



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
Programa de Pós-graduação em Engenharia

JANICE BOTELHO SOUZA HAMM

**ANÁLISE DA SECAGEM DE AZEVÉM (*Lolium multiflorum*) EM LEITO FIXO COM
ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

Bagé
2013

JANICE BOTELHO SOUZA HAMM

**ANÁLISE DA SECAGEM DE AZEVÉM (*Lolium multiflorum*) EM LEITO FIXO COM
ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida

Bagé
2013

JANICE BOTELHO SOUZA HAMM

**ANÁLISE DA SECAGEM DE AZEVÉM (*Lolium multiflorum*) EM LEITO FIXO COM
ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Dissertação defendida e aprovada em: 09 de maio de 2013.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador

Dr. João Carlos Pinto Oliveira
EMBRAPA – Pecuária Sul

Prof. Dr. Marcilio Machado Morais
Unipampa

Dedico esta dissertação ao meu amado marido Tauê Bozzetto Ebert Hamm e aos meus amados pais, Geni Botelho Souza e Sideni Medeiros Souza, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, guiando meus passos até o presente.

A meu marido amado Tauê Bozzetto Ebert Hamm pelo imenso amor, carinho, compreensão e incentivo nesta caminhada.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida pela confiança, atenção, carinho e estímulo dedicados a mim ao longo desses anos. O senhor é uma referência para mim em seus princípios de vida e atividades profissionais.

Aos meus pais Sideni Medeiros Souza e Geni Botelho Souza pela educação, ensinamento e amor dedicados todos estes anos, sem eles não chegaria neste momento.

A minha família Anderson Roger Botelho Souza, Clarice dos Santos Souza, Sidinéia Souza Ferreira, Leonardo Ferreira, Vitória dos Santos Souza, Iolanda Botelho Borba e Thais Borba Cunha pelo amor e palavras de incentivo durante esta etapa.

A todos os professores e técnicos do curso de Engenharia Química pelo apoio, convívio e dedicação ao plano de trabalho desenvolvido na conquista deste objetivo.

Aos prof(s). Dr(s). Marcilio Machado Moraes e Luciana Machado Rodrigues por terem acreditado, apoiado e incentivado meu ingresso na carreira acadêmica.

Ao pesquisador da EMBRAPA Dr. João Carlos Oliveira por possibilitar esta parceria institucional enriquecendo e auxiliando nas pesquisas deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Aline Arim, Vanessa Rosseto, Camila Flores e Akel Kanaam pelo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

Aos meus ilustres amigos Ana Paula Ferreira, Valeska Roque, Chaiane Caneda e Dison Franco pelo incentivo, convívio e amor.

Aos meus sogros Rosele e Afonso Hamm pelo apoio, incentivo e suporte em Bagé.

As minhas colegas de mestrado Camila Dariva e Marilice Bretanha, pela parceria tão harmônica nas idas e vindas de Alegrete.

As minhas colegas e amigas Lidiane Azambuja Lemos e Miriam Marquezan Lopes pelo apoio, companheirismo e receptibilidade.

A CAPES pelo apoio financeiro.

“Veja...
Não diga que a canção está perdida
Tenha fé em DEUS, tenha fé na vida
Tente outra vez...
Basta ser sincero e desejar profundo
Você será capaz de sacudir o mundo
Vai/ tente outra vez/ tente...
Não diga que a vitória esta perdida
Se é de batalhas que se vive a vida
Tente outra vez...”

Raul Seixas.

RESUMO

No Rio Grande de Sul a pecuária é uma das principais e tradicionais atividades econômicas com a produção alicerçada no campo nativo. Porém, nas estações frias ocorre a necessidade da implementação de pastagens para suprir o vazio forrageiro, pois o campo nativo é composto predominantemente de gramíneas de verão. O azevém (*Lolium multiflorum*) é a gramínea mais utilizada no sul do Brasil, devido à facilidade e ao baixo custo de implementação. Entretanto, esta forrageira possui problemas quanto à qualidade das sementes no que se refere à baixa taxa de germinação e ao vigor. Isso ocorre em função de apresentar um processo natural de debulha, resultando em uma colheita de sementes com alto grau de umidade. Uma forma de minimizar os problemas encontrados na qualidade destas sementes é a aplicação de tecnologias adequadas no seu beneficiamento. Dentre as etapas envolvidas no beneficiamento das sementes a secagem é tida como processo fundamental. A secagem é caracterizada pela transferência de calor e de massa, permitindo a redução do teor de água em níveis adequados, possibilitando assim, a preservação da qualidade fisiológica do produto. Neste contexto, foram estudadas as condições de secagem do azevém em secador de leito fixo com escoamento de ar paralelo visando obter melhor qualidade nas sementes. O estudo foi dividido em quatro etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização física e fisiológica das sementes, onde foram obtidos os valores de densidade real, densidade *bulk*, diâmetro médio das partículas, esfericidade, porosidade do leito estático e índices de germinação. Na segunda etapa foi o estudo da reumidificação das sementes visando colocar sementes adquiridas no mercado local em condições de umidade semelhantes as encontradas em sementes recém colhidas e limpas. A terceira etapa baseou-se no estudo das isotermas de dessorção das sementes reumidificadas para a determinação da umidade de equilíbrio. Este estudo foi feito para a temperatura de 40 °C utilizando-se o método estático para o qual foram utilizadas soluções ácidas em diversas concentrações. Por fim, na quarta e última etapa, foi desenvolvido o estudo da secagem das sementes reumidificadas em um secador de leito fixo com escoamento de ar paralelo operando na temperatura de 40 °C e sob condições de altura da bandeja de 0,50, 0,75 e 1,0 cm, de velocidade do ar de 1,0, 1,5 e 2,0 m/s e de tempo de secagem de 2,0, 2,5 e 3 h. Os dados obtidos nas secagens foram analisados através de um planejamento experimental fatorial completo 2³ com duplicata no ponto central, tendo como respostas o índice de umidade final e o índice de germinação. Também determinaram-se os

valores da difusividade efetiva de cada ensaio de secagem. Os resultados obtidos mostraram que as condições de secagem aplicadas nas sementes podem influenciar significativamente sua umidade final, sua qualidade fisiológica e os valores da difusividade efetiva do processo.

Palavras-chave: Secagem. Azevém. Leito fixo.

ABSTRACT

The livestock is one of the major and traditional economic activities with production rooted in native pasture in Rio Grande do Sul. But in the cold seasons is the need to implement the empty pastures to supply fodder, because the field is composed predominantly of native summer grasses. Ryegrass (*Lolium multiflorum*) is the most widely used grass in the southern of Brazil, due to the ease and low cost of implementation. However it has problems as forage seed quality regarding low rate of germination and vigor. This is due to present a natural process of threshing, resulting in a harvest of seeds with high moisture content. One way to minimize the problems encountered in the quality of these seeds is the application of appropriate technologies in processing. Among the steps involved in the processing of seed drying process is considered fundamental. It is characterized by heat transfer and mass, allowing the reduction of the water content at appropriate levels, thus enabling the preservation of physiological quality of the product. In this context the work studied the drying conditions of ryegrass in fixed bed dryer with air flowing parallel to obtain better quality seeds. The study was divided in to four stages. The first step was to determine the physical and physiological characteristics of the seed which were obtained the values of true density real and *bulk* density, average, particle, diameter, sphericity, porosity of the static bed and germination rates. In the second phase of the study aimed at putting rewetting seeds seeds purchased at local markets in damp conditions similar to those found in fresh seeds and clean. The third stage was based on the study of sorption isotherms of seeds reumidificadas for the determination of moisture content. This study was done to a temperature of 40 ° C, using the static method with solutions at various concentrations. Finally, the fourth and final step of the study was conducted reumidificadas seed drying in a fixed bed dryer with air flowing parallel operating at a temperature of 40 ° C and under conditions tray height 0.5, 0.75 and 1.0 cm air speed of 1.0, 1.5 and 2.0 m / s and drying time of 2.0, 2.5 and 3.0 hours. The data obtained were analyzed by drying in an experimental design with 2³ duplicate at the midpoint having answers as the final moisture content and germination. We also determined the effective diffusivity values for each studied drying process. The results showed that the drying conditions applied in the seed can significantly influence their final moisture, physiological quality and effective diffusivity values of the process.

Keywords: Drying. Ryegrass. Fixed bed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Produção mensal de matéria seca por hectare em campo natural no Rio Grande do Sul	4
Figura 2.2 – Touceira de azevém.....	6
Figura 2.3 – Semente de azevém	6
Figura 2.4 – Esquema do processo de secagem de material sólido.....	12
Figura 2.5 – Curvas de secagem: (a) umidade em função do tempo, (b) taxa de secagem em função da umidade.....	13
Figura 2.6 – Histerese das isotermas de sorção	22
Figura 2.7 – Classificação das isotermas por Brunauer	25
Figura 3.1 – Sementes de azevém (<i>Lolium multiflorum</i>) compradas no mercado local.....	26
Figura 3.2 – Fluxograma organizacional das etapas de preparo das sementes compradas no mercado local.....	27
Figura 3.3 – Soprador do tipo South Dakota	27
Figura 3.4 – Amostras de sementes no interior do banho termostatzado.....	28
Figura 3.5 – Fotografia do aparato para realização da densidade real	29
Figura 3.6 – Teste de germinação.....	31
Figura 3.7 – Esquema do recipiente empregado para a realização das isotermas	32
Figura 3.8 – Secador de bandeja com escoamento paralelo de ar. (1) Soprador centrífugo (2) Resistências elétricas (3) Painel de controle (4) Balança (5) Anemômetro.	33
Figura 3.9 – Fotografia do interior do túnel de secagem.....	34
Figura 3.10 – Fluxograma organizacional dos experimentos.....	35
Figura 3.11 – Fotografia da lavoura de azevém	37
Figura 3.12 – Fotografia de escarificador de sementes elétrico	37
Figura 4.1 – Estudo do processo de reumidificação.....	39
Figura 4.2 – Isoterma do azevém para temperatura de 40 °C ajustada para modelo de Oswin	42
Figura 4.3 – Diagrama de Pareto para a resposta U_{PS}	43
Figura 4.4 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 9 e 10.....	44
Figura 4.5 – Taxa de secagem em função da umidade média para os ensaios 9 e 10.....	45
Figura 4.6 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 7 e 8 - $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v= 2,0\text{ m/s}$, $t= 3\text{ h}$	46

Figura 4.7 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 6 e 8 – $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A= 1\text{ cm}$, $t= 3\text{ h}$	47
Figura 4.8 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 4 e 8 – $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A= 1\text{ cm}$, $v= 2\text{ m/s}$	48
Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para a resposta índice total de germinação.....	50
Figura 4.10 (a), (b) – Ajuste para os ensaios 6 e 8 nos modelos (a) Page e (b) Fick	51
Figura A1 – Resultados encontrados para ρ_{real} através da picnometria gasosa.....	68
Figura B1 – Ajuste para os ensaios 4 e 8 no modelo Fick	69
Figura B2 – Ajuste para os ensaios 7 e 8 no modelo Fick	69
Figura B3 – Ajuste para os ensaios 4 e 8 no modelo Page.....	70
Figura B4 – Ajuste para os ensaios 7 e 8 no modelo Page.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de atividade de água para as concentrações de H ₂ SO ₄ na temperatura de 40 °C	32
Tabela 3.2 – Condições experimentais de secagem	36
Tabela 4.1 – Resultados obtidos na caracterização física das sementes comerciais adquiridas no mercado local.....	38
Tabela 4.2 – Atividade de água e umidade de equilíbrio para a temperatura de 40 °C.....	40
Tabela 4.3 – Parâmetros de ajustes e do coeficiente de determinação da isoterma do azevém para os diferentes modelos	40
Tabela 4.4 – Umidade pós-reumidificação e depois da secagem.....	43
Tabela 4.5 – Resultados do teste de germinação	49
Tabela 4.6 – Parâmetros de ajuste e difusividade efetiva para cada condição de secagem analisada pelos modelos da Lei de Fick e de Page.....	52
Tabela 4.7 – Resultados do teste de germinação para sementes <i>in natura</i>	53

LISTA DE SIGLAS

AOAC - Association of Oficial Analytical Chemists

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

RS – Rio Grande do Sul.

