar no leito ao valor desejado. Em intervalos de tempo determinados, o experimento era interrompido e o leito de partículas desconectado do equipamento para que a

amostra fosse retirada e sua massa medida em uma balança analítica AND de modelo FR-200 MK II com precisão de $\pm 0,0001$ g. A secagem durou até a estabilização da massa da amostra. Os valores para temperatura do ar de secagem foram os mesmos estabelecidos para os testes de secagem em camada fina.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, seguindo-se a metodologia proposta neste trabalho. Primeiro, serão apresentados os resultados do processo de umidificação. Em seguida, serão apresentadas as características das sementes secas e do leito das mesmas para depois analisar o comportamento das propriedades das sementes em função do teor de umidade. Nas seções seguintes serão apresentados e discutidos os resultados da cinética de secagem em camada-fina e da secagem em leito fixo e fluidizado.

4.1. Processo de umidificação

A Figura 4.1 apresenta os dados do teor de umidade das sementes em função do tempo de umidificação a 30°C. Cada ponto refere-se ao valor médio de três medidas de umidade. O desvio máximo entre os valores médios de U_{bs} foi $\pm 0,006$ (b.s.).

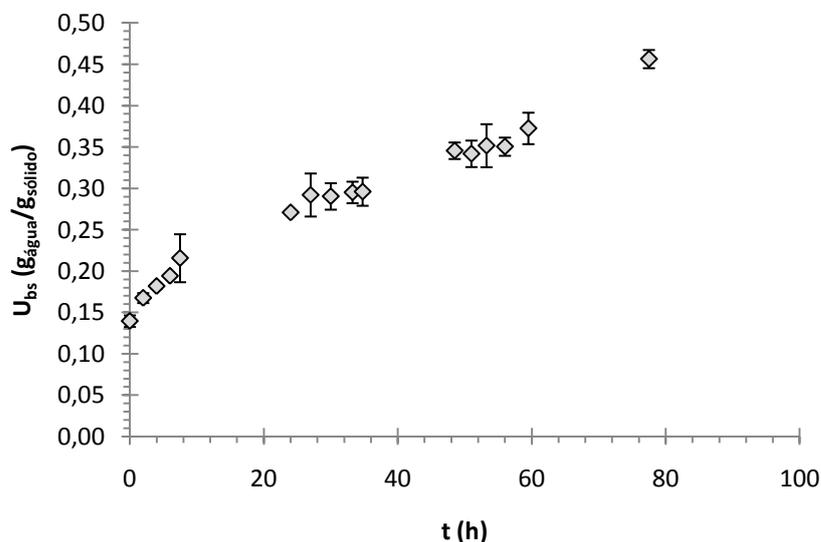


Figura 4.1: U_{bs} sementes de painço em função do tempo no processo de umidificação a 30°C e a 40°C.

No procedimento de umidificação a 30°C, a umidade de 30%(b.s.) na semente foi alcançada com 36h. É possível observar nesta figura três fases do aumento da umidade das sementes de painço em função do tempo de umidificação. A presença de três fases de

captação da água no processo de germinação de sementes foi discutida por Kerbauy (2004). A primeira fase de umidificação ocorreu nas primeiras 26 horas, com uma tendência de aumento acentuado na U_{bs} das sementes. Segundo Kerbauy (2004), nesta fase, o metabolismo da semente se inicia minutos depois da introdução de água na semente. A segunda fase aconteceu de 26 a 40 horas de umidificação com estagnação da U_{bs} em torno de 0,29 (b.s.). Esta fase é caracterizada pelo início de processos metabólicos importantes na preparação da emergência da radícula. Na terceira fase, a partir da 40^a hora, a umidade nas sementes começa a aumentar novamente, devido às mudanças que as células da radícula sofrem quando se expandem para completar a germinação.

Foram realizados testes de umidificação a 40°C, entretanto, nesta temperatura as sementes foram umidificadas muito rapidamente, evidenciando-se rachaduras e emergência da radícula nas mesmas. De acordo com Mayer & Poljakoff-Mayber (1989) citado por Prado, a umidificação acelerada pode causar injúrias às sementes, causando desorganização da membrana celular, rupturas em seus tecidos, manifestadas pela diminuição do vigor das plântulas e germinação anormal. Desta forma, escolheu-se a temperatura de 30°C para os ensaios de umidificação, para assegurar que a velocidade de umidificação não provocasse danos físicos, térmicos e fisiológicos às sementes. Para evitar que se trabalhasse com sementes em processo germinativo, escolheu-se para umidade máxima da semente 30% (b.s.), trabalhando com sementes numa faixa de umidade entre 13% e 30% (b.s.).

4.2. Caracterização de sementes e do leito de sementes

Na Tabela 4.1 estão apresentadas as propriedades físico-químicas das sementes de *Setaria italica* L. quando obtidas do comércio de São Carlos, com umidade inicial de $(13,0 \pm 1,0)\%$ (b.s.).

Através do peneiramento, pôde-se obter a distribuição granulométrica. Foram usadas as peneiras com aberturas de diâmetros médios 2,0, 1,7 e 1,4 mm, sendo que uma fração mássica de 94,4% ficou retida na peneira intermedária, 4,9% na de maior diâmetro e 0,7% na de diâmetro menor como mostra a Figura 4.2. O diâmetro médio de Sauter, calculado através da Equação 2.1 está na Tabela 4.1.

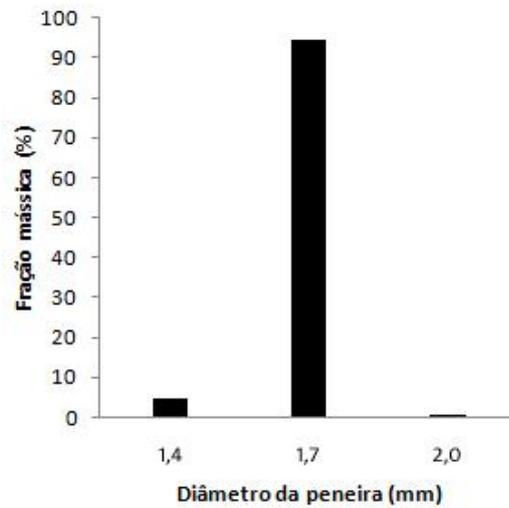


Figura 4.2: Frações mássicas de sementes obtidas em cada peneira.

Tabela 4.1: Propriedades físico-químicas das sementes de *Setaria italica* L.

Propriedades Físico-químicas	Dados
Umidade em base seca	$U_{bs} = (0,13 \pm 0,01)$
Diâmetro médio de Sauter	$\bar{D} = 1,68 \text{mm}$
Comprimento	$L = (2,96 \pm 0,10) \text{mm}$
Largura	$W = (2,21 \pm 0,05) \text{mm}$
Espessura	$T = (1,67 \pm 0,07) \text{mm}$
Diâmetro da parte esférica (Equação 2.2)	$B = (1,92 \pm 0,06) \text{mm}$
Área superficial (Equação 2.3)	$S = (13,24 \pm 0,62) \text{mm}^2$
Volume (Equação 2.8)	$V = (4,25 \pm 0,32) \text{mm}^3$
Perímetro	$p = (6,58 \pm 0,32) \text{mm}$
Área	$A = (3,26 \pm 0,30) \text{mm}^2$
Esfericidade (Equação 2.4)	$\phi = 0,83$
Esfericidade (Equação 2.7)	$\phi = 0,75$
Massa específica real	$\rho_s = (1,399 \pm 0,001) \text{g/cm}^3$
Massa específica aparente	$\rho_{ap} = (1,170 \pm 0,008) \text{g/cm}^3$
Massa (1000 sementes)	5,471g
Volume (1000 sementes)	$4,673 \text{cm}^3$
Densidade do leito (bulk)	$\rho_b = 0,763 \text{g/cm}^3$
Porosidade da partícula	$\varepsilon_s = 0,164$
Porosidade volumétrica	$\varepsilon_b = 0,348$
Porosidade total	$\varepsilon_t = 0,455$

As propriedades das sementes foram determinadas ao longo do processo de umidificação para avaliar sua variação em relação ao teor de umidade. Os resultados serão apresentados a seguir.

a) Dimensões e perímetro

Os dados das dimensões (comprimento (L), largura (W) e espessura (T')) das sementes de painço) obtidas por paquímetro e do diâmetro da parte esférica (B) da semente para diferentes teores de umidade estão apresentados na Figura 4.3. As barras verticais indicam o desvio padrão relativo de cada grupo de medidas

De acordo com essa figura, pode-se observar uma pequena tendência de aumento do comprimento das sementes durante o processo de umidificação, sendo que para a faixa de umidade de 0,13 a 0,30 (b.s), houve uma variação de 3,7% nesta dimensão. Esta variação é menor do que a incerteza experimental na medida de cada ponto, que é devida aos erros sistemáticos de medida e à própria variabilidade natural das dimensões em uma amostra de sementes. Desta forma, considerou-se, para o comprimento, um valor médio de $(2,82 \pm 0,05)$ mm para a faixa de umidade analisada.

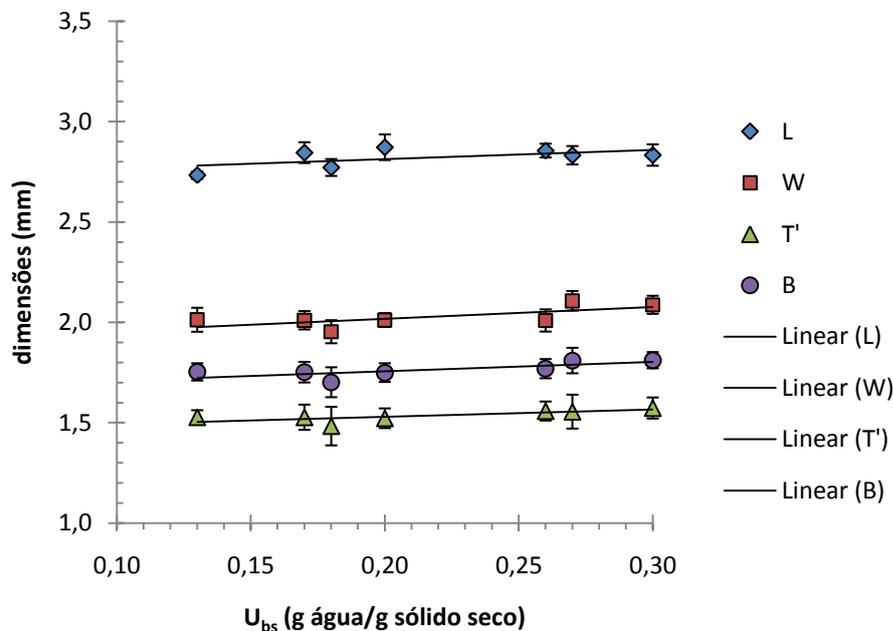


Figura 4.3: Dimensões da semente (L, W, T' e B) em função de U_{bs} .

Para a largura, espessura e diâmetro da parte esférica da semente também foi verificada uma tendência de aumento ao longo do processo de umidificação, observando-se

variações de 3,7; 3,0 e 3,3% para as respectivas dimensões na faixa de umidade investigada. Como verificado para o comprimento, as variações destas dimensões encontram-se dentro da incerteza experimental devido à variabilidade nas dimensões da amostra e a erros experimentais inerentes ao procedimento de medida, sendo os valores médios de W , T e B , iguais a $(2,03\pm 0,05)$, $(1,54\pm 0,03)$ e $(1,76\pm 0,04)$ mm, respectivamente.

Foi aplicado o teste t de Student, (HARRIS, 2005) com um nível de significância de 5% aos grupos de medidas de cada uma das dimensões lineares. Os testes confirmaram que a variação entre as dimensões lineares não foram estatisticamente significativas.

A Figura 4.4 mostra os dados do perímetro das sementes de *Setaria italica* L. obtidos por análise de imagens em função no teor de umidade.

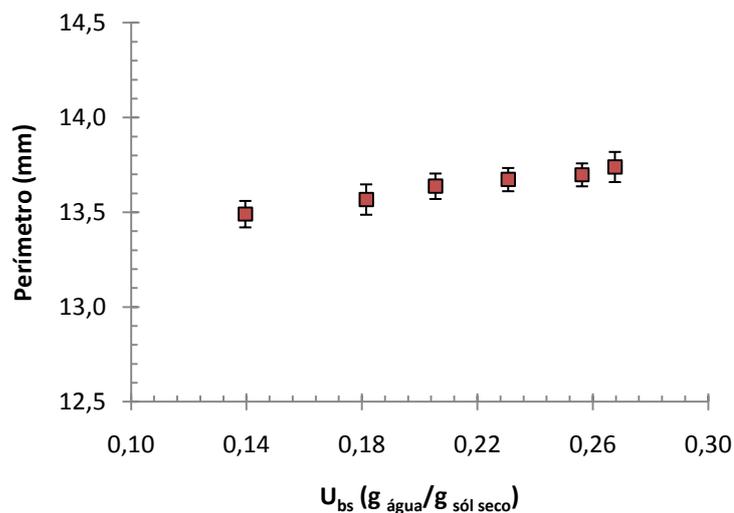


Figura 4.4: Perímetro da semente em função de U_{bs} .

De acordo com essa figura, o perímetro da semente manteve-se praticamente constante, com um valor médio de $(13,63\pm 0,09)$ mm. O teste t de Student, (HARRIS, 2005), aplicado com um nível de significância de 5% aos grupos de medidas de perímetro das sementes confirmou que a variação entre as médias do perímetro não foi estatisticamente significativa.

b) Área

A Figura 4.5 mostra a área projetada da semente, obtida por análise de imagens, em função do teor de umidade.

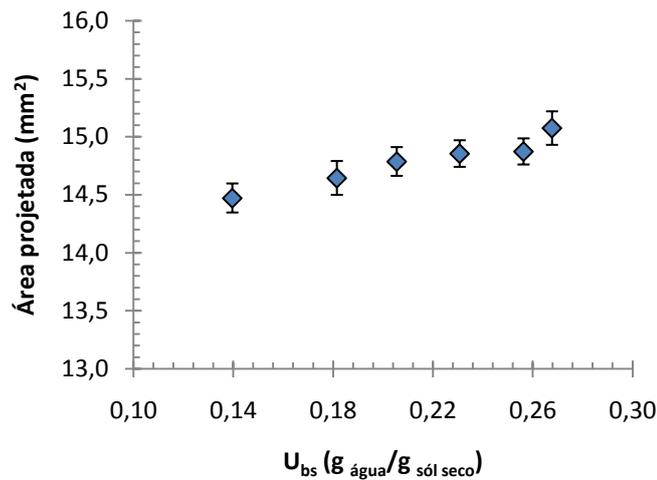


Figura 4.5: Área projetada em função de U_{bs} .

Os dados mostram leve tendência de aumento de 4,1%. O teste t de Studen, aplicado com um nível de significância de 5% aos grupos de medidas da área projetada das sementes, indicou que a variação entre as médias da área projetada não foi estatisticamente significativa. Assim, considera-se um valor médio de $(14,78 \pm 0,21) \text{ mm}^2$ para a área projetada.

A Figura 4.6 apresenta os dados da área superficial da semente, calculada pela Equação (2.3) a partir das dimensões medidas com paquímetro, em função do teor de umidade, indicando uma tendência de aumento da área superficial com o aumento do teor de umidade. Porém a variação (7,0%) novamente encontra-se dentro das incertezas das medidas.

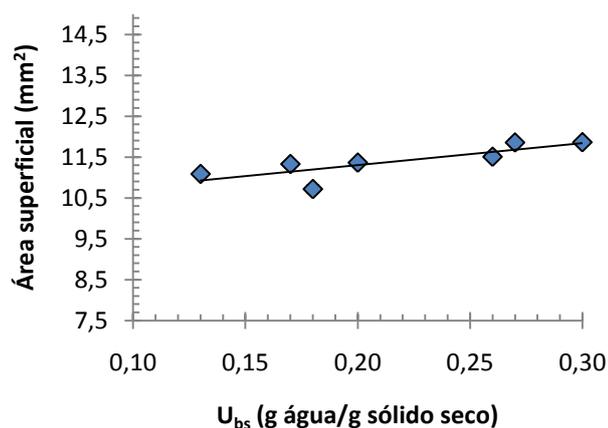


Figura 4.6: Área superficial em função de U_{bs} .

O aumento do desvio em cada ponto se deve aos erros sistemáticos da medida e à variabilidade do comprimento e do diâmetro da parte esférica da semente utilizados na Equação (2.3) para calcular a área. O valor médio da área superficial é de $(11,39 \pm 0,41) \text{ mm}^2$.

O teste t de Student aplicado com um nível de significância de 5% aos grupos de medidas da área superficial das sementes confirmou que a variação entre suas médias não foi estatisticamente significativa.

As variações observadas em L, W, T' e B, bem como no perímetro, na área projetada e na área superficial com o aumento do teor de umidade foram inferiores às incertezas experimentais causadas por erros sistemáticos de medidas e pela variabilidade nas dimensões de cada amostra de sementes.

c) Massa de 1000 sementes

A massa de 1000 sementes em função do teor de umidade está apresentada na Figura 4.7. As barras verticais indicam o desvio padrão relativo de grupo de amostras.

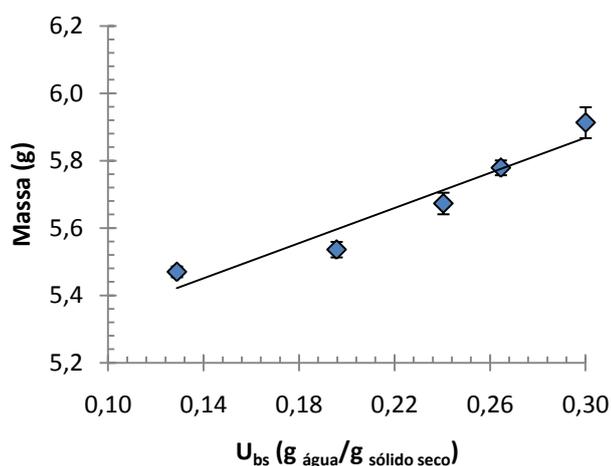


Figura 4.7: Massa de 1000 sementes em função de U_{bs} .

A massa de 1000 sementes mostrou um aumento linear de 8,1% para a faixa de 13,0% para 30,0% (b.s.), sendo confirmado pelo teste t, que foi aplicado com um nível de significância de 5% aos grupos de medidas da massa de sementes.

d) Volume

A Figura 4.8 mostra um aumento de 7,6% no volume de 1000 sementes com o aumento do teor de umidade de 13 a 30%, que foi confirmado com o teste t aplicado aos grupos de medidas do volume das sementes com um nível de significância de 5%.

Embora as medidas das dimensões lineares, obtidas com paquímetro, não tenham mostrado variação significativa com o teor de umidade, com os dados do volume das

sementes, determinado por picnometria líquida, foi possível observar tendência de aumento linear do volume em relação ao aumento do teor de umidade.

A variação no volume de, aproximadamente, $4,67 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ na umidade mais baixa, para $5,02 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ na condição final, equivale a um aumento de 2,07 mm para 2,12 mm no diâmetro de esfera equivalente, ou seja, uma variação de apenas 0,05 mm.

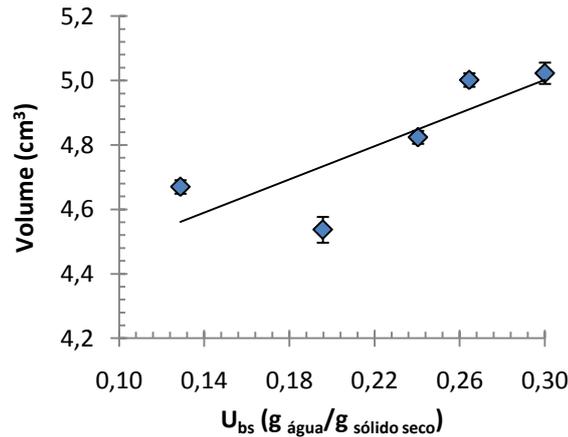


Figura 4.8: Volume de 1000 sementes em função de U_{bs} .

Desta forma, para a determinação do volume das sementes, o método da picnometria líquida se mostrou mais eficaz, por utilizar uma amostra maior de sementes, o que resulta em erros menores do que se tivessem sido utilizadas as dimensões obtidas com paquímetro.

e) Fator de forma

Para fator de forma foram utilizadas duas definições dadas pela Equação 2.4, e pela Equação 2.7.

A partir da Equação (2.4), os dados de redondeza, calculados com o perímetro e a área projetada da semente (obtidos por análise de imagens), em função da umidade estão apresentados na Figura 4.9.

O teste t aplicado aos grupos de medida com um nível de significância de 5% indicou que a redução de 1,3% na redondeza é estatisticamente significativa.

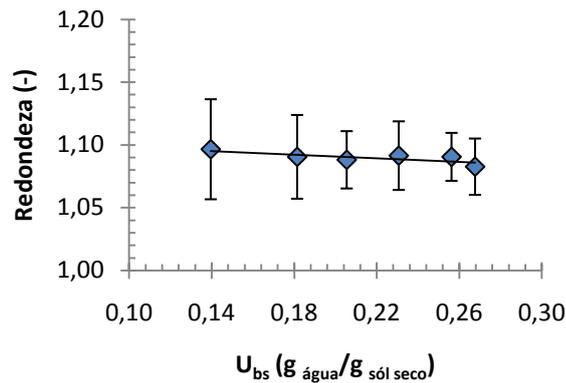


Figura 4.9: Redondeza da semente em função de U_{bs} .

Na Figura 4.10 são mostrados os dados de esfericidade obtidos pela Equação (2.7) a partir das dimensões medidas com paquímetro, em função do teor de umidade. Observa-se que a esfericidade, no final do processo é praticamente a mesma das sementes secas com um valor de $(0,73 \pm 0,01)$, sendo confirmado pelo teste t aplicado aos grupos de medidas, que não mostrou variação significativa.

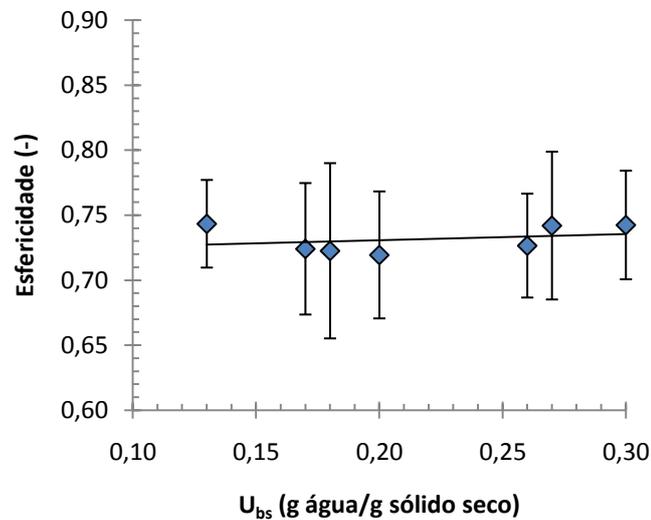


Figura 4.10: Esfericidade em função de U_{bs} .

Os fatores de forma calculados pelas duas definições permaneceram praticamente constantes com o aumento do teor de umidade. Estes resultados indicam que o aumento das dimensões foi proporcional, resultando em variação desprezível na forma das sementes, o que concorda com Arnosti Jr. (1997). As duas definições são comumente utilizadas para sementes, mas a dada pela Equação (2.7) é mais simples de ser obtida, já que usa as dimensões lineares.

f) Massa específica real

Os dados de massa específica real em função da umidade estão apresentados na Figura 4.11. A massa específica real passou de $1,40\text{g/cm}^3$ a 13,0% (b.s) para $1,47\text{g/cm}^3$ a 30,0% (b.s), um aumento de 5,2%. Não foram feitas réplicas para estas medidas, mas provavelmente, esta variação está dentro da incerteza experimental.

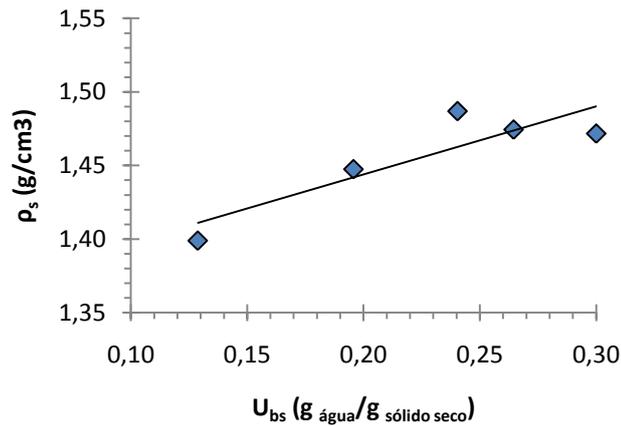
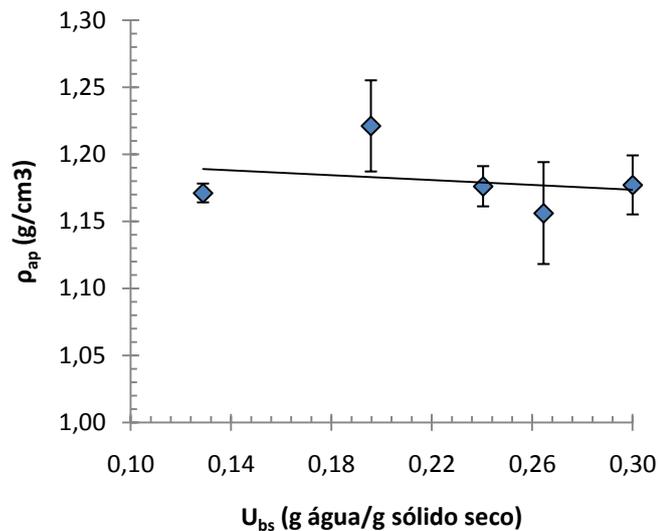


Figura 4.11: Massa específica real em função de U_{bs} .

g) Massa específica aparente

A Figura 4.12 mostra os dados da massa específica aparente em função do teor de umidade. As barras verticais indicam os desvios-padrão relativos de cada amostra.



4.12: Massa específica aparente em função de U_{bs} .