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

GAB – Guggenheim-Anderson-de Boer

BET – Brunauer, Emmett e Teller

b.u – base úmida

LISTA DE SÍMBOLOS

$a, b, c, n, k_2,$ k_3, n_1, n_2, C_{BET}	Constantes	[-]
C, B	parâmetros de funções da temperatura do ar	[θ]
a_w	atividade da água	[-]
p, r, f	metade do valor do diâmetro do elipsóide	[L]
A	altura da bandeja	[L]
H	área superficial exposta ao secador	[L ²]
D_{ef}	difusividade efetiva	[L ² T ⁻¹]
D_L	coeficiente de difusão no líquido	[L ² T ⁻¹]
D_{cir}	diâmetro da circunferência	[L]
d_m	diâmetro médio	[L]
d	diâmetro equivalente	[L]
e_o	espessura de sólidos na bandeja	[L]
k	constante de secagem	[T ⁻¹]
k_1, k_0	coeficientes de secagem	[T ⁻¹]
L_o	comprimento inicial	[L]
L_s	massa de sólido seco	[M]
m	massa total de sólido úmido	[M]
m_{eq}	massa da amostra no equilíbrio	[M]
m_{as}	massa da amostra seca	[M]
m_{au}	massa da amostra úmida	[M]
$m_{água}$	massa de água	[M]
P_w	pressão parcial	[ML ⁻¹ T ⁻²]
P_v	pressão de vapor da água pura	[ML ⁻¹ T ⁻²]
P	constante de valor 1,6075	[-]
N	taxa de secagem	[MT ⁻¹ L ²]
N_c	taxa de secagem constante	[MT ⁻¹ L ²]
t	Tempo	[T]
t_1	tempo inicial	[T]
t_2	tempo final	[T]
SS	sólido seco	[M]
T	temperatura do ar	[θ]
ton	Tonelada	[M]
U	umidade base úmida	[MM ⁻¹]
UR	umidade relativa	[-]
U_i	umidade inicial	[MM ⁻¹]
U_{PR}	umidade pós reumidificação	[-]
U_{PS}	umidade pós secagem	[-]
UA	umidade absoluta	[MM ⁻¹]
U_{semas}	umidade das sementes comerciais	[MM ⁻¹]
v	velocidade do ar	[MT ⁻¹]

$V_{\text{elipsoide}}$	volume do elipsoide	$[L^{-3}]$
X	Umidade	$[MM^{-1}]$
x_1	Espessura	$[L]$
X_0	umidade inicial no tempo zero	$[MM^{-1}]$
X_1	umidade no tempo t_1	$[MM^{-1}]$
X_c	umidade crítica	$[MM^{-1}]$
X_2	umidade final no t_2	$[MM^{-1}]$
X_{t_0}	umidade no tempo inicial	$[MM^{-1}]$
X_e	umidade de equilíbrio	$[MM^{-1}]$
X_t	umidade média no tempo t	$[MM^{-1}]$
X_m	umidade da monocamada do material	$[MM^{-1}]$
π	constante = 3,1416	$[-]$
ρ_s	densidade do sólido	$[ML^{-3}]$
ρ_b	densidade <i>bulk</i>	$[ML^{-3}]$
ρ_{real}	densidade real	$[ML^{-3}]$
ε	Porosidade	$[-]$
\emptyset	Esfericidade	$[-]$
K, Ct	constante associada à entalpia	$[-]$
H	Horas	$[\theta]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Breve Panorama do Azevém no Rio Grande do Sul	3
2.2 Características do Azevém.....	5
2.3 Análise da Qualidade da Semente.....	7
2.4 Importância da Secagem de Sementes.....	9
2.5 Fundamentos da Secagem.....	11
2.6 Métodos de Secagem de Sementes.....	17
2.7 Modelos de Secagem em Camada Delgada	19
2.8 Isotermas de Adsorção e Dessorção	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Sementes	26
3.1.1 Preparo das Sementes Compradas no Mercado Local	26
3.1.2 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes	28
3.1.3 Isotermas de Dessorção	31
3.2 Equipamentos e Periféricos	33
3.3 Método Experimental de Secagem.....	35
3.3.1 Procedimento Experimental de Secagem	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes Adquiridas no Mercado Local.....	38
4.2 Estudo do Processo de Reumidificação	38
4.3 Isotermas de Dessorção das Sementes Reumidificadas.....	39
4.4 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Azevém Reumidificadas.....	42
4.5 Análises dos Modelos de Secagem.....	50
4.6 Testes de Secagem de Sementes de Azévem <i>in natura</i>.....	53
5 CONCLUSÕES	55
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE A	71
APÊNDICE B.....	72

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Roso; Restle (2000) a principal fonte de forragem para a pecuária de corte no Sul do Brasil é o campo nativo. No outono-inverno ocorre a paralisação do crescimento e queda na qualidade da pastagem nativa. Isto provoca *déficit* alimentar para o rebanho bovino, constituindo uma das principais causas dos baixos índices produtivos da bovinocultura de corte. Uma das alternativas que se tem para amenizar o vazio forrageiro é a utilização de pastagens cultivadas de estação fria, na qual a espécie mais utilizada para pastejo é o azevém por ser de baixo custo e fácil implementação.

Para Lucca Filho; Porto; Maia (1999) o azevém é uma gramínea forrageira de clima temperado, cespitosa, amplamente utilizada, a nível mundial, na formação de pastagens anuais ou como componente de pastagens perenes. Esta espécie produz grande quantidade de forragem, de boa qualidade devido a seu bom rebrote e resistência ao pastejo. De acordo com Moraes (1995), a grande utilização do azevém na alimentação animal se deve a sua palatabilidade e seu alto valor nutritivo da pastagem, fornecendo 18 % de proteína bruta.

O rendimento médio obtido na produção de sementes de azevém, no Rio Grande do Sul (RS), está abaixo do rendimento potencial da cultura e do obtido em outros países. Trabalhos realizados por Roy; Rolston; Rowarth (1994) indicaram a viabilidade de rendimento produção de grãos de até 2.200 kg/ha. No Brasil, o rendimento da produção de azevém pode alcançar de 1.000 a 1.200 kg de sementes puras/há, segundo Maia (1992). No entanto, os dados estatísticos desta espécie, no RS, indicam rendimento médio de 300 a 400 kg/ha.

Na produção de sementes, além do rendimento, deve ser dada ênfase à sua qualidade, pois este fator tem fundamental significado tanto na exploração econômica da pastagem como também no campo de produção de sementes. Os maiores índices de colheita estão associados ao elevado conteúdo de umidade das sementes, as quais devem ser colhidas com 35,0 % de umidade. O desconhecimento dessa informação faz com que se atrase a colheita, objetivando-se a obtenção de material mais seco. Pelo fato do azevém anual ser uma espécie de acentuada abscisão, essa prática promove uma redução no rendimento, pela debulha, e uma redução na qualidade, por permanecer mais tempo sujeito às condições adversas do ambiente (BOUNOUS, 1986 apud LUCCA FILHO; PORTO; MAIA, 1999, p. 142-147).

Dessa forma, a secagem torna-se um processo fundamental para que se obtenha um percentual maior de sementes de melhor qualidade. Para Foust et al., (2008) o processo de

secagem visa a retirada parcial de água das sementes através da transferência simultânea de calor do ar para as sementes e de massa por meio do fluxo de vapor de água da semente para o ar. A escolha de secadores simples adequados ao material e de fácil controle é uma opção para minimizar custos de produção. Não existe um único equipamento que possa ser recomendado para a secagem de materiais orgânicos. No entanto, os secadores mais indicados para a secagem de sementes são aqueles que reduzem os impactos mecânicos e térmicos que afetam a qualidade fisiológica. Kreyger (1973) cita sementes de gramíneas como sendo de secagem rápida, recomendando secadores contínuos com uma fina camada de material.

As isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água ou a umidade relativa do meio e a umidade do produto em equilíbrio com o meio a certa temperatura. As isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade do material em função da umidade relativa do meio em que este se encontra (PEZZUTI; CRAPISTE, 1996, p. 113-123 apud OLIVEIRA, 2009, p. 194-205).

Em vista disso e visando contribuir para melhores condições de manutenção das propriedades fisiológicas das sementes, esta dissertação teve como objetivo principal analisar a secagem de sementes de azevém (*Lolium multiflorum*) em leito fixo com escoamento de ar paralelo. Para alcançar este objetivo, foram realizadas as seguintes etapas:

1. caracterização física e fisiológica das sementes;
2. estudo de um processo de reumidificação para as sementes;
3. estudo das isotermas de dessorção para a temperatura utilizada nos ensaios de secagem, e
4. estudo da secagem das sementes reumidificadas e de sementes *in natura* colhidas diretamente do campo em condições pré estabelecidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve Panorama do Azevém no Rio Grande do Sul

Segundo Roso; Restle (2000) a principal fonte de alimentação para a pecuária de corte no Sul do Brasil é o campo nativo, que é composto basicamente por espécies de elevado crescimento estival. Nas estações frias ocorre a paralisação do crescimento e queda na qualidade da forragem da pastagem nativa. Isto provoca defasagem alimentar para o rebanho bovino, constituindo uma das principais causas dos baixos índices produtivos da bovinocultura de corte.

Ainda de acordo com Roso; Restle (2000), o uso de pastagens cultivadas de inverno é uma alternativa para rotação com as culturas de verão, pois o Estado do Rio Grande do Sul apresenta uma área de aproximadamente 5 milhões de hectares cultivados com soja e milho. De acordo com o IBGE (1996), dentre esta área, apenas 12% são cultivados com o trigo no inverno, e o restante é pouco aproveitado.