Não se observa, nesta figura, uma tendência clara de variação da massa específica aparente em relação à umidade da semente, sendo que o valor médio é igual a $(1,180 \pm 0,024) \text{ g/cm}^3$. O teste t aplicado aos grupos de medidas confirmou que a variação não foi significativa. Como a massa e o volume das sementes (Figuras 4.6 e 4.7) aumentaram em proporções próximas, infere-se que estas grandezas se compensaram, resultando em mudança pouco significativa na massa específica aparente.

h) Porosidade da partícula

A Figura 4.13 apresenta os dados de porosidade da partícula em função do teor de umidade.

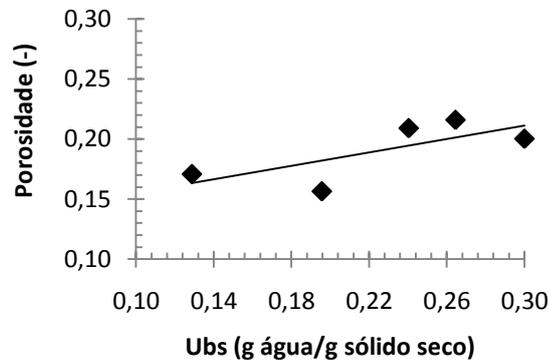


Figura 4.13: Porosidade da partícula em função de U_{bs} .

Com os dados de ρ_s e de ρ_{ap} , calculou a porosidade da partícula, utilizando a Equação (2.11). Os resultados de ϵ_s revelaram um aumento de 22,9% para a faixa de umidade de 13,3 a 30,0% (b.s), devido ao aumento na massa específica real.

i) Condutividade Térmica Efetiva

Avaliação do desempenho da sonda

Testes iniciais foram realizados com os leitos de sementes para verificar se a sonda utilizada era de fato adequada para determinar o K_{ef} do material em estudo. A Figura 4.14 mostra os dados de temperatura em função de $\ln(t)$ do leito de sementes inteiras.

A solução da equação do modelo, dada pela Equação (2.20), mostra uma relação linear entre $(T-T_0)$ e $\ln(t)$. Esta solução é obtida, assumindo que a fonte de calor tem espessura próxima de zero e comprimento infinito. A sonda é dimensionada para assegurar

que esta condição seja atingida após um período inicial de aquecimento. Pode-se observar através da Figura 4.14 que o comportamento linear é alcançado a partir de $\ln(t)$ maior que 5,6. Assim, para a obtenção do coeficiente angular (α), os pontos indicados pelos símbolos vazados nesta figura foram desconsiderados. Na região indicada pelos pontos cheios, o comportamento da curva é claramente linear, indicando que as restrições consideradas na solução do modelo foram satisfeitas.

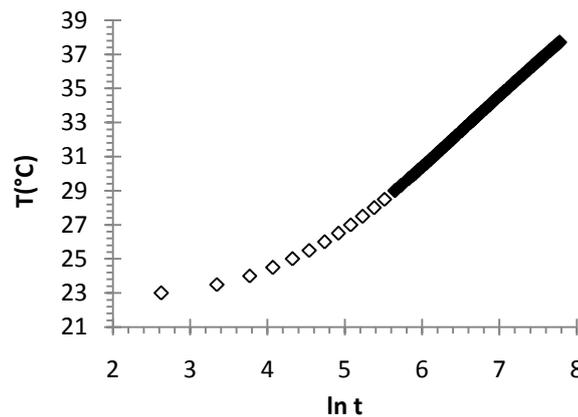


Figura 4.14: Temperatura em função de $\ln(t)$ dos ensaios para o leito de sementes inteiras.

Para todas as condições investigadas, as curvas de T em função de $\ln(t)$ mostraram valores de R^2 sempre superiores a 0,999 na região com comportamento linear. Os dados indicaram que a sonda utilizada foi adequada para a determinação do K_{ef} , do leito de sementes de *Setaria italica* L.. O mesmo comportamento foi observado nos ensaios efetuados com sementes em pó.

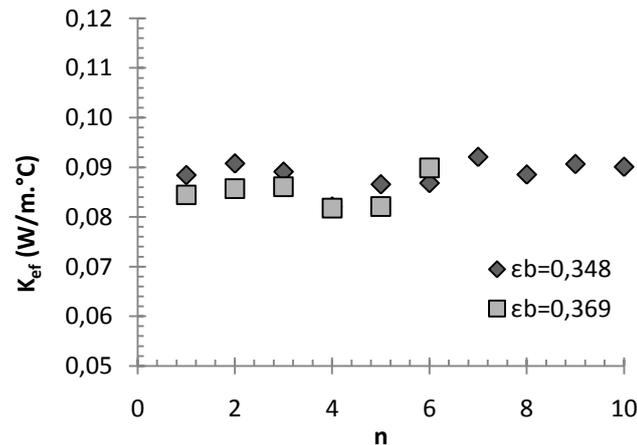
Reprodutibilidade das medidas de K_{ef}

Para os leitos constituídos por sementes ou pó, empacotados segundo a técnica descrita no item 3.1, foram realizados vários experimentos de determinação de K_{ef} com determinada fração de vazios, ε_b . O procedimento consistia em efetuar um empacotamento e realizar medidas sucessivas de K_{ef} , sem desestruturar o leito.

Os resultados e os valores de n medidas sucessivas para o leito de sementes inteiras com 13% (b.s) para dois empacotamentos estão mostrados na Figura 4.15 e na Tabela 4.3. Não foi possível obter leitos mais compactos no caso de sementes inteiras, uma vez que a aplicação da força para compactação resultaria em quebra das mesmas. Por isso, os dois empacotamentos possuem frações de vazio muito próximas, em torno de 0,359.

Tabela 4.2: Valores de K_{ef} para leitos de sementes.

ε_b	K_{ef} (W/m ² °C)
0,348	0,085±0,003
0,369	0,089±0,003

Figura 4.15: K_{ef} para o leito fixo de sementes com $\varepsilon_b^{med} = 0,359$ em função do número de medidas sucessivas.

Os resultados para o leito de sementes com teor de umidade de 13% (b.s.) mostraram boa reprodutibilidade nas medidas, com um valor de K_{ef}^{med} de $(0,087 \pm 0,003)$ W/m²°C para $\varepsilon_b=0,359$. No trabalho de Corrêa *et al.* (2004) foi encontrado um valor para K_{ef} de 0,124 W/m²°C para um teor de umidade de 13,5% (b.s.), um valor maior em relação ao obtido neste trabalho. Esta discrepância pode ser causada por diversos fatores. Um deles é o fato de que, embora se tratem de sementes de mesma espécie, é esperado que as características físicas variem por se tratar de um material biológico. Assim, fatores como plantio, solo, incidência de sol, local e época de colheita influenciam nas propriedades físicas das sementes e, conseqüentemente, em suas propriedades térmicas. Outro ponto a ser considerado é que Corrêa *et al.*, (2004) não informaram a fração de vazios desses empacotamentos. Esta pode variar de acordo com a técnica de empacotamento utilizada, bem como afetar o K_{ef} . Assim, faltam informações para uma comparação efetiva entre os valores obtidos.

A Figura 4.16 apresenta os resultados dos n testes efetuados com o leito de sementes em pó. Os ensaios foram feitos para leitos com diferentes frações de vazios. Primeiro, partiu-se de um empacotamento solto ($\varepsilon_b=0,603$). Depois, aplicou-se uma força

normal sobre a superfície do leito para compactá-lo, completando-se com a massa de pó necessária para o completo preenchimento do leito.

Para cada ε_b foram feitas sucessivas medições de K_{ef} , de forma a avaliar a reprodutibilidade das medidas para cada empacotamento.

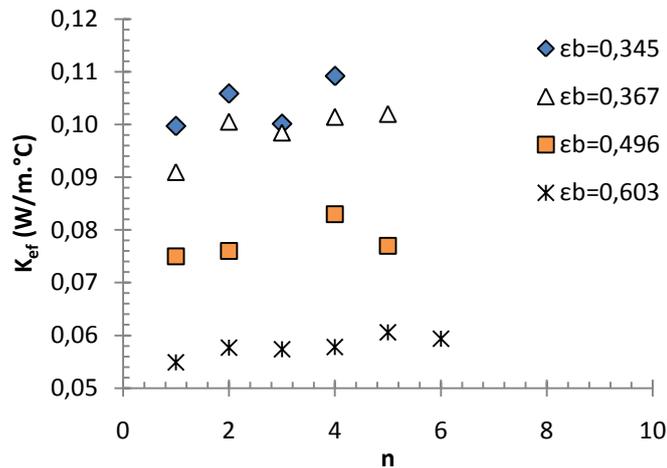


Figura 4.16: K_{ef} para o leito fixo das sementes em pó em função do número de medidas sucessivas.

A dispersão das medidas em um dado empacotamento foi superior à observada para os leitos de sementes inteiras. Na Tabela 4.4 são fornecidos os valores das condutividades térmicas obtidas para diferentes ε_b e seus respectivos desvios-padrão. Nota-se que o desvio-padrão máximo foi de $\pm 0,004$ W/m.°C, o que ainda caracteriza uma boa reprodutibilidade para as medidas. K_{ef} diminuiu com o aumento da fração de vazios, o que está de acordo com o comportamento esperado do ponto de vista físico, pois quanto maior a fração de vazios, maior a quantidade de ar no leito e, conseqüentemente, a condutividade do meio tende a diminuir já que o ar é um mau-condutor de calor.

Tabela 4.3: Valores de K_{ef} para leitos de sementes em pó.

ε_b	K_{ef} (W/m°C)
0,345	0,104+0,004
0,367	0,099+0,004
0,496	0,078+0,004
0,603	0,058+0,002

Reprodutibilidade do empacotamento

O empacotamento de partículas no interior de um leito fixo é caótico por natureza. Sabe-se que as características estruturais do recheio dependem fortemente da forma

e do tamanho do material, bem como da forma pela qual as partículas se arranjam no interior do leito. Mesmo com os cuidados experimentais tomados no empacotamento, não é possível garantir “a priori” que os recheios tenham de fato características reprodutíveis de forma a não afetar a determinação de K_{ef} . Assim, para avaliar o efeito da reprodutibilidade do empacotamento do recheio nas medidas de K_{ef} , foram realizados ensaios sucessivos para leitos com uma mesma fração de vazios, nos quais o recheio foi desestruturado e refeito antes de cada medida, tentando-se reproduzir o mesmo valor médio de ε_b .

Os valores e os resultados de n medidas de K_{ef} do leito das sementes e do pó das sementes, apresentados nas respectivas Tabelas 4.5 e 4.6 e Figuras 4.17 e 4.18, foram consistentes com os obtidos nos ensaios apresentados nos testes de reprodutibilidade das medidas de K_{ef} .

Tabela 4.4: Valores de K_{ef} do leito de sementes.

ε_b	K_{ef} (W/m ² °C)
0,348	0,088±0,002 W/m. ² °C
0,369	0,084±0,002 W/m. ² °C

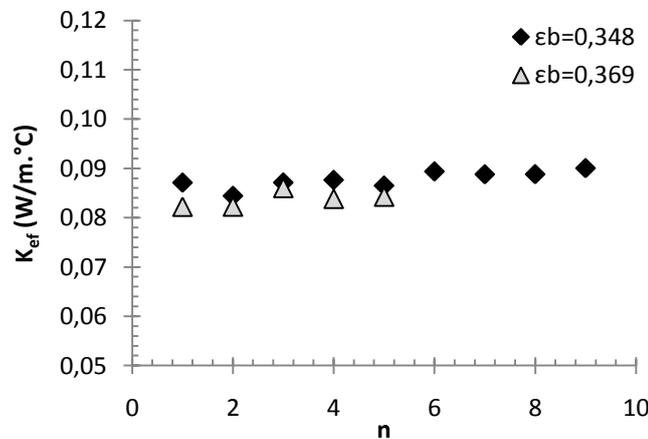


Figura 4.17: K_{ef} dos leitos de sementes em função do número de medidas sucessivas, para $\varepsilon_b^{med} = 0,359$.

Tabela 4.5: Valores de K_{ef} do leito do pó das sementes.

ε_b	K_{ef} (W/m ² °C)
0,345	0,098±0,007 W/m. ² °C
0,357	0,099±0,004 W/m. ² °C
0,367	0,095±0,003 W/m. ² °C
0,496	0,074±0,002 W/m. ² °C

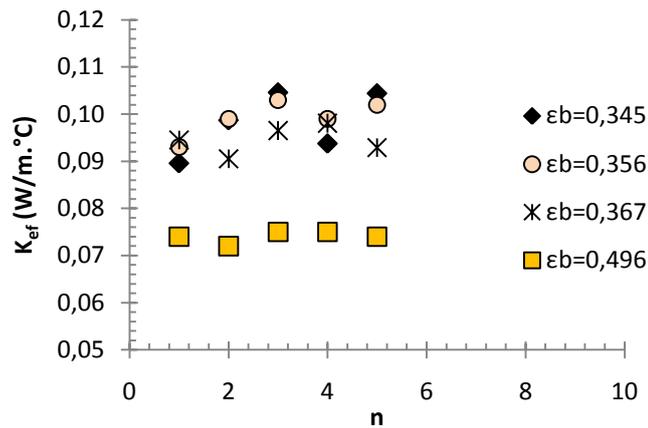


Figura 4.18: K_{ef} dos leitos das sementes em pó em função do número de medidas sucessivas, para diferentes ε_b^{med} .