Conforme Mota; Berny; Mota (1981), no Rio Grande do Sul, aproximadamente 61 % da cobertura vegetal é composta por pastagens nativas, que apresentam crescimento vegetativo nas estações quentes. Porém, nas estações frias há redução na produção, tornando-se necessário a implementação de forrageiras. Uma alternativa para suprir esta demanda é o azevém (*Lolium multiflorum*), uma forrageira de clima temperado com boa adaptabilidade às condições climáticas do estado.

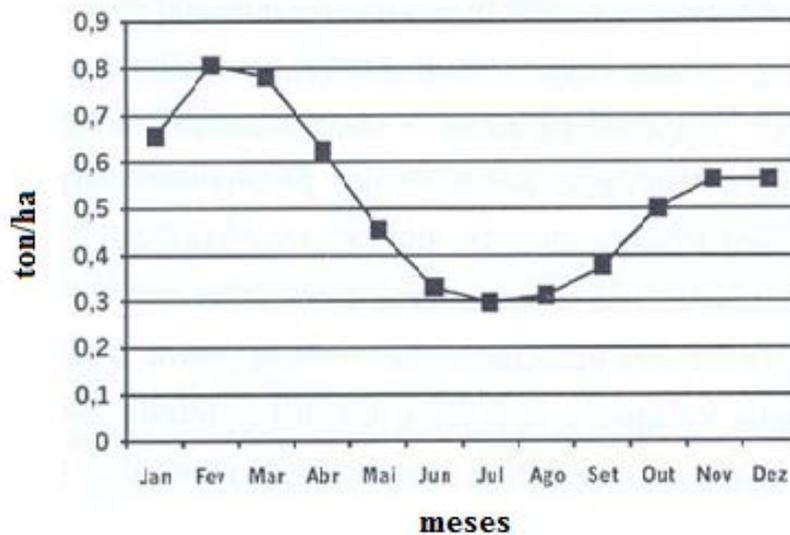
Para Picoli (2005) o azevém anual (*Lolium multiflorum Lam.*) é uma gramínea de clima temperado muito utilizado como fonte de alimento para bovinocultura, principalmente para o gado leiteiro. Esta gramínea possui excelente qualidade nutricional e elevada aceitabilidade. Ela é indicada para consórcio com outras espécies, sendo elas, leguminosas ou até mesmo outras gramíneas. Segundo Derpsch; Calegari (1985), por ser uma planta com boa capacidade de perfilhamento, grande produção de biomassa verde e possuir um sistema radicular agressivo, é ainda utilizada como planta de cobertura do solo.

Para Gerdes (2003) o azevém apresenta como vantagens em relação às outras forrageiras de inverno a sua boa produção de sementes, capacidade de ressemeadura natural, resistência às doenças e versatilidade de associações com outras gramíneas e leguminosas.

Segundo Fonseca; Maia; Lucca Filho (1999), o azevém é uma gramínea que resiste bem a baixa temperatura. Constitui-se um dos principais bancos de proteína para o gado no período de entressafra. As áreas destinadas à produção de sementes de azevém normalmente são de pastagens utilizadas até determinada época, sendo posteriormente diferidas e adubadas para colheita de sementes.

Na Figura 2.1 mostra-se a produção mensal de matéria seca por hectare em campo natural no Rio Grande do Sul.

Figura 2.1 – Produção mensal de matéria seca por hectare em campo natural no Rio Grande do Sul.



Fonte: Salomoni et al., 1994 apud Polí, 2008.

Conforme a Figura 2.1, é possível observar que ocorre a carência de oferta forrageira do campo nativo nos meses de maio a setembro. O azevém é uma alternativa para este período crítico, pois se desenvolve e oferece pastejo nesses meses.

Para Aguinaga (2009), na região da Campanha, parte das terras produtivas são arrendadas para a produção de grãos no verão. Em troca, os arrendatários implementam pastagens, como aveia e azevém, para a utilização no período frio do ano. O azevém é a forrageira mais utilizada na região da Campanha por ser uma espécie bem adaptada e de baixo custo de implantação.

Além de melhorar os índices na pecuária, o azevém tem efeitos positivos indiretos nas culturas de sequeiro como soja e milho, pois a sua palhada é utilizada no manejo do plantio direto, prática de conservação do solo que potencializa os resultados. Essa palhada, além de

melhorar a matéria orgânica do solo, ajuda a manter a umidade, o que favorece o crescimento das lavouras de verão em situações de estiagens, que são muito presentes na região da campanha no estado do Rio Grande do Sul.

Para exemplificar a facilidade da implantação do azevém em rotação de culturas, pode-se utilizar como exemplo a semeadura do azevém de avião no período em que a soja está com suas folhas em senescência para colheita posterior. Após a colheita da soja, o azevém já está estabelecido sem nenhum revolvimento do solo ocasionando uma redução de custo para implantação.

2.2 Características do Azevém

De acordo com Flores (2006), o azevém anual (*Lolium multiflorum Lam.*) é uma espécie pertencente à família Poaceae, originária da bacia do mediterrâneo (sul da Europa, norte da África e Ásia Menor), de onde se espalhou pela Europa e daí pela América do Norte. Foi cultivado pela primeira vez na região da Lombardia, na Itália, por isso também é conhecido por azevém italiano (*Lolium italicum*). É largamente cultivado em diversos países do mundo, onde as condições climáticas são favoráveis.

Segundo Fontaneli (1984) apud Flores (2006), trata-se de forrageira pertencente à rota metabólica C₃, que apresenta boa produção de forragem e capacidade de rebrote, adaptando-se muito bem ao pastoreio e a locais com excesso de umidade. É uma planta cespitosa que pode crescer até 1,20 m e alcançar em média 0,75 m de estatura. Formam touceiras de 0,40 m até 1,00 m, possuindo colmos eretos, compridos e ligeiramente sulcados na fase produtiva, são cilíndricos e sem pêlos. A bainha é estriada e fechada e os limbos jovens são enrolados em seu interior. A lígula é curta e esbranquiçada e as aurículas são completamente abraçantes. A lâmina foliar é estreita, glabra, de ápice agudo e de cor verde brilhante muito flexível, medindo de 5 a 30 cm de comprimento e de 3 a 11 cm de largura. A Figura 2.2 mostra uma fotografia ilustrativa de uma touceira de azevém.

Figura 2.2 – Touceira de azevém.



Fonte: Agrolink (2010).

As sementes de azevém são compactas e de tamanho médio para uma gramínea forrageira, sendo que 1.000 grãos pesam de 2,0 a 2,5 gramas nas variedades diplóides, e 3,0 a 4,5 gramas nas tetraplóides. As estruturas de revestimento (lema e pálea) são aderidas à cariopse, facilitando a embebição (FONTANELI, 1984, p. 139-150 apud FLORES, 2006, p.13-18). Na Figura 2.3 é apresentada uma fotografia de sementes de azevém.

Figura 2.3 – Semente de azevém.



Fonte: Agrolink (2010).

De acordo com Bewley; Black (1994) apud Eichelberger et al., (2012), em sementes de gramíneas, como o azevém anual, destaca-se na sua composição química o amido e os açúcares que favorecem o carbono para o suprimento energético e a formação de novos

compostos para a manutenção das sementes durante o armazenamento e o desenvolvimento da plântula durante a germinação.

Segundo Oliveira; Moraes (1995) o ciclo do azevém quando oriundo de ressemeadura natural vai de março a dezembro, quando floresce e morre. A temperatura ótima para o máximo crescimento está entre 18 a 20° C. O crescimento é paralisado com temperaturas baixas e, por isso, apresenta um pequeno desenvolvimento no inverno e mesmo mantendo as folhas verdes é sensível a geadas fortes.

Maia (1995) sugere que a colheita do azevém anual deve ser feita próximo da maturação fisiológica, e, portanto, com alto teor de umidade. Para Ellis; Simon, Covell, 1987, p. 1033-1043 apud Eichelberger et al., 2012, p. 693-701, o elevado teor de umidade e a elevada temperatura favorecem a atividade respiratória das sementes, bem como a multiplicação dos microorganismos.

Um dos fatores limitantes da implantação de pastagens de azevém é o problema da germinação das sementes, a qual está na faixa de 60 a 70%, o que induz a problemas na germinação e utilização rápida da pastagem. Isto ocorre por causa da má qualidade das sementes, fato que está vinculado ao processo de beneficiamento, onde se tem como etapa limitante a secagem.

Segundo Ohlson; Souza; Panobianco (2008), as sementes de azevém devem apresentar um padrão mínimo de 70 % de germinação, conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Porém, testes realizados em amostras das safras de 2006 mostraram que 64 % apresentaram índice de germinação menor que o padrão mínimo para a comercialização.

2.3 Análise da Qualidade da Semente

Conforme Souza (1980) o emprego de sementes de alta qualidade é um fator fundamental e de grande valia no estabelecimento dos cultivos, possibilitando elevadas produções. Um dos problemas que envolvem a formação de pastagens no Brasil é a variação apresentada na qualidade das sementes de espécies forrageiras existentes no comércio. A carência de demanda por sementes de alta qualidade, a inexistência de sementes padrões e a pouca tecnologia para a produção, resultaram em um comércio caracterizado por sementes de baixa pureza física e varietal, baixa viabilidade e alta contaminação por sementes de plantas

invasoras. Assim, as decisões quanto à distribuição e à implantação de lavoura são dificultadas, pois há um aumento nos riscos e custos de produção.

Segundo Marcos Filho; Cícero; Silva, 1987, p. 230 apud Peres, 2010, p. 16, para se obter altos rendimentos em cultivos, o uso de sementes de alta qualidade é indispensável. Esta reflete um conjunto de características que determinam a capacidade de apresentar desempenho adequado quando expostas a diferentes condições ambientais, sendo que o desempenho pós-semeadura pode refletir sobre a produção final, principalmente quando houver redução na porcentagem de emergência.

De acordo com Borba; Andrade (1993), a qualidade de um lote de sementes é determinada pelo somatório das características genéticas, físicas, fisiológicas e sanitárias. A qualidade genética do lote está diretamente relacionada com a pureza varietal, que pode afetar a produtividade da lavoura. Os aspectos físicos estão relacionados aos danos mecânicos e fissuras no tegumento. Para Felipe (1999) as propriedades fisiológicas definem a capacidade das sementes de desempenhar funções vitais, caracterizadas pela sua germinação, vigor e longevidade. Por fim, as características sanitárias estão relacionadas com a infecção das sementes por microrganismos patogênicos afetando a germinação e vigor.

O nível da qualidade fisiológica da semente é avaliado através de dois parâmetros fundamentais, a viabilidade e o vigor. A viabilidade é medida, principalmente, pelo teste de germinação e procura determinar a máxima germinação da semente em condições extremamente favoráveis. O vigor detecta atributos mais sutis da qualidade fisiológica, como o potencial de armazenamento e de produzir plântulas normais em condições adversas, não revelados pelo teste de germinação.