As medidas de K_{ef} para os leitos de sementes mostraram desvio-padrão máximo de $\pm 0,002$ W/m.°C e para os leitos de pós o maior desvio-padrão verificado foi de $\pm 0,007$ W/m.°C para ε_b de 0,345. A partir destes resultados, infere-se que os empacotamentos são reprodutíveis.

Estimativa da condutividade térmica da fase sólida

Para estimar, experimentalmente, o K_s da fase sólida da semente construiu-se um gráfico dos valores médios de K_{ef} do material pulverizado em função da fração de vazios, como mostra a Figura 4.19. A partir dos dados experimentais, efetuou-se um ajuste linear, extrapolando-se a curva até $\varepsilon_b=0$, o que possibilitou estimar a condutividade da fase sólida, $K_s=0,152$ W/m.°C.

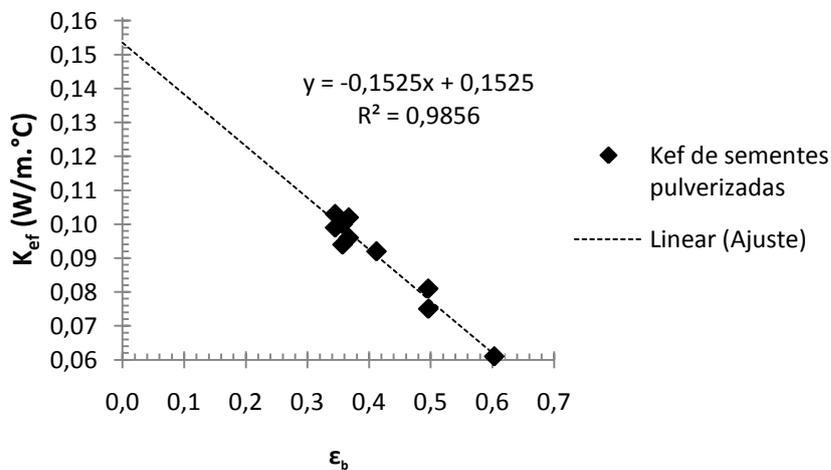


Figura 4.19: K_{ef} em função da ε_b do leito de sementes em pó.

Com o objetivo de avaliar a utilização de correlações para estimativa de K_{ef} a partir das condutividades das fases individuais, estimou-se a K_s da semente pulverizada testando-se correlações baseadas nas regras de mistura. A condutividade térmica do ar (K_f) nas temperaturas dos experimentos foi obtida em Incropera e DeWitt (2003). Dentre as correlações testadas, Equação (2.22), (2.23) e (2.24), a Equação (2.22) forneceu $K_s^{est} = 0,133$ W/m.°C, o valor mais próximo do extrapolado para $\varepsilon_b=0$, com um desvio de 14,5%.

Influência da umidade na K_{ef}

As sementes em pó foram umidificadas com uma quantidade de água necessária para a umidade pretendida, seguindo a metodologia de Coskuner e Karababa (2007b), a fim de analisar a influência da umidade na K_{ef} . A homogeneização da amostra deu-se por processo mecânico e, em seguida, esta foi armazenada sob refrigeração a 5°C por 24h, dividida em pacotes de polietileno vedados.

Foram realizados cerca de cinco testes para determinar a K_{ef} média, sem desestruturar o leito de partículas, para cada um dos seguintes teores de umidade, 14,4; 18,1; 21,0; 24,0 e 30,0% (b.s). A porosidade bulk média do leitos empacotados para os cinco diferentes teores de umidade foi $(0,406 \pm 0,010)$. Os resultados de K_{ef} média em função da umidade para o leito do pó da *Setaria italica* se encontram na Figura 4.20.

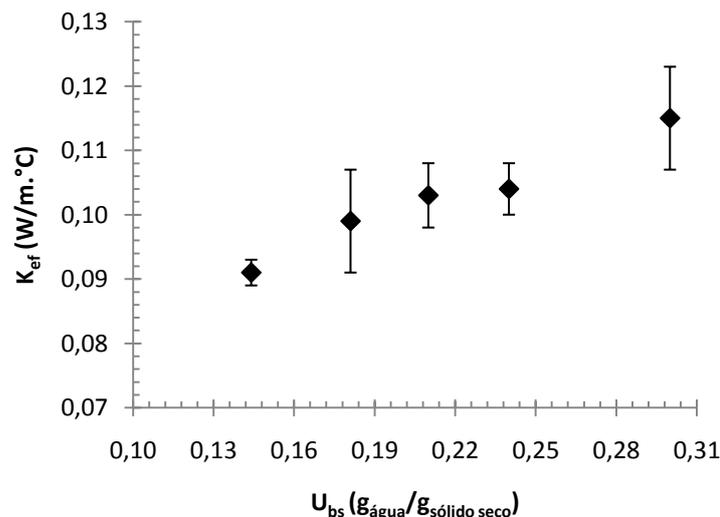


Figura 4.20: K_{ef} em função de U_{bs} para o leito de sementes em pó.

De acordo com essa figura, para um intervalo de 13 a 30% no teor de umidade, o K_{ef} do leito das sementes em pó variou de 0,091 a 0,115 W/m.°C, um crescimento de

26,4%. O maior desvio padrão das medidas de K_{ef} foi de $\pm 0,008$ W/m. $^{\circ}$ C para os teores de umidade de 18,1 e 30,0% (b.s). No trabalho de Subramanian e Viswanathan (2003), com a farinha da semente de *Setaria italica* L, foi verificado um aumento linear de 0,100 a 0,132 W/m. $^{\circ}$ C em K_{ef} para uma variação de 10,0 a 30,0% (b.u) na umidade, comportamento semelhante ao encontrado no presente trabalho.

4.3. Secagem em camada fina

Neste item será apresentada a análise de cinética de secagem em camada fina das sementes de painço, uma vez que esta é importante para o estudo da secagem em leito fixo por representar um elemento de volume do leito em camada espessa. Sob condições externas constantes, ou seja, admitindo-se que com o ar de secagem se encontrava em condições constantes de umidade e temperatura, foi possível observar a variação da umidade das sementes por um determinado intervalo de tempo e escolher a equação que melhor representasse o comportamento do material para a faixa de velocidade e temperatura do ar de secagem estabelecida.

Os dados da umidade adimensional (MR) em função do tempo de secagem em camada fina estão apresentados na Figura 4.21.

Observando esta figura, pode-se dizer que as curvas de secagem apresentaram somente períodos de secagem a taxas decrescentes, indicando predominância do mecanismo difusivo no processo de secagem. Este comportamento corresponde ao esperado para as sementes, pois o período de secagem a taxa constante só existe quando estas estão em estado imaturo ou quando são excessivamente umidificadas (Ferreira, 2003), oferecendo menor resistência para a remoção da água (BARROZO, 1995).

Pode-se verificar ainda que as curvas, para uma dada temperatura, encontram-se sobrepostas, indicando que o efeito da velocidade do ar no intervalo de 0,5 a 1,5m/s é pouco significativo. Os tempos necessários para que o material entre em equilíbrio dinâmico nas duas velocidades são bem parecidos. Assim, pode-se afirmar que não foi evidenciada uma dependência da secagem em camada fina das sementes de painço em relação a faixa de velocidade do ar de secagem utilizada.

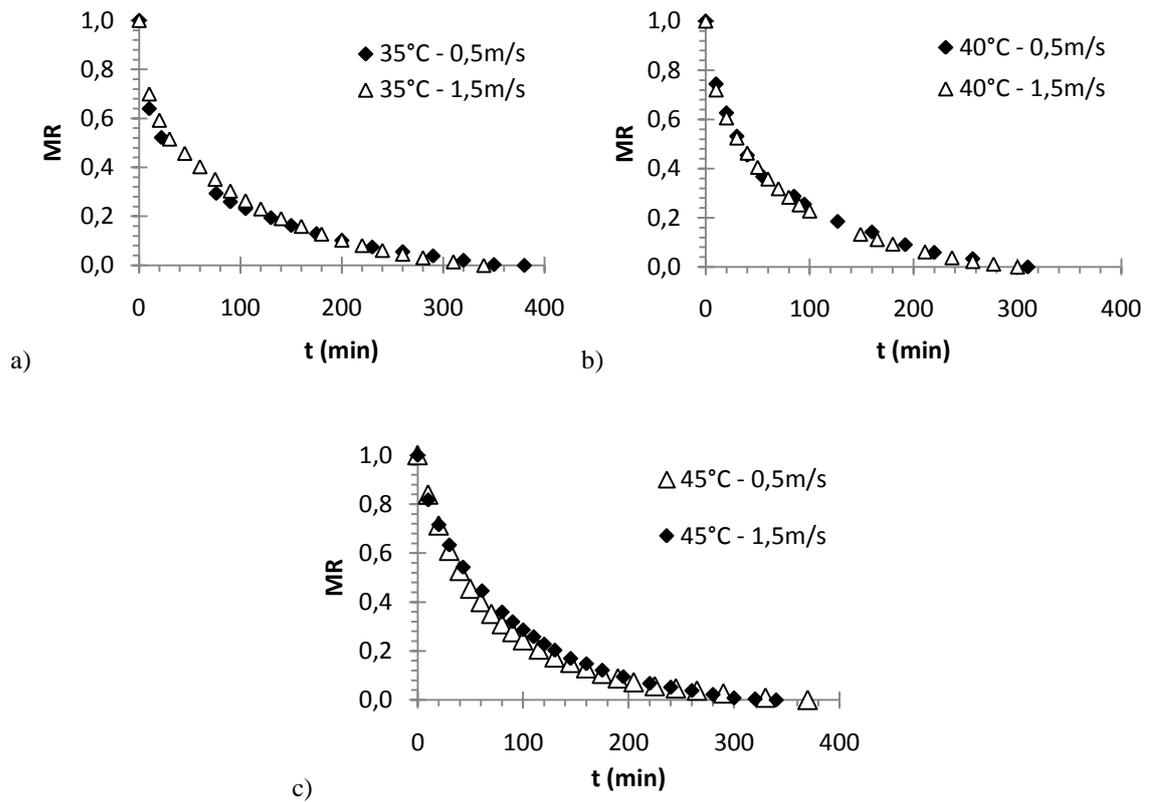


Figura 4.21: MR em função do tempo para a secagem em camada fina das sementes de painço nas temperaturas a) 35°C; b) 40°C e c) 45°C, parametrizados na velocidade do ar de secagem.

Todas as curvas de cinética de secagem em camada fina estão apresentadas na Figura 4.22.

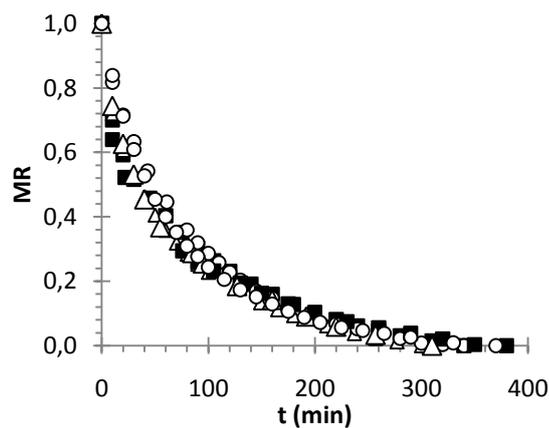


Figura 4.22: MR em função do tempo para a secagem em camada fina das sementes de painço.

Apesar de o processo ser difusivo, não se observou efeito significativo da temperatura no processo, pois as curvas estão sobrepostas. Isto se deve a estreita faixa de

temperatura utilizada. A variação de 10°C não foi suficiente para observar a influência da temperatura na secagem do material em estudo através de diferenças visíveis entre as curvas.

Os dados de MR em função do tempo de secagem das sementes foram ajustados às equações semi-empíricas para estimativa da taxa de secagem. Foram testadas as equações propostas por Brooker et al (1974), Ezeike e Otten (1991), Henderson e Henderson (1968), Overhults *et al.* (1973), Page (1949) e Srzdenicki *et al.* (1986) (Quadro 2.1).

Na Tabela 4.6 estão apresentados os parâmetros das equações ajustadas aos dados de secagem em camada fina das sementes de *Setaria italica* L. para as velocidades de 0,5 e 1,5m/s, parametrizados nas temperaturas de 35, 40 e 45°C.

Tabela 4.6: Parâmetros das equações ajustadas para secagem em camada fina.

V_{ar} (m/s)		0,5			1,5		
		35	40	45	35	40	45
Brooker <i>et al.</i>	c	0,8375	0,8976	0,9570	0,8454	0,8909	0,9471
	k	0,0126	0,0146	0,0138	0,0118	0,0149	0,0122
Ezeike e Otten	a	0,6226	0,3118	0,2654	0,2906	0,2514	0,9014
	b	0,0094	0,0827	0,0388	0,1696	0,1447	0,0116
	c	0,3772	0,6865	0,7360	0,7097	0,7483	0,0987
	d	0,1626	0,0106	0,0112	0,0097	0,0121	0,1924
Henderson e Henderson	c	0,7863	0,8413	0,8989	0,7993	0,8371	0,8918
	k	0,0120	0,0134	0,0129	0,0112	0,0139	0,0115
Overhults <i>et al.</i>	k	0,1251	0,1309	0,1207	0,1211	-0,1316	0,1138
	n	0,1251	0,1309	0,1207	0,1211	-0,1316	0,1138
Page	k	0,1051	0,0552	0,0256	0,0647	0,0535	0,0223
	n	0,5800	0,7145	0,8702	0,6649	0,7290	0,8810
Srzdenicki <i>et al.</i>	a	0,6190	0,6822	0,7259	0,7095	0,7469	0,9013
	k_1	0,0094	0,0106	0,0112	0,0097	0,0120	0,0117
	e_1	0,0980	0,0894	0,1036	0,0770	-0,0325	0,2189
	b	0,4795	0,3813	0,3222	0,3436	0,2916	0,1039
	k_2	0,1320	0,0631	0,0237	0,1475	0,1209	0,1771
	e_2	0,1000	0,0962	0,1001	0,0463	-0,0432	0,0998

O coeficiente de correlação (R^2) foi o primeiro critério estatístico para selecionar a melhor correlação. Além do R^2 , a raiz quadrada do erro médio (RMSE), definida pela Equação (3.5) e o chi-quadrado (χ^2) definido pela Equação (3.6) foram usados para

determinar a qualidade do ajuste. Quanto maior o valor de R^2 e menores os valores de RMSE e de χ^2 , melhor o ajuste obtido.

Na Tabela 4.7, estão apresentados os valores dos critérios estatísticos dos ajustes das equações para velocidades de 0,5 e 1,5m/s, parametrizados nas temperaturas de 35, 40 e 45°C. As equações de Ezeike e Otten (1991), Srzdenicki *et al.* (1986) e Page (1949) apresentaram R^2 maiores que 0,990. Todas as equações apresentaram valores de RMSE menores que 0,08062, mas as de Ezeike e Otten (1991), Srzdenicki *et al.* (1986) e Page (1949) mostraram os menores valores. O maior valor de χ^2 obtido foi 0,00743, mas os menores foram obtidos pelas equações de Ezeike e Otten (1991), Srzdenicki *et al.* (1986) e Page (1949).

Tabela 4.7: Valores de R^2 , de SE e de P das equações ajustadas aos dados de cinética de secagem em camada fina das sementes.

		0,5m/s			1,5m/s		
		35°C	40°C	45°C	35°C	40°C	45°C
R²	Brooker et al (1974)	0,977	0,976	0,996	0,966	0,981	0,996
	Ezeike e Otten (1991)	0,999	0,998	1,000	0,998	0,999	0,999
	Henderson e Henderson (1968)	0,987	0,988	0,999	0,980	0,991	0,999
	Overhults et al. (1973)	0,943	0,960	0,994	0,929	0,964	0,993
	Page (1949)	0,998	0,997	1,000	0,990	0,996	0,998
	Srzdenicki et al. (1996)	0,999	0,998	1,000	0,998	0,999	0,999
RMSE	Brooker et al (1974)	0,05943	0,04451	0,01762	0,04740	0,03703	0,01628
	Ezeike e Otten (1991)	0,00934	0,00944	0,00384	0,01072	0,00694	0,00788
	Henderson e Henderson (1968)	0,04855	0,03129	0,01000	0,03610	0,02509	0,00873
	Overhults et al. (1973)	0,08062	0,05738	0,02177	0,06895	0,05015	0,02363
	Page (1949)	0,02223	0,01211	0,00573	0,02587	0,01616	0,01344
	Srzdenicki et al. (1996)	0,00927	0,00931	0,00396	0,01078	0,00760	0,00788
X²	Brooker et al (1974)	0,00404	0,00231	0,00034	0,00250	0,00153	0,00032
	Ezeike e Otten (1991)	0,00012	0,00012	0,00002	0,00014	0,00007	0,00008
	Henderson e Henderson (1968)	0,00269	0,00114	0,00011	0,00145	0,00070	0,00008
	Overhults et al. (1973)	0,00743	0,00384	0,00052	0,00528	0,00281	0,00061
	Page (1949)	0,00056	0,00017	0,00004	0,00074	0,00029	0,00020
	Srzdenicki et al. (1996)	0,00012	0,00015	0,00002	0,00016	0,00008	0,00008

Segundo os critérios adotados, as melhores equações para o ajuste dos dados experimentais foram as de Ezeike e Otten (1991) e Srzdenicki *et al.* (1986), entretanto, estas equações possuem 4 e 6 parâmetros, respectivamente. Dentre as equações com 2 parâmetros, a de Page (1949) foi a que melhor representou os dados experimentais, apresentando R^2 maior que 0,99 e os baixos valores de RMSE e de χ^2 . Assim, adotou-se a equação de Page como a

mais indicada para descrever a cinética de secagem em camada fina das sementes de painço. A constante k é conhecida como constante de secagem, e pode ser função da temperatura do ar de secagem. Como no intervalo investigado o efeito da temperatura e da velocidade do ar foi pequeno, testou-se um ajuste único para os 115 dados experimentais, utilizando a equação de Page.

A Figura 4.23 mostra os dados experimentais de MR em função do tempo em comparação com a equação de ajuste.

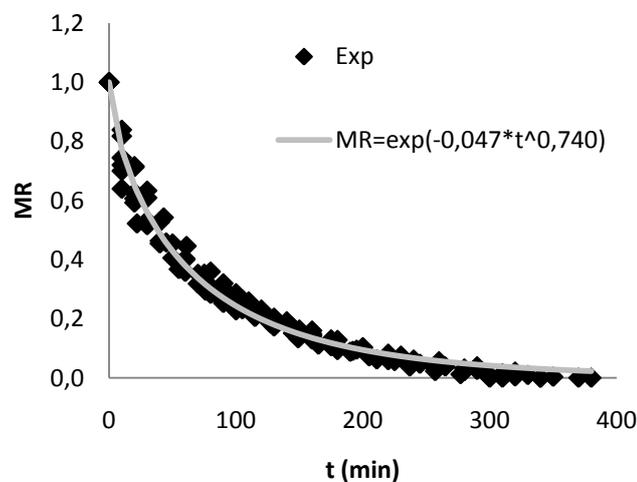


Figura 4.23: MR em função do tempo de secagem, dados experimentais de secagem em camada fina e preditos pela equação de Page.

Essa figura mostra que a equação representa bem os dados experimentais para a faixa de temperatura e velocidade investigadas. Este ajuste forneceu um $k = 0,047 \pm 0,003$ e um $n = 0,740 \pm 0,015$. Para os parâmetros estatísticos foram obtidos R^2 de 0,992, RMSE de 0,03325 e χ^2 de 0,000112, o que indica um bom ajuste aos dados experimentais.

4.4. Secagem em leito fixo

Permeabilidade do leito

Inicialmente foi avaliada a permeabilidade do leito de sementes, de acordo com a metodologia descrita no item 3.4. Os dados de queda de pressão em função da velocidade do ar no leito de *Setaria italica* L. para as temperaturas de 35 e 45°C estão apresentados na Figura 4.24.

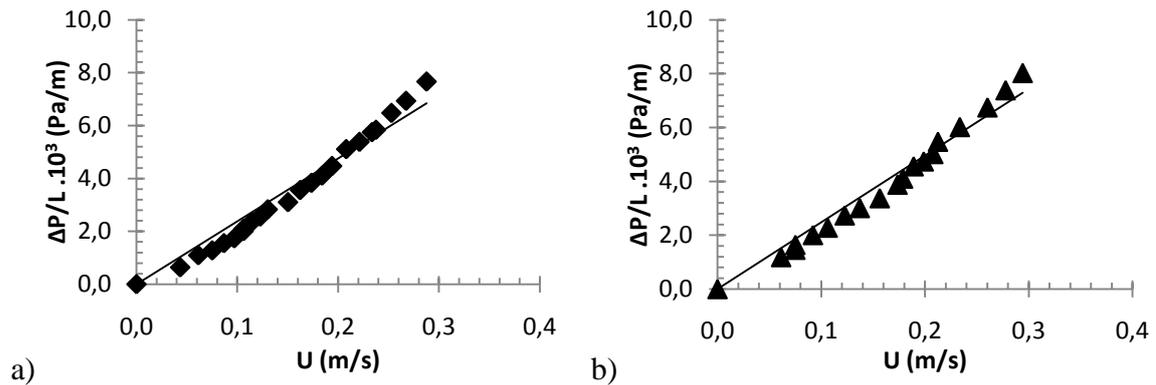


Figura 4.24: $\Delta P/L$ em função de U a temperatura do ar de a) 35°C e b) 45°C.

A partir dos dados dessa figura, foram utilizadas as equações de Darcy (2.16) e de Forcheimer linearizada (2.17) para encontrar a que melhor representou os dados de $\Delta P/L$ em função de U do leito de sementes de painço.

O ajuste linear dos dados de permeabilidade por meio da equação de Darcy apresentou R^2 de 0,963 para o teste a 35°C e 0,974 para o teste a 45°C. Já o ajuste linear com a equação de Forcheimer apresentou R^2 de 0,948 para o teste a 35°C e 0,895 para 45°C. Devido aos melhores R^2 na faixa de velocidades testada, adotou-se o modelo de Darcy para representar os dados de queda de pressão em função da velocidade do ar no leito de sementes de *Setaria italica* L como mostra a Figura 4.24. O ajuste linear forneceu permeabilidade de $7,92 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ para o leito de sementes a temperatura do ar de 35°C e de $7,79 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ a 45°C.

Secagem em leito fixo

A seguir serão apresentados os resultados do estudo da secagem em camada espessa com o objetivo de avaliar como a umidade e a temperatura do leito variam ao longo da altura do leito e do tempo de secagem. Foram realizados testes na mesma faixa de temperatura avaliada na secagem em camada fina, 35, 40 e 45°C. Trabalhou-se com a máxima vazão de ar fornecida pelo soprador para a operação do secador em modo leito fixo, que resultou em uma velocidade de 0,41 m/s. Serão apresentados e discutidos aqui os dados obtidos para as temperaturas de 35 e 45 °C, já que os resultados para 40°C foram similares.

Os dados de umidade em função da posição no leito fixo de sementes para os tempos de secagem (10, 30 e 50 minutos) com temperatura do ar de secagem de 35°C estão apresentados na Figura 4.25.

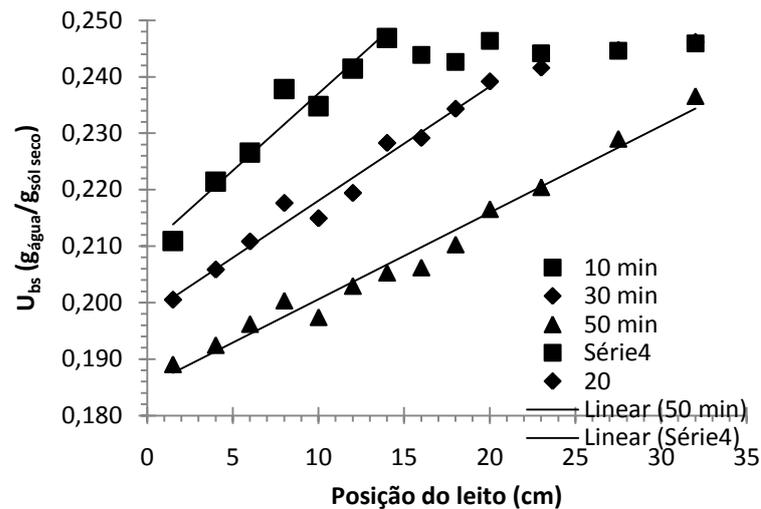


Figura 4.25: U_{bs} em função da altura do leito para a secagem em leito fixo a 35°C, parametrizado no tempo de secagem.

Analisando essa figura, pode-se observar que para o tempo de 10 minutos, a frente de secagem atingiu a posição 14,0 cm do leito de sementes, enquanto que as camadas superiores permaneceram com U_{bs} média de $(24,5 \pm 0,2)\%$. Já com 30 minutos de secagem, nota-se que houve redução no teor de umidade até a posição 23,0cm. O tempo de 50 minutos de secagem mostrou-se suficiente para que a frente de secagem atingisse toda a altura do leito, notando-se neste tempo uma variação linear de umidade ao longo de toda a altura do leito fixo, apresentando uma diferença de 25,1% entre o maior e o menor teor de umidade. Estes dados indicam que a frente de secagem leva cerca de 50 minutos para alcançar todo o leito e que a secagem não é uniforme ao longo da altura.

Quando o ar quente, com baixa umidade, passa por entre as primeiras camadas do leito de sementes, as sementes úmidas são rapidamente aquecidas, fazendo com que o vapor d'água migre para a superfície das mesmas e seja transferido rapidamente para o ar. À medida que o ar sobe, sua temperatura diminui e sua umidade relativa aumenta até o ponto em que não é capaz de transferir calor para as sementes e estas de transferir massa para o ar. Com isso, as camadas superiores recebem menor quantidade de calor, fazendo com que seja necessário maior tempo para atingir a temperatura do ar de secagem e possibilitar a transferência de massa da mistura gás-sólido para o ar. Isto faz com que seja estabelecido um gradiente de temperatura e de umidade dentro do leito.