Segundo Marcos Filho; Toledo, 1977, p. 224-1977 apud Fumagalli, 2005, p. 21, o comércio internacional baseia-se em normas e regras para regulamentação do comércio interno. Então, para padronização de sementes em relação a sua qualidade, são recomendados alguns testes, sendo os principais o teste padrão de germinação e de vigor. O teste de germinação é o mais conhecido para determinar a qualidade de sementes. Nele, é avaliada a capacidade que uma semente tem de germinar em condições de luminosidade, temperatura e umidade ideais. O teste de vigor é um teste de germinação com metodologia modificada, sendo aplicado algum tipo de “estresse” semelhante ao que possa limitar a emergência e fixação da plântula no campo.

Conforme Brasil (1992) para a realização do teste de germinação, oito sub-amostras de 50 sementes puras por amostra devem ser semeadas sobre quatro folhas de papel filtro em caixas plásticas, e colocadas para germinar a 20-30 °C. As contagens devem ser realizadas aos cinco e quatorze dias após a semeadura, realizando-se a contagem das plântulas normais, segundo os critérios estabelecidos nas Regras para Análise de Sementes.

Segundo Lucca Filho; Porto; Maia (1999), o grau de umidade das sementes de azevém de aproximadamente 35 % na colheita pode promover uma redução no rendimento, pela debulha, e uma redução na qualidade, por permanecer mais tempo sujeito às condições adversas de ambiente. Isto é, a alta umidade facilita a proliferação de fungos, diminuindo assim, o índice de germinação e vigor.

Para Martinelli (1985), sob elevado grau de umidade, as sementes mantêm alta taxa de respiração que, em conjunto com a ação de microorganismos, provoca elevação da temperatura. Inicialmente é prejudicado o vigor, diminuindo a capacidade de armazenamento e, posteriormente, a germinação, até a completa deterioração. A velocidade de deterioração será maior quanto mais alto for o grau de umidade das sementes. Quanto menor o tempo entre a colheita e o processo de secagem menor o risco de deterioração das sementes.

Conforme Eichelberger et al., (2003), a secagem de sementes de azevém anual pode ser retardada por até 12 horas e mesmo assim as sementes conservam a germinação de 70 % durante armazenamento de no máximo oito meses. Já em períodos de armazenamento mais longos, o vigor é reduzido nas sementes cuja secagem foi retardada por mais de seis horas.

De acordo com Eichelberger et al., (2000), a pré-limpeza das sementes retira as impurezas úmidas e auxilia no controle da temperatura da massa das sementes. Adicionalmente, a operação reduz a umidade das sementes. Porém o processo de secagem das sementes é de fundamental importância para se garantir a qualidade.

2.4 Importância da Secagem de Sementes

Segundo Ferrari Filho (2011), as principais vantagens da secagem são a possibilidade de antecipação da colheita, reduzindo as perdas no campo ocasionadas por condições climáticas indesejáveis e/ou pelo ataque de roedores, insetos, pássaros e microorganismos. A colheita antecipada também possibilita aos produtores obterem preços pelos produtos quando a comercialização ocorrer em épocas de entressafra. Permite também a formação de estoques

reguladores de mercado e a oferta de produtos de alta qualidade, no caso de grãos pelas características organolépticas e nutricionais e, no caso das sementes, pela alta porcentagem de germinação e vigor.

Para Afonso Júnior; Corrêa (1999), a produção de grãos ou sementes com elevada qualidade requer que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microorganismos. Desta forma e devido ao teor de umidade elevado por ocasião da colheita, a secagem constitui uma das operações de primordial importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal.

De acordo com Roberts (1981), o crescimento no setor de comercialização de sementes vem exigindo o desenvolvimento de novas técnicas agrônomicas e de engenharia voltadas tanto à produção de sementes, quanto aos processos de beneficiamento. Embora todas as operações de beneficiamento sejam importantes na definição da qualidade das sementes, existem aquelas que são limitantes, como é o caso do processo de secagem para redução do grau de umidade das sementes e de todo material que forma a massa colhida.

Segundo Brooker; Bakker-Arkema; Hall (1992), a secagem pode ser considerada como uma das operações unitárias mais importantes e utilizadas numa ampla variedade de aplicações industriais, tais como indústrias alimentícia, química, metalúrgica, farmacêutica, entre outras. Particularmente, a sequência de processamento de grãos é constituída por colheita, secagem, armazenamento, manipulação e transporte, sendo que a secagem é tida como uma etapa crítica. É de consenso geral para os autores Eichelberger et al., (2003), Carambula (1984) que uma secagem imprópria é a maior causa de deterioração de grão nessa série de etapas.

Conforme Baudet; Villela; Cavariani (1999), a secagem é um processo fundamental da tecnologia para a produção de sementes de alta qualidade. Permite a redução do teor de água em níveis adequados para o armazenamento, preserva as sementes de alterações físicas e químicas, induzidas pelo excesso de umidade, e torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento, possibilitando colheitas próximas da maturação fisiológica.

De acordo com Park; Yado; Brod (2001), as vantagens de se utilizar o processo de secagem são várias, dentre as quais tem-se a facilidade na conservação do produto, estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo, proteção contra degradação enzimática e oxidativa, redução do seu peso, economia de

energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano.

Para Macedo; Marques Neto; Batista (1987) é vastamente reconhecido que o teor de umidade exerce influência direta sobre a qualidade das sementes, pois sementes com altos teores de umidade deterioram-se facilmente impossibilitando o seu armazenamento. A produção de sementes de alta qualidade possui elevados custos, não só pela elevada mão de obra no período de colheita como também pela secagem, visto que as sementes são colhidas com teores de umidade de 40 a 60 % e devem ser armazenadas com teores de 10 a 15 % de maneira a prevenir a deterioração pós-maturação fisiológica para não comprometer sua qualidade.

De acordo com Popinigis, 1985 apud Almeida, 2010, p. 7, a velocidade de deterioração das sementes pode ser controlada em função da longevidade, da qualidade inicial das sementes e das condições ambientais. A longevidade é uma característica genética inerente à espécie. A qualidade inicial é definida no plantio e nas condições de beneficiamento. Essa pode ser manipulada de maneira a manter a qualidade das sementes ao menos pelo período de armazenamento durante a entressafra. Contudo, isso apresenta dificuldades que vão desde a fase de produção no campo, que deveria fornecer uma boa matéria-prima, até o beneficiamento das sementes. Para se alcançar essa necessidade de desenvolvimento no setor é necessária que novas tecnologias na produção dessas sementes sejam estudadas e estejam acessíveis aos pequenos produtores, principais disseminadores regionais.

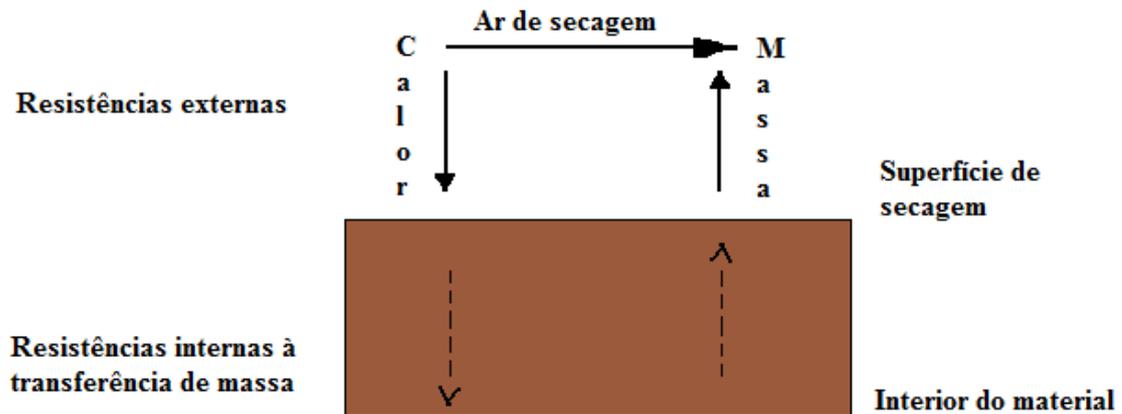
Segundo Eichelberger et al., (2001) as sementes de azevém anual, por terem período de colheita limitado, em virtude da debulha, se acumulam, provocando retardamento na secagem. Assim, há uma grande presença de umidade após a colheita da forrageira, podendo esta sofrer danos fisiológicos. Desta forma, o estudo da retirada de umidade da semente torna-se fundamental.

2.5 Fundamentos da Secagem

De acordo com McCormick (1983) apud Freire; Sartori (1992), a secagem é considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. Quando o

calor necessário para evaporar a água é fornecido ao material, ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, conforme ilustração da Figura 2.4.

Figura 2.4 – Esquema do processo de secagem de material sólido.



Fonte: TOBINAGA; PINTO, 1992.

Para Elias (2002), a secagem é um processo de transferência simultânea de calor e de massa, pois ao mesmo tempo em que o ar fornece calor ao sistema, ele absorve água do produto em forma de vapor. O gasto de energia térmica provocado pela evaporação da água é acompanhado por um resfriamento do ar, contudo, ele absorve em forma de vapor o que perdeu sob a forma de calor. As sementes, sendo higroscópicas, sofrem variações no seu teor de água de acordo com as condições do ambiente; portanto, quando entram em contato com o ar, realizam trocas até que suas pressões de vapor e temperatura tenham valores semelhantes aos do ar, atingindo níveis de equilíbrio energético, hídrico e térmico. Enquanto a pressão de vapor do ar for menor do que a das sementes haverá secagem, e enquanto a temperatura do ar for maior do que a das sementes, essas sofrerão aquecimento. O aquecimento do ar de secagem, com as finalidades de diminuir sua umidade relativa e aumentar sua entalpia, e conseqüentemente, sua capacidade evaporativa, deve ser controlado, dentro de certos limites, em virtude dos danos físico-químicos e biológicos que pode causar às sementes.

Segundo Strumillo; Kudra, 1986 apud Oliveira, 2006, p. 24, a secagem é definida, geralmente, como a remoção de líquido de um sólido por evaporação. Nos processos de secagem, o material úmido está em contato com o ar insaturado e se obtém como resultado a diminuição do conteúdo de umidade deste material e a umidificação do ar. Assim, dois

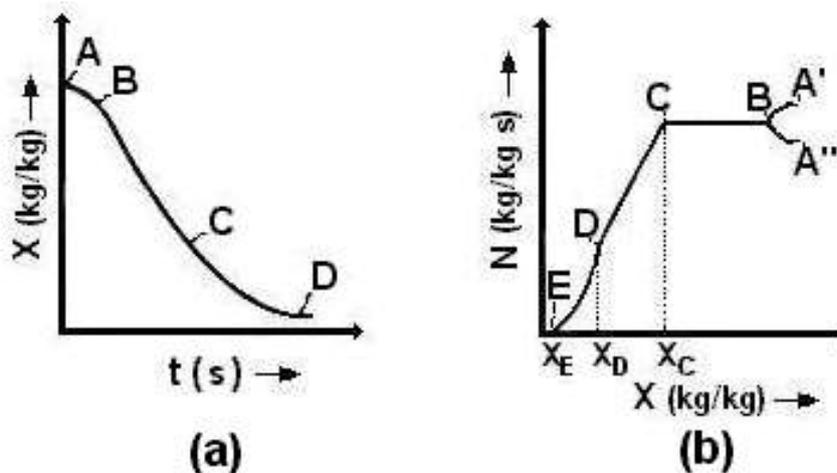
estágios definem o processo total de secagem, o aquecimento do material e a evaporação de umidade até alcançar a umidade de equilíbrio.