Nas regiões de perfil linear é possível estimar o gradiente de umidade, ajustando-se equações de reta aos pontos experimentais. Este ajuste forneceu valores de gradientes de umidade de $0,0027 \text{ cm}^{-1}$ para $t=10 \text{ min}$; $0,0020 \text{ cm}^{-1}$ para $t=30 \text{ min}$ e $0,0015$

cm^{-1} para $t=50$ minutos, o que indica que a taxa de variação diminuiu à medida que aumentou o tempo de secagem.

Como há escoamento de ar aquecido com umidade variável, as camadas ao longo do leito vão sendo aquecidas no decorrer do tempo. Chega um determinado tempo em que a transferência de calor e de massa ocorre em todo o leito, mas este tempo varia com a posição no leito, como pode ser melhor observado na Figura 4.26 que mostra os dados U_{bs} em função do tempo, parametrizados na altura do leito e na Figura 4.27 que mostra a temperatura do leito em função do tempo de secagem em diferentes alturas.

Os dados na Figura 4.26 também demonstram a não-uniformidade da secagem, reforçando as observações feitas na análise da figura anterior. É possível verificar que existem posições no leito, a partir de $z=23$ cm, em que com 30 minutos de secagem as umidades ainda permaneciam no valor inicial, ou seja, estas posições não foram atingidas pela frente de secagem.

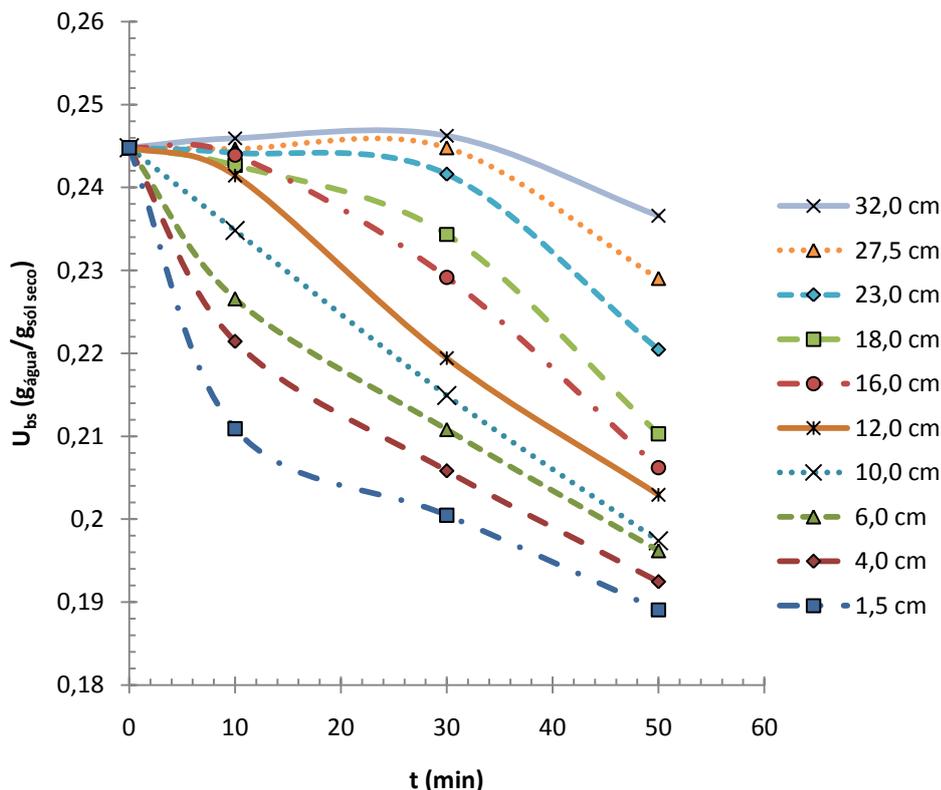


Figura 4.26: U_{bs} em função do tempo para a secagem em leito fixo com temperatura do ar de secagem de 35°C parametrizada na altura do leito.

Na Figura 4.27, verifica-se que a temperatura do ar na entrada do leito no tempo $t=0$ é inferior a 30°C . Ocorre um rápido aquecimento das sementes localizadas perto

da base do leito (entre 1,5 e 8,0 cm) nos primeiros minutos de secagem, enquanto que nas posições entre 12,0 e 16,0 cm o aumento de temperatura ocorre mais lentamente. A partir de uma altura de 20 cm, a temperatura do leito diminui em relação ao valor da entrada, e só passa a aumentar novamente depois de um tempo de secagem de cerca de 30 minutos. Para a maior altura, a temperatura permaneceu constante e igual a cerca de 21 °C durante os 50 minutos de secagem, o que representa uma queda de 14 °C em relação à temperatura de entrada do ar

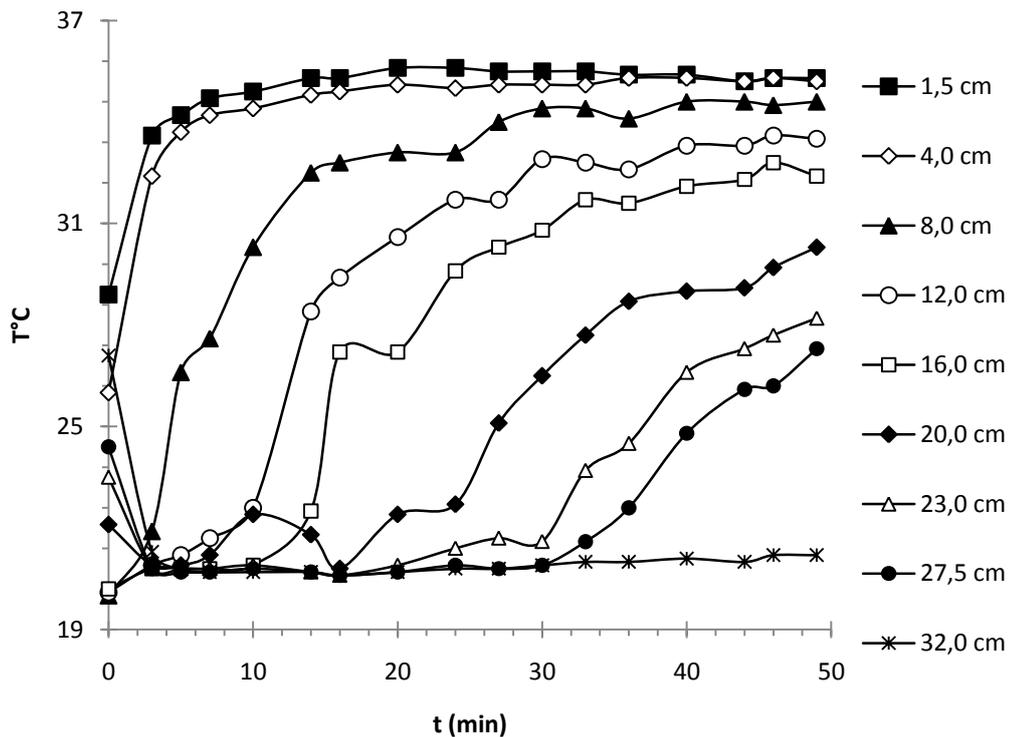


Figura 4.27: Temperatura do leito em função do tempo de secagem a 35°C parametrizados na altura do leito.

Com isto, os maiores decréscimos da umidade ocorreram nas posições entre 1,5 a 12,0 cm, enquanto isso, as camadas mais elevadas permaneceram com suas umidades praticamente constantes durante cerca de 30 minutos. As posições em que foi observada diminuição da temperatura, em dado intervalo de tempo, coincidem com aquelas em que a umidade permaneceu inalterada em relação ao valor inicial. Foi só a partir de 30 minutos de secagem que todas as camadas do leito mostraram decréscimo em suas umidades.

A Figura 4.28 apresenta os dados de U_{bs} em função da altura do leito parametrizados no tempo de secagem a 45°C.

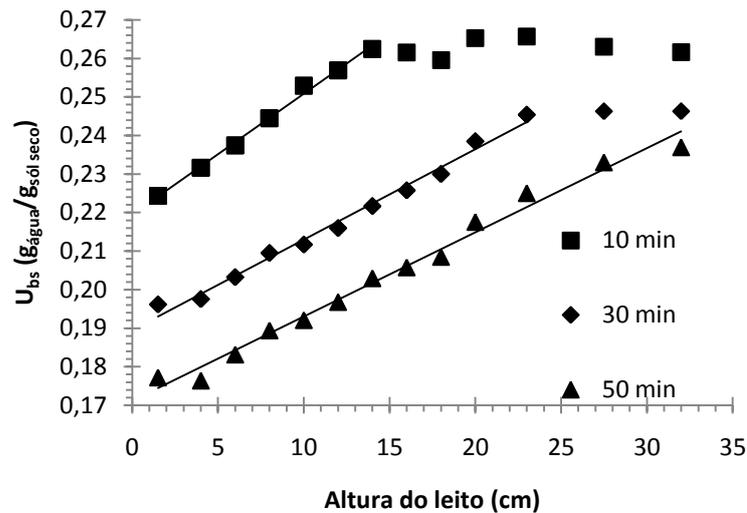


Figura 4.28: U_{bs} em função da altura do leito parametrizado no tempo de secagem.

De acordo com essa figura, observa-se novamente a variação linear de umidade ao longo da posição. Os resultados dos testes a 45°C foram semelhantes aos dos testes a 35°C , entretanto pode-se observar que para um dado tempo de secagem, o gradiente de umidade aumenta em relação ao do teste a 35°C , indicando que as taxas de transferência de calor e de massa são maiores em virtude do aumento da temperatura do ar. O valor do gradiente de umidade para um tempo de 10 minutos foi de $0,0031\text{ cm}^{-1}$. Já os valores dos gradientes de umidade para os tempos de 30 e 50 minutos foram praticamente idênticos: $0,0023$ e $0,0022\text{ cm}^{-1}$, respectivamente.

A Figura 4.29 mostra a umidade em função do tempo para secagem a 45°C , e a Figura 4.30 mostra a temperatura em função do tempo, parametrizado na altura do leito. Nesta figura é possível visualizar o comportamento de U_{bs} em função do tempo de secagem a 45°C para diferentes posições do leito de sementes. A variação da umidade com o tempo é muito acentuada principalmente nas posições inferiores, tendendo a diminuir com o aumento da altura. Diferentemente do observado na Figura 4.26, não se observam aqui patamares constantes de umidade em nenhuma posição.

A Figura 4.30 mostra que a temperatura do leito aumenta em todas as camadas a partir de um tempo de 10 minutos de secagem. Estes resultados confirmam que o aumento da temperatura provoca aumento nas taxas de transferências de calor e massa, conforme o esperado.

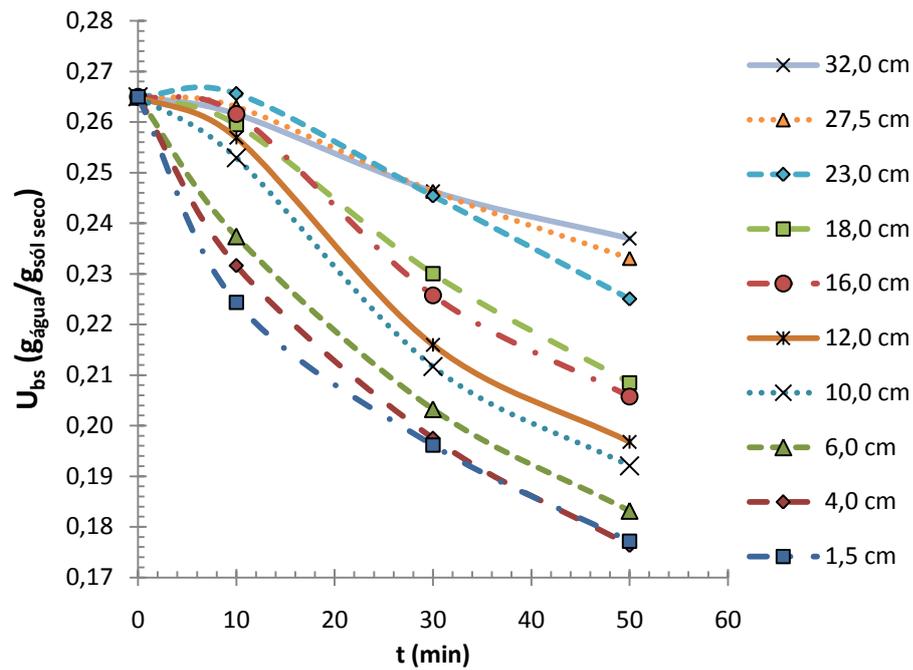


Figura 4.29: U_{bs} em função do tempo para a secagem em leito fixo a 45°C , parametrizado na altura do leito de sementes.