Conforme Fumagalli (2007), a umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura e pressão, são definidas como o teor de umidade deste, correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Termodinamicamente, o equilíbrio é alcançado quando a energia livre de troca para o material é zero. O teor de umidade é, portanto, dependente da temperatura e umidade relativa do ar.

Para Bruin; Luyben (1980) apud Freire e Sartori (1992) a migração de umidade através do sólido pode acontecer por meio de mecanismos de transporte de vapor de água e transporte de água líquida, tais como difusão líquida, difusão de vapor e escoamento de líquido e vapor. Para Martins (2002), a difusão líquida ocorre devido à existência do gradiente de concentração. A difusão de vapor ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor causado pelo gradiente de temperatura. Por fim, o escoamento líquido e vapor é devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade, e alta temperatura.

De acordo com McCormick (1983) apud Oliveira (2006), a secagem pode ser dividida em período de taxa constante e período de taxa decrescente, conforme a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Curvas de secagem: (a) umidade em função do tempo, (b) taxa de secagem em função da umidade.



Fonte: LYNDERSEN, 1983 apud MARTINS, 2002.

Segundo Biagi; Valentini; Queiroz (1992) apud Martins (1997), os segmentos A-B, A''-B e A'-B, apresentados na Figura 2.5, representam os períodos em que o material entra em regime operacional. O produto geralmente está mais frio ou mais quente que o ar. A pressão parcial de vapor de água na superfície de produto é baixa. Por consequência a transferência de massa e a velocidade de secagem também são baixas. Com a elevação ou diminuição da temperatura do produto e da pressão de vapor de água chega-se até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa.

No segmento B-C, a taxa de secagem é constante. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água dentro do produto é elevada. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água da superfície.

O ponto C, na Figura 2.5, é caracterizado pelo período em que a taxa constante chega ao fim, chamado de umidade crítica, X_c . Este assinala o ponto em que a migração interna de água para a superfície não supre mais a condição de equivalência com a taxa evaporativa (CHIRIFE, 1983, p.73-102 apud MARTINS, 2002, p.13-15).

Para Park; Yado; Brod (2001), o intervalo C-D, apresentado na Figura 2.5 a, e C-E da Figura 2.5 b, representam o período de taxa decrescente, A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. O fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado (ponto E da Figura 2.6 b). O período decrescente pode ser dividido em duas etapas, capilaridade e difusão, respectivamente.

Porter et al., (1986) apud Martins (2002) diz que a primeira etapa corresponde à zona de superfície de secagem não saturada. Ela é caracterizada pelo segmento C-D da Figura 2.5 b, no qual a superfície do material apresenta diversas áreas secas que se ampliam à medida que a secagem prossegue. A evaporação continua a se processar na superfície do sólido e a resistência à difusão interna do líquido é pequena comparada com a resistência para remover o vapor da superfície. A temperatura do sólido aumenta, pois este recebe a mesma quantidade de calor do ar de secagem e a evaporação de umidade em sua área superficial é cada vez

menor. O calor transferido ao sólido excede ao da vaporização da água e assim a temperatura do material aumenta.

Já a segunda etapa, de acordo com Tobinaga; Pinto (1992) apud Freire; Sartori (1992) corresponde ao movimento interno de umidade. O segmento D-E da Figura 2.5 b, representa o processo de secagem, no qual a resistência interna controla a migração de umidade. O mecanismo que influencia diretamente na retirada de água nesta fase é a difusão interna de água líquida. Os materiais orgânicos e fibrosos apresentam poros finíssimos em seu interior, os quais retêm grande parte de sua água como umidade ligada aos seus componentes estruturais, dispersando-a na forma de camadas concêntricas junto à estrutura molecular do material. A difusão líquida da umidade através do sólido é o mecanismo que governa esta etapa.

As etapas apresentadas na Figura 2.5 b, são calculadas através da análise da taxa de secagem N . Conforme Cavariani (1996), a taxa de secagem expressa o conteúdo de água retirado das sementes em função do tempo de secagem e está relacionada com a movimentação da água do interior para superfície do produto. Ela é representada pela Equação 2.1:

$$N = - \frac{L_S}{H} \frac{dX}{dt} \quad (2.1)$$

onde L_S é a massa total de sólido seco e H é a área superficial exposta ao secador.

A Equação 2.1, pode ser reordenada e integrada com respeito ao intervalo de tempo para secar desde X_0 a $t_1 = 0$ até X_2 a $t_2 = t$, conforme a Equação 2.2:

$$\int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{L_S}{H} \int_{X_2}^{X_0} \frac{dX}{N} \quad (2.2)$$

onde X_0 é a umidade inicial no tempo zero e X_2 é a umidade final.

Se a secagem está dentro do período de taxa constante, de maneira que tanto X_0 como X_2 são maiores que o conteúdo de umidade crítica X_c , então, $N = \text{constante} = N_c$. A integral da Equação 2.2, para o período de taxa constante é expressa na Equação 2.3.

$$t = \frac{L_S}{HN_c} (X_0 - X_2) \quad (2.3)$$

Para Foust et al., (2008), em um sólido relativamente homogêneo, como os sólidos orgânicos fibrosos, as substâncias gelatinosas e as tortas porosas, a umidade movimenta-se, provavelmente, para a superfície em virtude da difusão molecular. A velocidade do

movimento da umidade é então expressa pela Segunda Lei de Fick, representada pela Equação 2.4:

$$\frac{dX}{dt} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

onde D_L é o coeficiente de difusão do líquido aplicável ao movimento através do sólido.

De acordo com Crank (1975), a integração desta equação requer que as condições de contorno sejam conhecidas e que as características de D_L sejam especificadas. Nos casos mais simples, D_L pode ser considerado constante, e a secagem ocorre apenas numa face de uma placa, cujas faces laterais e a face do fundo estão isoladas. Com estas restrições, e admitindo que no estado inicial a umidade esteja uniformemente distribuída na placa, a solução obtida é dada pela Equação 2.5:

$$\frac{X_t - X_s}{X_{t_0} - X_s} = \frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_L \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2 t} + \frac{1}{9} e^{-9D_L \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2 t} + \frac{1}{25} e^{-25D_L \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2 t} + \dots \right] \quad (2.5)$$

onde x_1 é a metade da espessura da placa quando a secagem se verifica nas faces superior e inferior ou x_1 é a espessura total da placa quando a secagem se verifica somente na face superior.

Segundo Geankoplis (1998) para elevados tempos de secagem, o único termo da Equação 2.5 que tem importância é o primeiro, portanto, a expressão pode ser simplificada para a secagem pelos dois lados, conforme a Equação 2.6.

$$\frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_L \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2 t} \quad (2.6)$$

O tempo de secagem na difusão líquida é expresso através da equação 2.7.

$$t = \frac{4x_1^2}{\pi^2 D_L} \ln \frac{8X_0}{\pi^2 X} \quad (2.7)$$

De acordo com Chirife (1983) apud Martins (2002), a constante de secagem para períodos longos de secagem, considerando a difusividade efetiva de umidade e a espessura constante e secagem por dois lados, pode ser realizado através da Equação 2.8:

$$k = D_L \left(\frac{\pi}{x_1}\right)^2 \quad (2.8)$$

onde k é a constante de secagem e x_1 é a metade da espessura da bandeja.

Segundo Geankoplis (1998), a água pode ser transferida de regiões de concentrações elevadas a regiões de baixas concentrações, como resultado de uma ação capilar, em lugar da difusão, quando o tamanho dos poros dos materiais granulares são adequados para este. A

teoria da capilaridade supõe que um leito empacotado de partículas não porosas contém espaços vazios entre elas que se chamam poros. À medida que a água é evaporada, as forças capilares atuam devido à tensão interfacial entre a água e o sólido. Neste caso ocorre a atuação de uma força impulsora que move a água através dos poros até a superfície de secagem. O tempo para a secagem por fluxo capilar, considerando um período de taxa constante, é expresso através da Equação 2.9:

$$t = \frac{x_s \rho_s X_E}{N_c} \ln \frac{X_E}{X} \quad (2.9)$$

onde ρ_s é a densidade do sólido.

2.6 Métodos de Secagem de Sementes

Segundo Camacho et al., (2004), os métodos de secagem são classificados em natural ou artificial (vinculados ao uso de equipamentos) e em contínuo ou estacionário (dependendo do fornecimento de ar).

De acordo com Maia (1995), a secagem natural é baseada nas ações do vento e do sol para remoção de umidade das sementes. Tal processo é limitado pelo clima quando as condições de umidade relativa do ar e da temperatura não são adequadas ou quando se trata de maiores volumes de sementes. Apesar de apresentar baixo custo, é um método lento, e as sementes não devem ser expostas em camadas superiores a 4-6 cm, com revolvimento periódico.

Para Carvalho (1994) apud Camacho et al., (2004), suas maiores desvantagens estão no uso intensivo de mão de obra, uma vez que as operações geram baixo rendimento e o processo é totalmente dependente das condições climáticas disponíveis.

Conforme Peske (1991) apud Torres (2006) o método de secagem artificial se caracteriza pela possibilidade de modificação e controle das propriedades físicas, temperatura e fluxo do ar de secagem. Segundo Maia (1995) o princípio consiste em submeter as sementes úmidas à ação de uma corrente de ar que atravessa a massa, através de estruturas especiais que possibilitem a secagem de maiores volumes em um curto espaço de tempo e independente das condições climáticas.

Quanto ao fluxo de ar nas sementes no interior do equipamento de secagem, os métodos artificiais podem ser classificados em contínuo e estacionário.

De acordo com Torres (2006) a secagem com fluxo de ar contínuo consiste circular as sementes uma vez pela fonte de calor, de tal forma que ingressem úmidas no topo e sofram a ação do aquecimento. Elas fluem continuamente no corpo do secador por gravidade e saem secas na base do secador. Esse vem a ser local de resfriamento da massa de sementes. Como a passagem é feita de forma única, é necessário que se eleve a temperatura do ar de secagem e controle o fluxo das sementes dentro das câmaras de secagem.

Uma alternativa que vem sendo avaliada é a utilização de um método contínuo adaptado para a secagem de sementes. O mesmo consiste na utilização de secadores que apresentam no mínimo duas câmaras de secagem. Motta (1997), avaliando o método de secagem de arroz, indicou que as temperaturas do ar máximas de 60 e 50 °C, respectivamente, nas câmaras superior e inferior podem ser empregadas, obtendo-se lotes que apresentam elevada qualidade fisiológica.

Já a secagem estacionária, para Garcia et al., (2004) consiste em forçar o fluxo de ar através de uma camada de sementes, que permanece estática no interior do secador. Ela ocorre em camadas, em função da formação da frente de secagem, que corresponde as regiões de intercâmbio de água entre as sementes e o ar. Neste método de secagem, a pressão estática ou, a perda de pressão, refere-se a resistência imposta ao deslocamento do ar forçado ao atravessar a massa de sementes, como consequência de perdas de energia por fricção e turbulência. Neste método de secagem há quatro tipos básicos de secadores, sendo estes, fundo falso perfurado, com tubo central perfurado, de bandeja e de sacos.

Conforme Porter et al., (1986) apud Martins (2002), as técnicas de secagem de leito fixo e leito móvel estão baseadas em duas condições entre a corrente gasosa e o leito de sólidos. A condição estática ocorre quando não existe movimento relativo entre as partículas sólidas, portanto a densidade volumétrica do leito é alterada somente devido à transferência de água do sólido para o gás de arraste. Já a condição dinâmica acontece quando as partículas encontram-se em condições de escoar uma sobre as outras. O movimento das partículas pode ser ascendente, descendente ou ambos simultaneamente.

De acordo com Fumagalli (2007), o secador de leito fixo surgiu em regiões agrícolas devido à necessidade de se secar os grãos após a sua colheita e armazená-los para posterior uso. Após sua implantação em regiões agrícolas, o baixo custo de construção e de operação deste tipo de secador propiciou a sua aplicação em processos industriais. Ao longo destes últimos anos, as modificações ocorridas na construção destes secadores, permitem, hoje, obter

um produto final mais homogêneo, evitando os efeitos da condensação do vapor de água e a reumidificação do sólido.

A secagem em leito fixo e camada fina possibilita uma análise fundamental da cinética de secagem de materiais para os quais há pouca informação frente a diferentes condições de secagem, auxiliando no entendimento dos fenômenos de transferência de calor e massa.

2.7 Modelos de Secagem em Camada Delgada

De acordo com Júnior; Corrêa (1999), o estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por simulação matemática. Para isto, são utilizados modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem. Na literatura, encontram-se vários métodos para se analisar a secagem em camada delgada, sendo estes os teóricos, empíricos e semi-empíricos.

Para Carlesso et al., (2007), os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa. Estes modelos descrevem de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito. Os modelos podem atender a exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura. Nesse caso, considera-se que o valor médio da razão de umidade, quer seja determinado pela solução de uma série truncada ou por integração de um conjunto de pontos discretos, distribuídos na matriz do produto, representa a taxa de secagem de um sólido isolado.

Segundo Carlesso et al., (2005), o método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se em condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. A limitação para este tipo de método está relacionada ao fato de que não fornece a indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Estes modelos negligenciam os fundamentos do processo de secagem e, embora possam descrever a curva de secagem para as condições do experimento, não podem dar uma visão clara e exata dos importantes processos que ocorrem durante a secagem.

Conforme Brooker; Bakker-Arkema; Hall (1992) modelos empíricos baseiam-se na segunda Lei de Fick, Equação 2.10, que considera as condições isotérmicas e a resistência à transferência de umidade somente na superfície do produto.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef}(\nabla^2 X) \quad (2.10)$$

Segundo Oliveira et al., (2006), o coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água. Seu valor é sempre obtido pelo ajuste de valores experimentais. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, temperatura e velocidade do ar, ela não é intrínseca ao material. Assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva.

Assumindo na Equação 2.10 que a migração da umidade do interior do material para a superfície ocorre somente por difusão, mantendo constantes a temperatura e o coeficiente de difusividade, desprezando o encolhimento do material, e considerando-se a secagem pelos dois lados, tem-se a Equação 2.11.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{e_0^2} t \right] \quad (2.11)$$

onde e_0 é a espessura de sólidos na bandeja, X_t é a umidade média no tempo, X_e é a umidade de equilíbrio, X_{t_0} é a umidade no tempo zero e X é a umidade no tempo.

A partir da solução geral da Segunda Lei de Fick, Equação 2.10, casos particulares de modelos que envolvem a dependência da constante de secagem, k , com o tempo em determinadas condições iniciais foram obtidas por diversos pesquisadores. Exemplos desses são os modelos semi-empíricos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson (1968), Thompson (1968) e Midilli (2002).

Para Syarief; Morey; Gustafson (1984) os métodos semi-empíricos oferecem um compromisso entre a teoria e a aplicação sem, entretanto, refletirem toda a complexidade do fenômeno. Baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto.

Conforme Júnior; Corrêa (1999), o método de Lewis sugeriu que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a

mudança da umidade fosse proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material, quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, segundo a Equação 2.12.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{X}{X_0} = -k(X - X_e) \quad (2.12)$$

Segundo Oliveira et al., (2006) , em algumas situações como, quando há uma elevada interferência da resistência interna do material no processo de secagem, o modelo de Page (1949), representado pela Equação 2.13, pode ser aplicado:

$$X_t = \exp(-kt^j) \quad (2.13)$$

onde j é um parâmetro de ajuste do modelo.

De acordo com Carlesso et al., (2007), o modelo de Henderson contribui para mostrar que os coeficientes genéricos de secagem, não eram constantes e sim dependentes da temperatura do ar e dos mecanismos de difusão de água ou vapor d'água no interior das sementes. Este modelo é expresso através da Equação 2.14:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.14)$$

onde a, b, c são constantes dos modelos e k_0, k_1 coeficientes de secagem, s^{-1} .

Thompson; Peart; Foster (1968) desenvolveu um modelo de simulação para secagem de grãos em camada estacionária, propondo a Equação 2.15 para o processo de secagem em camada fina, sendo esta totalmente empírica,

$$t = C \cdot \ln(e^{-kt^n}) + B \cdot [\ln(e^{-kt^n})]^2 \quad (2.15)$$

onde os parâmetros C e B são funções da temperatura do ar.

Conforme Martinazzo et al., (2007), o modelo de Midilli é representado pela Equação 2.16,

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (2.16)$$

2.8 Isotermas de Adsorção e Dessorção

Para Goneli (2008) a vida útil de muitos produtos pode ser determinada através do processo de secagem e armazenamento. Nestes processos, o conhecimento da relação entre a umidade do material e a umidade relativa do ar é essencial.

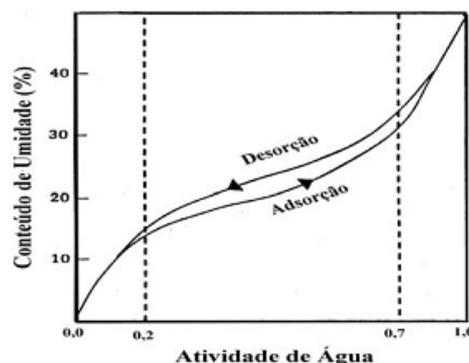
Diversos autores, tais como Samaniego-Esguerra; Boag; Robertson (1991), Morey; Meronuck; Lang (1995), Chen; Jayas (1998), afirmam que os valores de umidade de

equilíbrio dos produtos biológicos dependem da espécie, da variedade, do teor de umidade inicial e principalmente da temperatura e umidade relativa do ambiente em que se encontram. Para Iglesias; Chirife (1982) apud Vieira; Figueirêdo; Queiroz (2007), o estudo da atividade de água pode ser feito mediante a avaliação de isotermas.

De acordo com Kurozawa; El-Aouar; Murr (2005), as isotermas de equilíbrio são uma relação entre a umidade do material e a atividade da água (a_w) correspondente em uma determinada temperatura. Elas são importantes na análise e controle de vários processos na indústria, tais como na preservação, na secagem, na definição de embalagem e em misturas. As isotermas de sorção podem ser usadas para prever as mudanças na estabilidade do alimento, para selecionar o material da embalagem e para definir os ingredientes apropriados para a formulação de um produto alimentício.

Para Park et al., (2008) uma isoterma de sorção pode ser de adsorção ou de dessorção. Tem-se a isoterma de adsorção quando um material mais seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a umidade relativa e medindo o aumento de peso devido ao ganho de água. A isoterma de dessorção é quando o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso, devido à saída de água. A isoterma de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção, a um determinado valor de atividade de água. As curvas de adsorção e dessorção não coincidem, e esta diferença entre as isotermas é conhecida como o fenômeno de histerese, conforme apresentado na Figura 2.6. Este fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase.

Figura 2.6 – Histerese das isotermas de sorção.



Fonte: Park; Nogueira (1992) apud Park et al., 2008.

Labuza (1968) apud Park et al., (2008), classifica as três regiões mostradas na Figura 2.6, como monocamada (α_w até 0,2), policamada (α_w entre 0,2 a 0,7) e condensação seguida da dissolução de materiais solúveis (α_w acima de 0,7).

No equilíbrio, a atividade de água (α_w) está relacionada com a umidade relativa (UR) do ambiente através da Equação 2.17,

$$\alpha_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{UR}{100} \quad (2.17)$$

onde P_w é a pressão parcial da umidade contida no produto e P_v é a pressão de vapor da água pura á mesma temperatura.

A umidade de equilíbrio (X_e) pode ser determinada através da Equação 2.18:

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_{as}}{m_{as}} \quad (2.18)$$

onde m_{eq} é a massa da amostra no equilíbrio e m_{as} é a massa seca da amostra.

Conforme Mortola; Meili; Pinto (2003), as isotermas de equilíbrio podem ser determinadas através dos métodos gravimétrico e higrométrico. No método higrométrico, a umidade do material é mantida constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio. Já no método gravimétrico, a temperatura do ar e a atividade de água são mantidas constantes até que a umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio. A circulação do ar pode estar ativa ou estagnada. Para Moreira (2000) o método estático possui as vantagens de se obter condições termodinâmicas constantes com maior facilidade e permitir o uso de soluções ácidas ou soluções salinas saturadas.

De acordo com Park et al., (2008), existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios de segundo grau têm demonstrado bons resultados. Abaixo são citados alguns dos modelos mais utilizados.

Segundo Moraes; Rosa; Pinto (2008) o modelo Henderson é um dos modelos empíricos mais usados para a predição de isotermas conforme a Equação 2.19:

$$X_e = \left[-\frac{\ln(1-\alpha_w)}{a} \right]^{1/b} \quad (2.19)$$

onde a e b são constantes.

Para Mulet et al., (2002) o modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) tem sido usado para ajustar os dados de produtos alimentícios com resultados bastante satisfatórios.