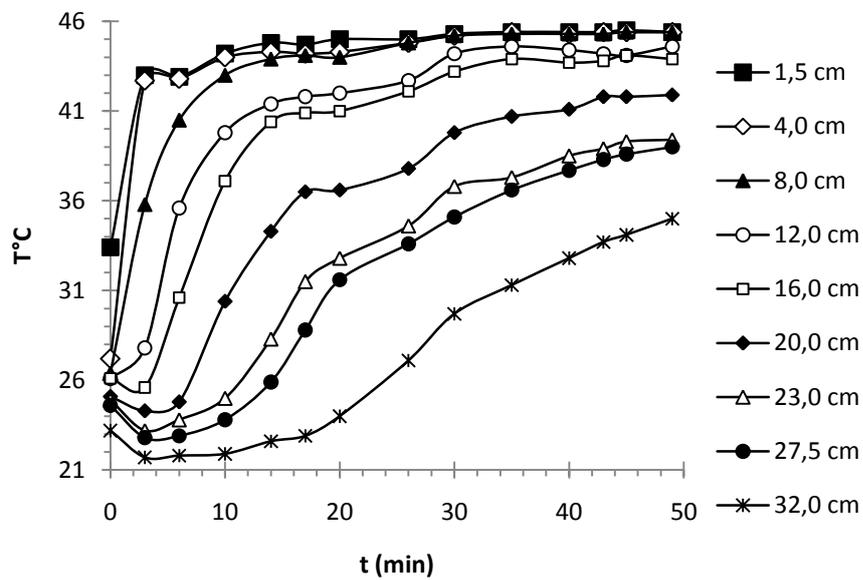


Figura 4.30: Temperatura do leito em função do tempo de secagem, parametrizada na altura do leito de sementes.

Os resultados mostram que em qualquer das temperaturas do ar de secagem os gradientes de temperatura e de umidade ao longo da altura do leito são elevados e que a secagem em leito fixo produzirá um material com distribuição não-uniforme de umidade, para leitos com espessuras superiores a 4,0 cm.

4.5. Secagem em leito fluidizado

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados da secagem das sementes em leito fluidizado. Inicialmente, fez-se a caracterização fluidodinâmica para obtenção de U_{mf} .

Curva característica

Os ensaios fluidodinâmicos foram feitos utilizando a mesma altura para sementes secas (13% (b.s)) e úmidas (30% (b.s)), formando um empacotamento solto com 13,0 cm de altura e ϵ_b de 0,397 e 0,393, respectivamente. A Figura 4.31 mostra os dados da queda de pressão no leito de 13 cm de altura em função da velocidade superficial do ar decrescente.

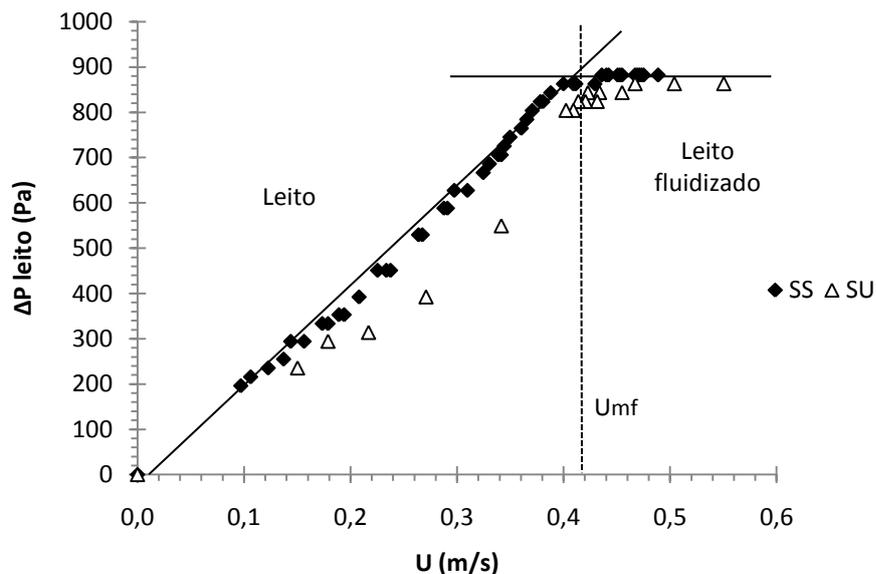


Figura 4.31: ΔP no leito em função de U para sementes secas (SS) e sementes úmidas (SU).

Com os dados de ΔP em função de U ajustou-se uma reta na região do leito fluidizado e outra na região do leito fixo e, pela intercessão das duas, estimou-se a velocidade de mínima fluidização, U_{mf} . O valor desta medida obtida para o leito de sementes a 13% (b.s) foi de 0,41m/s e para o leito de sementes com 30% (b.s), de 0,45 m/s, um valor cerca de 10% superior. A U_{mf} do leito de sementes úmidas foi maior para superar o peso do leito que era maior que o do leito de sementes secas. Através de testes preliminares verificou-se o aumento da densidade bulk (ρ_b) e uma queda na porosidade bulk (ϵ_b) do leito de sementes com o

aumento do teor de umidade. Isto ocorreu devido ao aumento na massa das sementes referente a quantidade de água absorvida por elas.

Adotou-se para a velocidade de secagem o valor de 1,0 m/s para assegurar a movimentação intensa e boa mistura das partículas.

Secagem em leito fluidizado

Uma vez que a fluidização promove intensa movimentação das sementes no leito, impedindo a formação de gradientes de temperatura e umidade e, assim, promovendo maior uniformidade na secagem das mesmas, realizou-se os testes de secagem em leito fluidizado para as sementes de *Setaria italica* L..

Os dados de MR em função do tempo de secagem das sementes em leito fluidizado para as temperaturas de 35, 40 e 45°C estão apresentadas na Figura 4.32.

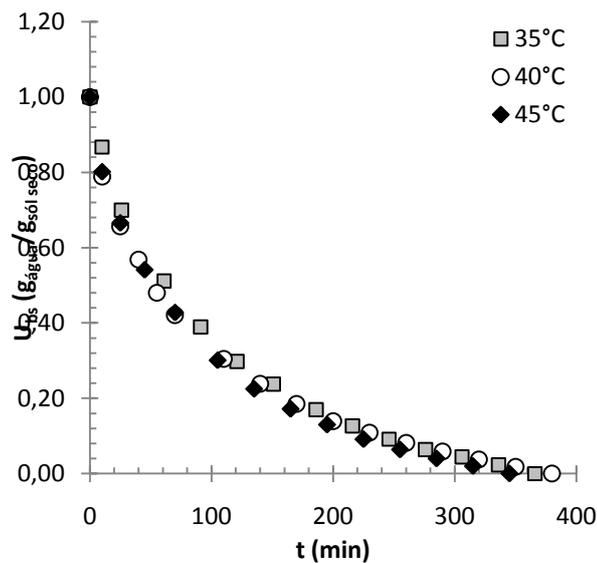


Figura 4.32: MR em função do tempo de secagem das sementes em leito fluidizado parametrizado na temperatura do ar de secagem, $U=1,0$ m/s.

De acordo com essa figura, não foi observado período de secagem a taxa constante nas curvas, ficando evidenciado, portanto, a predominância do mecanismo difusivo no processo de secagem. Assim como na secagem em camada fina, não foi observada influência da temperatura na faixa investigada.

Como a equação que melhor representou os dados de secagem em camada fina foi a de Page, foi feito o ajuste dos dados obtidos na secagem em leito fluidizado com esta

equação utilizando-se todos os pontos experimentais e avaliando-se a qualidade do ajuste pelos mesmos critérios estatísticos usados no item 4.3.

O ajuste com a equação de Page forneceu um $k = 0,0268 \pm 0,0004$ e um $n = 0,816 \pm 0,003$. Para os parâmetros estatísticos obteve-se R^2 de 0,997, RMSE de 0,023395 e χ^2 de 0,000573, indicando um bom ajuste aos dados experimentais. A comparação entre a equação ajustada e os valores experimentais pode ser visualizada na Figura 4.33.

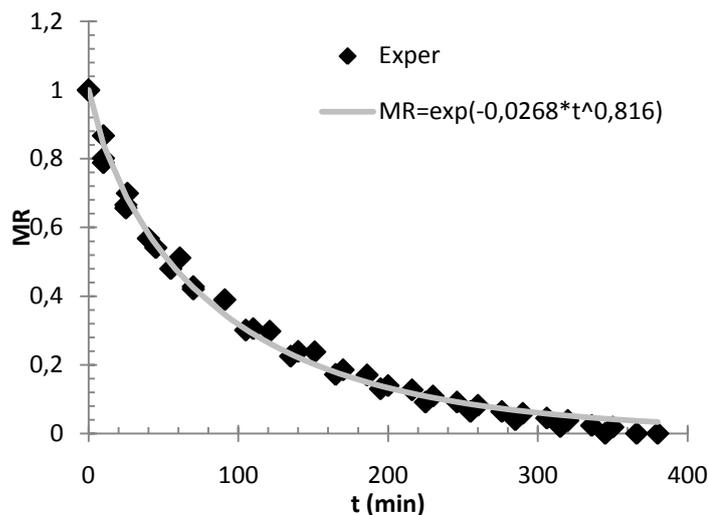


Figura 4.33: MR em função do tempo de secagem, parametrizados nos dados experimentais de secagem em leito fluidizado e preditos pela equação de Page.

Os resultados mostram que em leito fluidizado é possível reduzir o teor de umidade das sementes para um valor adequado em cerca de 400 minutos, utilizando-se uma temperatura do ar de 35 °C.

As metodologias e análises desenvolvidas permitiram caracterizar as sementes de painço em função do seu teor de umidade e determinar uma equação confiável para a cinética de secagem em camada fina no intervalo de 35 a 45°C. Para a secagem em leito fixo, a maior espessura recomendada é de 4,0 cm, profundidade na qual não foram observados gradientes de temperatura, possibilitando secagem uniforme.

De acordo com a análise feita nas diferentes condições de secagem, pode-se dizer que a secagem em leito fluidizado se mostrou mais adequada por promover uma boa mistura das partículas, impedindo a formação de gradientes de temperatura e de umidade no leito como ocorre na condição de leito fixo. Entretanto, é importante efetuar uma análise de qualidade das sementes após a secagem em leito fluidizado para verificar se este processo interfere na capacidade germinativa e no vigor das sementes.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

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

Na faixa de umidade de 13 a 30 % (b.s.) as dimensões lineares das sementes, assim como o perímetro, área superficial, área projetada e esfericidade não apresentaram variação significativa. Obteve-se um valor de $(2,82 \pm 0,05)$ mm para comprimento, $(2,03 \pm 0,05)$ mm para largura, $(1,54 \pm 0,03)$ mm para espessura, $(1,76 \pm 0,04)$ mm para diâmetro da parte esférica da semente, bem como um valor de $(13,63 \pm 0,09)$ mm para o perímetro, $(14,78 \pm 0,21)$ mm² para área projetada, $(11,39 \pm 0,41)$ mm² para área superficial, $(0,73 \pm 0,01)$ para esfericidade da semente.

A massa das sementes variou de 5,5 a 5,9g (8,1%) para um aumento na umidade de 13 para 30% (b.s.). O volume das sementes variou de 4,7 a 5,0 cm³ para a faixa de umidade entre 13 e 30% (b.s.). A massa específica real variou de 1,43 g/cm³ (para sementes com 13% (b.s.)) a 1,46 g/cm³ (para sementes com 27% (b.s.)). A massa específica aparente manteve-se constante com valor médio de $(1,180 \pm 0,024)$ g/cm³. A porosidade da partícula (ε_s) variou de 0,16 para 0,20 com o aumento de umidade de 13 a 30 % (b.s.).

A sonda testada mostrou-se adequada para a determinação da condutividade térmica efetiva K_{ef} do leito de sementes inteiras e em pó. Para os leitos constituídos de sementes com fração de vazios $\varepsilon_b=0,348$, o valor de K_{ef} obtido foi igual a $(0,089 \pm 0,003)$ W/m.°C e para o leito de sementes em pó com $\varepsilon_b=0,345$ K_{ef} foi de $(0,104 \pm 0,005)$ W/m.°C. Nos leitos de sementes pulverizadas, K_{ef} diminuiu com o aumento da fração de vazios. A condutividade térmica da fase sólida (K_s), estimada experimentalmente, foi igual a 0,152 W/m.°C. Entre as equações baseadas nas regras de mistura, a média ponderada foi a que forneceu um K_s mais próximo do experimental, 0,133 W/m.°C. No leito constituído por sementes em pó, foi observado um aumento no K_{ef} de 0,091 para 0,115 W/m.°C, um crescimento de 26,4% para um aumento no teor de umidade de 13 a 30 % (b.s.).

No estudo da cinética de secagem em camada fina verificou-se que a velocidade e a temperatura do ar não tiveram influência significativa na secagem das sementes de painço, para as condições operacionais estabelecidas neste trabalho, ou seja, para a faixa de velocidade do ar de secagem entre 0,5 e 1,5 m/s e de temperatura entre 35 e 45°C.

Entre as equações empíricas com apenas dois parâmetros, a que melhor representou os dados da cinética de secagem das sementes de painço em camada-fina, para todas as condições de temperatura e velocidade do ar testadas foi a de Page.

A permeabilidade do leito fixo de sementes determinada experimentalmente é igual a $7,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Os testes de secagem das sementes em leito fixo mostraram que as camadas próximas à base do leito secam mais rapidamente, já que entram em contato com o ar mais aquecido e com menor teor de umidade do que as camadas superiores. Como resultado, a umidade e temperatura variam ao longo da altura do leito, sendo que a variação de umidade é linear. Para as temperaturas de 35°, 40° e 45°C foram necessários 50 minutos para que a frente de secagem atingisse toda a altura do leito. Para a secagem em leitos fixos, recomenda-se utilizar uma camada de sementes com altura máxima de 4,0 cm, pois até esta posição a temperatura do leito atinge rapidamente um patamar constante e se mantém uniforme, indicando ser possível reproduzir as condições de camada-fina.