Através deste modelo também é possível obter valores da umidade e do calor de sorção da monocamada. O modelo GAB é expresso pela Equação 2.20:

$$X_s = \frac{X_m \cdot Ct \cdot K \cdot UR}{(1 - K \cdot UR) \cdot (1 - k \cdot UR + C \cdot K \cdot UR)} \quad (2.20)$$

onde X_m é a umidade na monocamada do material em $\frac{kg_{H_2O}}{kg_{se}}$ e Ct e K são constantes

associadas às entalpias de sorção da monocamada e multicamada, respectivamente.

O modelo Chen, para Park et al., (2008), é baseado no período transiente da secagem e está limitado a situações em que a difusão é o principal modo de transporte de massa. Esse modelo é expresso pela Equação 2.21:

$$a_w = \exp[k + a \cdot \exp(b \cdot X_s)] \quad (2.21)$$

onde a e b são constantes da equação.

Para Alcântara et al., (2009), o modelo De Peleg é empírico de quatro parâmetros. Esse modelo é expresso pela Equação 2.22:

$$X_s = k_2 \cdot a_w^{n_1} + k_3 \cdot a_w^{n_2} \quad (2.22)$$

onde k_2 , k_3 , n_1 , n_2 são constantes da equação.

De acordo com Kurozawa; El-Aouar; Murr (2005), o modelo BET (Brunauer, Emmett e Teller) é amplamente usado para fornecer uma estimativa da umidade na monocamada adsorvida na superfície do alimento. O modelo BET é expresso pela Equação 2.23:

$$X_s = \left[\frac{(X_m \cdot c \cdot s^{b/T \cdot a_w}) \cdot [1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (s^{b/T - 1}) \cdot a_w - s^{b/T \cdot a_w^{n+1}}]} \right] \quad (2.23)$$

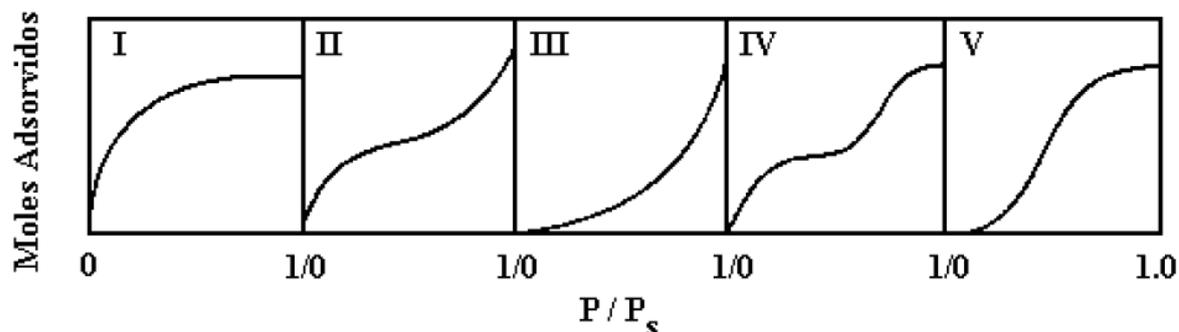
onde este modelo apresenta um ajuste satisfatório para atividade de água entre 0,05 e 0,45.

Por fim, segundo Gomes; Figueirêdo; Queiroz (2002), o modelo Oswin, empírico, baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Apresenta algumas vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB, tendo somente duas constantes de fácil linearização. Ele é definido através da Equação 2.24.

$$X_s = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (2.24)$$

Para Porpino (2009), existem diversos tipos de isotermas, contudo, a maioria destas isotermas pode ser agrupada em seis classes, enquadrada nos tipos de I a V da classificação proposta por Brunauer, Emmett e Teller. Na Figura 2.7 é apresentado um esboço destes tipos de isotermas.

Figura 2.7 – Classificação das isotermas por Brunauer.



Fonte: Schwanke (2003).

De acordo com Porpino (2009), as isotermas do tipo I podem ser limitadas a poucas camadas moleculares, onde os poros excedem um pouco o diâmetro molecular do adsorvente. Segundo Schwanke (2003), as isotermas do tipo II e III resultam de adsorventes nos quais há uma extensa variação de tamanhos de poros. Esta variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar.

Isotermas do tipo IV são obtidas com adsorventes mesoporosos. Esta isoterma, na maioria dos casos, exibe uma proeminente região na qual a pressão relativa varia pouco e o volume adsorvido aumenta bruscamente.

Por fim, as isotermas do tipo V ocorrem quando os efeitos da atração intermolecular são grandes, ou seja, as atrações entre as moléculas adsorvidas são mais fortes que as interações sorbato-superfície.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Sementes

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de azevém, *Lolium multiflorum*, Figura 3.1, obtidas na cidade de Bagé/RS. As sementes foram adquiridas de uma só vez com o objetivo de ter um material pertencente ao mesmo lote, sendo assim, com características e composição mais próximas. A aparência das sementes de azevém e o seu conteúdo de umidade foram adotados como parâmetros de padronização da amostra.

Figura 3.1 – Sementes de azevém (*Lolium multiflorum*) compradas no mercado local.



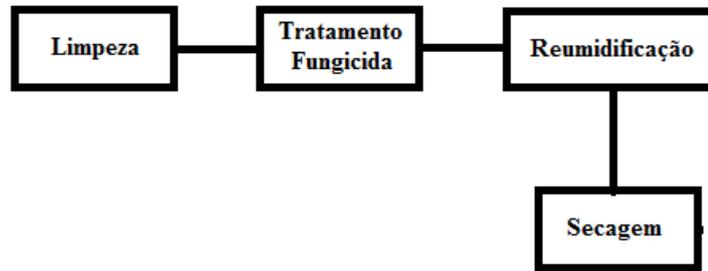
Fonte: autor.

3.1.1 Preparo das Sementes Compradas no Mercado Local

Devido à dificuldade de se obter as sementes na época de colheita, situação ideal para a secagem, adquiriu-se estas prontas para o plantio, isto é, secas até o teor de umidade comercial.

Na Figura 3.2 é apresentado um fluxograma organizacional das etapas de preparo das sementes compradas no mercado local até o processo de secagem.

Figura 3.2 – Fluxograma organizacional das etapas de preparo das sementes compradas no mercado local.



Fonte: autor.

A limpeza das sementes foi realizada através de um soprador do tipo South Dakota, conforme ilustra a Figura 3.3. As sementes foram limpas através da diferença de densidade, onde ao entrarem em contato com o ar ascendente as partículas menos densas adquiriram um movimento ascendente e as mais densas permaneciam na base do soprador.

Figura 3.3 – Soprador do tipo South Dakota.



Fonte: autor.

Para a realização da etapa de tratamento com fungicida, foi utilizado o reagente químico, conhecido comercialmente como Thiran, cuja composição química básica é carboxina, tetramethylthiuram disulfide, etileno glicol e outros ingredientes. Este fungicida foi aplicado a uma concentração de 1 %.

O processo de reumidificação foi realizado de acordo com a metodologia de saturação proposta por Arnost Jr. (1997). Esse consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e

saturado sob uma temperatura de 35 °C. O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado foi um banho termostaticado (banho maria) da marca Quimis, conforme ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Amostras de sementes no interior do banho termostaticado.



Fonte: autor.

Foi utilizada na reumidificação das sementes uma camada de aproximadamente 2 cm, dispostas em um suporte de fundo telado para facilitar o processo de transferência de massa. Tanto antes como após o término do processo de reumidificação, determinou-se o teor de umidade das sementes através do método gravimétrico recomendado pela Association of Official Analytical Chemists - AOAC, (1997). Esta análise foi realizada em duplicata e o método consistiu em manter as amostras em estufa a 105,5 °C durante 24 h. Para a pesagem das amostras utilizou-se uma balança analítica da marca Shimadzu com carga máxima de 220 g ± 0,001g. A estufa utilizada na análise foi da marca Nova Ética.

O cálculo da umidade das sementes em base úmida foi realizado através da Equação 3.1:

$$U = 100 \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{as}}} \quad (3.1)$$

onde U é a umidade em base úmida, $m_{\text{água}}$ é a massa de água e m_{as} é a massa da amostra seca. A massa de água foi obtida através da Equação 3.3:

$$m_{\text{água}} = m_{\text{au}} - m_{\text{as}} \quad (3.2)$$

onde m_{au} é a massa da amostra úmida e m_{as} é a massa da amostra seca.

3.1.2 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes

As sementes de azevém foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio, densidade real, densidade *bulk*, porosidade do leito, esfericidade e índice de germinação. As técnicas e

procedimentos de análise, utilizados para a determinação destas propriedades, são descritas nos itens que se seguem.

Diâmetro médio de partículas - para uniformizar as sementes de *Lolium multiflorum*, utilizou-se um conjunto de peneiras e um agitador de peneiras, ambos da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda. A partir dos resultados encontrados, determinou-se o diâmetro médio (\bar{d}_m).

Densidade real das partículas - a densidade real (ρ_{real}) das sementes de *Lolium multiflorum* foi determinada por picnometria gasosa em um picnômetro da marca Quantachrome Instruments, ultrafoam1000e, modelo UPY-30F, conforme ilustra a Figura 3.5. O gás inerte utilizado no experimentos foi o hélio com índice de pureza de 6,0 %.

Figura 3.5 – Fotografia do aparato para realização da densidade real.



Fonte: autor.

Este equipamento foi ajustado para realizar dez medidas sucessivas de densidade. A partir dos resultados obtidos, calculou-se a média e o desvio padrão dos valores da densidade.

Densidade bulk - a densidade *bulk* (ρ_{bulk}) das sementes foi determinada através de ensaios de proveta, onde uma proveta da marca Astral Científica de 500 mL foi preenchida com as sementes e a sua massa determinada com o auxílio da balança analítica, cuja marca e modelo já foram descritos nos itens anteriores.

Porosidade média do leito estático - a porosidade média do leito estático de sementes foi determinada pela relação entre a densidade *bulk* e a densidade real das sementes, conforme Equação 3.3:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{real}} \quad (3.3)$$

onde ρ_b é a densidade *bulk*.

Esfericidade - a esfericidade (ϕ) das sementes de azevém foi obtida através de ensaios de paquimetria, onde coletou-se os diâmetros de 20 partículas com o emprego de um paquímetro digital da marca King Tools (0–150 mm).

Como o azevém apresenta três dimensões bem definidas com geometria semelhante a de um elipsóide, os cálculos da esfericidade foram feitos segundo a Equação 3.4:

$$\phi = \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume}}{\text{área da superfície da partícula}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4\pi \times \left(\frac{p^2 \cdot r^2 + p^2 \cdot f^2 + r^2 \cdot f^2}{3} \right)^{1/2}} \quad (3.4)$$

onde p , r e f são a metade do valor do diâmetro do elipsóide e P é uma constante de valor 1,6075. O diâmetro equivalente (d) foi determinado através da Equação 3.5:

$$d = \left[\left(\frac{6}{\pi} \cdot V_{\text{elipsóide}} \right) \right]^{1/3} \quad (3.5)$$

onde o volume do elipsóide ($V_{\text{elipsóide}}$) é determinado através da Equação 3.6.

$$V_{\text{elipsóide}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot r \cdot f \quad (3.6)$$

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Fenômenos de Transporte e no Laboratório 1101 do curso de Engenharia Química, na Universidade Federal do Pampa/Campus Bagé.