A velocidade de mínima fluidização determinada experimentalmente para as sementes com 30% (b.s) foi igual a 0,45 m/s. Pela análise das curvas de secagem em leito fluidizado, não foi verificada influência da temperatura na faixa investigada. A equação de Page foi a que melhor representou os dados de secagem em leito fluidizado.

Devido às características de intensa movimentação das partículas, a secagem em leito fluidizado permite a redução da umidade das sementes de maneira uniforme, sendo que, em princípio, esta seria a técnica mais recomendada para a secagem do painço. Pode-se ainda recomendar que a secagem seja efetuada a temperatura de 35°C.

Este trabalho possibilitou a determinação de propriedades importantes para a avaliação de processos de secagem de sementes de painço, bem como sua variação como teor de umidade. Além disto, possibilitou uma avaliação quantitativa dos processos de secagem de sementes em leito fixo e fluidizado.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES

Para trabalhos futuros com sementes de *Setaria itálica* L. são apresentadas algumas sugestões:

- fazer um estudo das isotermas de equilíbrio das sementes;
- realizar testes de análise de qualidade após o processo de secagem para saber se as condições operacionais e o modo de secagem são adequados para esta semente quando a germinação é um dos objetivos pretendidos, e
- efetuar a modelagem do processo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALONE, R.; GASTON, A.; CASSINERA, A.; LARA, M. A. Thin Layer Drying of Amaranth Seeds. **Biosystems Engineering**, v. 93 n. 2, p. 179–188, 2006.

ALMEIDA, C. **Recobrimento de sementes de brócolos em leito de jorro e leito fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 148p., 2002.

ALMEIDA, C; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**. V. 59, n. 4, p. 645-652, 2002.

AMIN, M. N.; HOSSAIN, M. A; ROY, K. C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 1, p.83-87, 2004.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC Intl**, 17th edn. Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Communities. 2000.

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

AVIARA, N. A.; GWANDZANG, M. I.; HAQUE, M. A. Physical properties of guna seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 73, n. 2, p. 105-111, 1999.

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

BARYEH, E. A. Physical properties of bambara groundnuts, **Journal Food Engineering**. v. 47, p. 321-326, 2001.

BLACKWELL, J. H. Radial-axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders. **Canadian Journal of Physics**, v. 31. p. 472-479, 1952.

BOTTERILL, J.S.M.. **Fluid-bed heat transfer: gas-fluidized bed behaviour and its influence on bed thermal properties**. London: Academic Press, 1975. 299 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes**. Brasília; SNDA/DNFV/CLV, 1980. 188p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. The Avi Publish Company, Inc., Westport, Connecticut, 1974. 265p.

CAMACHO, D. G.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, marc-abr, v. 34, n. 2., p.603-608, 2004

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; VIANA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. Oxford Univ. Press. 1959.

CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165p.

CASTILHO, G.J.; GASCHI, P.S.; PARAÍSO, P.R.; JORGE, L.M. Estudo da secagem do farelo de soja em leito fluidizado. **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ)**. Campinas, SP. 2005. Disponível em: <http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/> Acessado em 3 de setembro de 2008.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), [Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"](#), Universidade de São Paulo, 85p., 1996.

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

CHICARONI, E. P. **Efeito da reumidificação e secagem em leito esteria na qualidade da sementes de *Brachiaria brizantha***. Trabalho de graduação. DEQ/UFSCar, São Carlos-SP, 83p.,1999.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; RIBEIRO, D. M.; SILVA, F. S. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 162-167, 2006.

CORRÊA, P. C.; ANDRADE, E. T.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Propriedades térmicas da massa granular de milho, alpiste e painço: determinação e modelagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 6, n. 1, p. 39-45, 2004.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.2, p.110-119, 2003.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de Secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Em camadas delgadas. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, maio/ago. 2007.

COSKUNER, Y.; KARABABA, E. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 408-416, 2007a.

COSKUNER, Y.; KARABABA, E. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **Journal of Food Engineering**, v.78, p.1067-1073, 2007b.

DENUCCI, S.; PORTAS, A. A.; BONATTI, J. L. **Painço Português ou Moha (*Setaria italica*) nova opção agrícola**. Disponível em: http://www.cati.sp.gov.br/novacati/tecnologias/painco/painco_portugues.htm. Acesso em: 20 de setembro de 2008.

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**, v.17, p.7-13, 1987.

EMBRAPA. **Recomendações técnicas para o cultivo do sorgo granífero**. Sete Lagoas MG: CNPMS, 1983. 62p. (Circular técnica, 1).

EZEIKE, G. O. I.; OTTEN, L. Two compartment model for drying unshelled melon (egusi) seeds. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 33, n. 1, p. 73-78, 1991.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Composição aproximativa dos alimentos**. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/007/x3996p/x3996p18.htm>. Acessado em 10 setembro de 2008a.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. ***Setaria italica* (L.) Beauv.** Disponível em: <http://www.fao.org/ag/AGP/agpc/doc/GBASE/DATA/PF000314.HTM> Acessado em 1 de outubro de 2008b.

FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 235p., 2004.

FONSECA, A. **Sistema de produção de sorgo para o cerrado: Secagem e armazenamento**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2002. 3p.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. M. Sc. Thesis - Cranfield Institute of Technology, National College of Agricultural Engineering, 122p., 1981.

FUMAGALLI, F. **Estudo da secagem de sementes de *Brachiaria brizantha***. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 149p., 2007.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. M. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, mar-abr, 2004.

GLOBO RURAL, “**Safra de painço**”, Disponível em: <http://globoruraltv.globo.com/GRural/0,27062,LTO0-4370-33178 7,00.html>. (Acessado em 9 de novembro de 2009).

GRUPO PRÓ-SORGO SUL. **Sorgo granífero: cultivo e utilização**. Pelotas, RS: Associação Brasileira de milho e sorgo, 1989. 40p.

HARRIS, D. C. **Análise química quantitativa**. 6ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2005. 450p.

HENDERSON, J.M.; HENDERSON, S.M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 13(2), p. 87-95, 1968.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation, **Transactions of the ASAE**, p. 1167-1172, 1974.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Carlos Alberto Biolchini da Silva (Trad.). 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 2003.

JAIN; R. K., BAL; S. Physical properties of pearl millet. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, p. 85 – 91. 1997.

KARATHANOS, V. T.; KANELLOPOULOS, N. K.; BELESSIOTIS, V. G. Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 167-183, 1996.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, v. 8, n. 1, p. 33-37, 1965.

KERBAUY, G.B. 200. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, Trumbull, v.16, n.4, p.305-314, 1993.

LORINI, I.; MILKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. **Secagem de grãos para propriedade familiar**. Campinas, SP: Biogênese, 2002. p. 253-287.

LUCCAS, P.; FERREIRA, M.; SARTORI, D.J.M.; FREIRE, J.T. Determinação de parâmetros térmicos de gramíneas. **In: Proceedings of the 9th Latin American Congress in heat and mass transfer**, San Juan, Puerto Rico, pp. 316-325, 2002.

MACEDO, G. A. R.; MARQUES NETO, J.; BATISTA, J. S. Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras. **Revista Brasileira de Sementes**, ano 9, n. 3, Brasília, DF, 29 – 37, 1987.

MAIA, M. **Secagem de sementes de azevém annual (*Lolium multiflorum* Lam.) com ar ambiente forçado**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas. 108p., 1995.

MANCINI, M.C. **Transferência de Massa em Secadores de Grãos**, Tese (Doutorado) - COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 142p., 1996.

MARTINS, R. R.; FRANCO, J. B. R.; OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologia de secagem de grãos**. Passo Fundo, RS: EMATER-RS: EMBRAPA, 1999. 90p.

MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. **Tópicos Especiais de Secagem**, São Carlos, SP, 1992. p. 2-39.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 189p.

MAYER, A. M.; POLJKOFF-MAYBER, A. **The germination of seeds**. 4. Ed. Londres, Pergamon Press, 1989. 270p.

MELO, L. A. **Análise da homogeneização da umidade de *Brachiaria brizantha* em secador de leito fixo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 108p., 2001.

MOHSEIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Scientific Publishers, 1970. v. 1.

MOHSEIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**, Gordon ad Breach, New York, 1980. 734 p., v. 2.

MOREIRA, E. A; INNOCENTINI, M. D. M.; SALVINI, V. R; PANDOLFELLI, V. C.; COURY, J. R. Permeabilidade de cerâmicas celulares. **Revista Universidade Rural-UFRJ**, v. 21, p. 177-185, 2002

MOURA, J. M.; FIGUEIREDO, M. M. Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus*. **Silva Lusitana**, 10(2): 207-216, 2002.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 2nd edition, New York: Marcel Dekker, v. 1, 742p., 1987.

MURAMATSU, Y.; TAGAWA, A.; SAKAGUCHI, E.; KASAI, T. Prediction of thermal conductivity of kernels and a packed bed of brown rice. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 241-248, 2007.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSSI, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, p. 1112-1113, 1973.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer**. Dissertação (Mestrado) - Purdue University, Indiana – U.S.A., 1949.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas. 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> (Acessado em 14 de agosto de 2010).

PESKE, S. T. **Secagem de sementes**. Curso de especialização por tutoria a distância. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. FAEM, 65p., 1991.

PRADO, C. H. B. A.; CASALI, C. A. **Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral**. Barueri: Manole, SP. 2006. 448p.

PRADO, M. M. **Secagem de sementes de mamão papaya**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 108p., 1999.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 162p., 2004.

PROTA – Plant resources of tropical Africa, “*Setaria italica* (L.) Beauv.”, Disponível em: <http://database.prota.org/search.htm> (Acessado em 10 de novembro de 2009).

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Propriedades térmicas de grãos de trigo: determinação e modelagem. **Ciencia Agrotécnica**, v. 31, n. 2, p. 462-467, 2007.

RIZZI JUNIOR, A. C. **Secagem de sementes de gramíneas (*Brachiara brizantha*) em leito fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 137 p., 2009.

ROSSI, S. J.; ROA, G. S. B. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com o uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: Academia de Ciência de Estado de São Paulo, n.22, 1980. 295p.

SÁNCHEZ-MENDOZA, J., DOMÍNGUEZ-LÓPEZ, A., NAVARRO-GALINDO, S., LÓPEZ-SANDOVAL J. A. Some physical properties of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as a function of moisture content. **Journal of Food Engineering**, v. 87, p. 391-397, 2008.

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

SILVA, L. C. **Secagem de grãos**. Boletim técnico - Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal do Espírito Santo, Disponível em: <http://www.ebah.com.br/ag0405-secagem-de-graos-pdf-pdf-a2065.html>. Acessado em 3 de setembro de 2008.

SILVA, W. R. Seed performance after exposure to high temperatures. **Sci. Agric.** 55, (Número especial), 102-109, Piracicaba, SP, 1998.

SMITH, D., 1996. Characterization of Lactose by Helium Pycnometer. In Stephens, K. (ed.), **The Microreport: News and Ideas for Decision Makers**, 2nd Quarter, 7(2) Micro-meritics Instrument Corporation, USA.

SOUZA, A. M. F. I.; BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M. Análise da influência da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem de grãos. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP)**, v.2, Ouro Preto, MG, 454-465, 1993.

SRZDENICKI, G. S.; JOENG, Y. H.; DRISCOLL, R. H. Studies on drying of Australian sweet cherries. **In the Proceedings of the 10th International Drying symposium (IDS'96)**, v. B, Kraków, Poland, 831-838, 1996.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles , applications and desing**, New York: Gordon and Breach Science Publishers, v. 3, 448p., 1986.

SUBRAMANAIN, S; VISWANATHAN, R. Thermal properties of minor millet grains and flours. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 3, p. 289-296. 2003

SUBRAMANAIN, S; VISWANATHAN, R. Bulk density and friction coefficients of selected minor millet grains and flours. **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 118–126, 2007.

TSAO, G. T. Thermal conductivity of Two – Phase materials. **Engineering Approaches**, v. 53, n. 5, p. 395 - 397.

USDA - Natural Resources Conservation Service, “*Setaria italica* (L.) P. Beauv. Foxtail bristlegress”, Disponível em: <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=SEIT>. (Acessado em 9 de novembro de 2009).

USDA, Natural resources Conservation Service, *Panicum miliaceum* L. - broomcorn millet. Disponível em: <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PAMI2> Acessado em 1 de outubro de 2008.

WOODSIDE, W. E; MESSMER, J. H. Thermal Conductivity of porous media. I Unconsolidated sands, **Journal of applied physics**, v. 32, n. 9, p. 1688-1698. 1961.

ZANCANELLA, E. F.; BONATTI, J. L.; MARTUCCÍ, L. M. V. **Novos cultivares de painço**. Disponível em: http://www.cati.sp.gov.br/Cati/_tecnologias/cereais/novos_cultiv.php Acesso em 1º de outubro de 2008.

ZEWDU, A. D; SOLOMON, W. K. Moisture-dependent physical properties of tef seed. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 1, p. 57-63, 2007.

ZOTIN, F. M. Z. **Efeito de parede em colunas de recheio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 85p. 1985.