Germinação - os testes de germinação foram realizados no Laboratório de Sementes da EMBRAPA/Pecuária Sul da cidade de Bagé/RS. O procedimento para a execução do teste de germinação foi realizado segundo estabelecido nas Regras para Análise de Sementes de 2009. Esta análise constituiu na utilização de caixas *gerbox* juntamente com papel filtro, onde foram colocadas 100 sementes em amostra. Os testes de germinação foram realizados em quadruplicata.

Os ensaios foram realizados em germinadores, operando na temperatura de 20 °C, mantendo-se o fotoperíodo. As contagens dos índices de germinação foram procedidas no quinto e décimo quarto dias após o início do teste. A Figura 3.6 ilustra a estufa de germinação com as amostras.

Figura 3.6 – Teste de germinação.

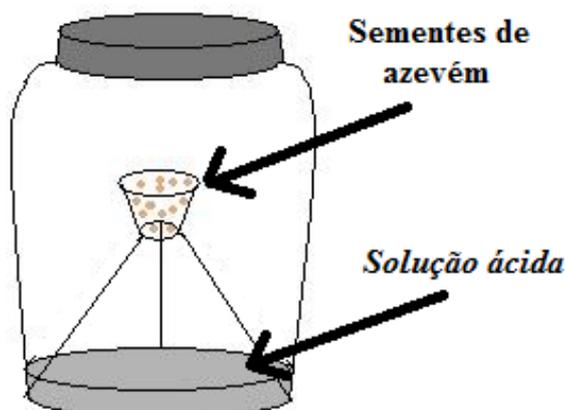


Fonte: autor.

3.1.3 Isotermas de Dessorção

As isotermas de dessorção foram determinadas através do método gravimétrico estático, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico. Os experimentos de secagem foram conduzidos na temperatura de 40 °C, visto que todos eles foram feitos nessa temperatura. Cada análise foi realizada em triplicata, utilizando-se vidros hermeticamente fechados, com tampa de metal, suporte e cadinho de plástico, conforme ilustra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Esquema do recipiente empregado para a realização das isotermas.



Fonte: autor.

No interior de cada pote foi inserido 30 mL de soluções de ácido sulfúrico em onze concentrações diferentes. Também foi inserido em cada pote aproximadamente 1 g de sementes de azevém reumidificado através da metodologia estudada. Na Tabela 3.1 apresentam-se os valores de atividade de água para cada concentração de ácido sulfúrico na temperatura de 40 °C.

Tabela 3.1 - Valores de atividade de água para as concentrações de H₂SO₄ na temperatura de 40 °C.

Concentração de H ₂ SO ₄	a _w
20 %	0,878
25 %	0,824
30 %	0,753
35 %	0,674
40 %	0,574
45 %	0,470
50 %	0,366
55 %	0,267
60 %	0,178
65 %	0,102
70 %	0,049

Fonte: Perry; Green (1997).

Os recipientes apresentados na Figura 3.7 foram colocados em estufa de circulação forçada, marca Nova Ética, sendo realizadas pesagens do cadinho plástico no primeiro, sétimo, décimo e décimo quarto dia de experimento. Essas pesagens foram feitas com o

objetivo de verificar o equilíbrio mássico para cada atmosfera estudada. As pesagens foram realizadas na mesma balança analítica utilizada nos testes anteriores. Com o equilíbrio térmico alcançado no décimo quarto dia, o teor de umidade de equilíbrio (em base seca) foi calculado através da Equação 2.18. Nessa equação, a diferença entre a massa da amostra no equilíbrio mássico e a massa da amostra seca, foi determinada através do método gravimétrico recomendado pela AOAC, (1997), método esse descrito no item 3.1.1.

Esta etapa foi realizada no Laboratório do curso de Engenharia Química, sala 1101, da Universidade Federal do Pampa/Campus Bagé.

3.2 Equipamentos e Periféricos

Para a secagem das sementes de *Lolium multiflorum*, utilizou-se um secador de bandeja com escoamento paralelo de ar, da marca ECO Engenharia, existente no Laboratório de Fenômenos de Transporte do curso de Engenharia Química, na Universidade Federal do Pampa/Campus Bagé. Fotografias ilustrativas do secador e do seu interior são apresentadas nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.

Figura 3.8 – Secador de bandeja com escoamento paralelo de ar. (1) Soprador centrífugo, (2) Resistências elétricas, (3) Painel de controle, (4) Balança, e (5) Anemômetro.



Fonte: autor.

Figura 3.9 – Fotografia interior do túnel de secagem.



Fonte: autor.

O secador apresentado na Figura 3.8 é composto por componentes periféricos de fornecimento de ar, ajuste da vazão de ar, medidas de temperatura e de velocidade do ar, aquecimento do ar, controle da temperatura e balança para a determinação da perda de massa. Nos itens que se seguem são descritos os detalhes dos periféricos que compõe o sistema de secagem.

Fornecimento de ar - o ar de secagem foi fornecido por um soprador centrífugo (Figura 3.8 - legenda 1) modelo Facitar com 1 CV.

Ajuste e medida da vazão do ar - o ajuste da vazão do ar de secagem foi feito através do sistema de controle do secador (Figura 3.8 - legenda 3) que é constituído por um inversor de frequência acoplado ao soprador. Para a determinação da velocidade do escoamento do ar no túnel de secagem, utilizou-se um anemômetro do tipo ventoinha da marca Instrutherm TAD-500, conforme mostrado na Figura 3.8 - legenda 5.

Medidas de temperatura - as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar na entrada do secador e a temperatura do ar de secagem, pós aquecimento, foram obtidas através de termopares do tipo PT100, onde as leituras foram feitas diretamente no painel de controle mostrado na Figura 3.8 - legenda 3.

Aquecimento do ar - o ar de secagem foi aquecido através de quatro resistências elétricas de 800 W cada. Tais resistências elétricas foram inseridas no secador entre o sistema de fornecimento do ar e câmara de secagem, conforme ilustra a Figura 3.8 - legenda 2.

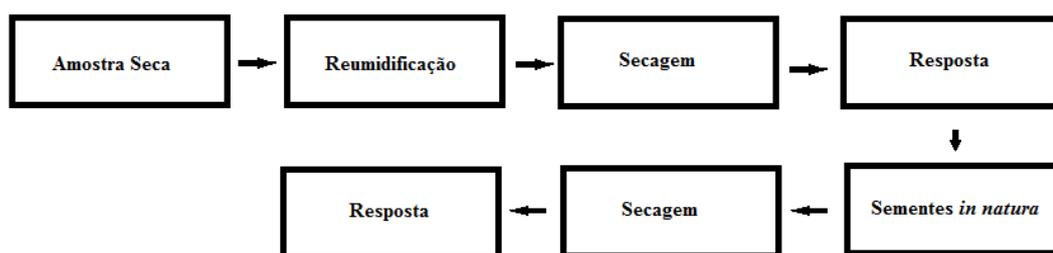
Determinação da massa - a massa da bandeja de secagem, constituída por bandejas cilíndricas de fundo telado com 0,5, 0,75 e 1 cm de altura e 9,5 cm de diâmetro, foi determinada por uma balança da marca Marte Balanças e Aparelhos de Precisão Ltda com carga máxima de $4200 \pm 0,01$ g com pesagem na parte inferior da balança, conforme apresenta a Figura 3.8 - legenda 4.

3.3 Método Experimental de Secagem

3.3.1 Procedimento Experimental de Secagem

Na Figura 3.10 é apresentado um fluxograma organizacional dos experimentos realizados neste trabalho.

Figura 3.10 – Fluxograma organizacional dos experimentos.



Fonte: autor.

Para a realização dos ensaios de secagem, em camada delgada, utilizaram-se parâmetros pré-determinados. A organização dos experimentos seguiu um planejamento experimental fatorial completo 2^3 com ponto central. As variáveis estudadas no processo foram a altura da bandeja (A), velocidade do ar (v) e o tempo de secagem (t), sendo a temperatura do ar de secagem mantida constante no nível de 40°C . As respostas estudadas no planejamento a umidade final das sementes e a germinação. Na Tabela 3.2 são apresentadas as condições experimentais de secagem estudadas neste trabalho, onde os ensaios estão dispostos de acordo com o planejamento experimental fatorial completo 2^3 com duplicata no ponto central.

Durante as secagens a carga de sólidos na bandeja variava entre 6 e 12 g conforme altura da bandeja utilizada. Para cada condição de secagem estudada, o sistema foi monitorado de 5 em 5 minutos para os primeiros 30 minutos da secagem e de 10 em 10

minutos até o tempo proposto no ensaio. As variáveis medidas durante os experimentos foram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar na entrada do túnel de secagem, a temperatura do ar de secagem e a massa na bandeja. Com os valores das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na entrada do secador e com o valor da temperatura do ar de secagem, determinou-se a umidade relativa e absoluta antes e após o aquecimento do ar de secagem. Esta determinação foi feita através do *software* livre Catt2, que é específico para cálculos psicrométricos. Também foi determinado, para cada experimento realizado, o teor de água das amostras tanto antes como após o processo de secagem. Esta análise foi feita em duplicata para cada amostra seguindo o método gravimétrico descrito no item 3.1.1.

Tabela 3.2 – Condições experimentais de secagem.

Nº de ensaios	A (cm)	v (m/s)	t (h)
1	0,5	1,0	2
2	1,0	1,0	2
3	0,5	2,0	2
4	1,0	2,0	2
5	0,5	1,0	3
6	1,0	1,0	3
7	0,5	2,0	3
8	1,0	2,0	3
9	0,75	1,5	2,5
10	0,75	1,5	2,5

Fonte: autor.

Através das respostas obtidas no planejamento experimental, para a umidade final das sementes reumidificadas e a germinação das sementes reumidificadas foi possível determinar as melhores e as piores condições de secagem para o material. A partir destes resultados, seguiu-se para a segunda etapa do estudo do processo de secagem. Esta segunda etapa consistiu em aplicar as melhores e as piores condições de secagem na desidratação de sementes *in natura* colhidas diretamente da lavoura.

A lavoura, ilustrada na da Figura 3.11, foi cultivada na Embrapa Pecuária Sul na cidade de Bagé/RS, onde realizou-se uma primeira colheita de 4 m² de azevém em 22 de novembro de 2012 e uma segunda colheita, também de 4 m² em 29 de novembro de 2012.

Figura 3.11 – Fotografia da lavoura de azevém.



Fonte: autor.

Após cada colheita, foi realizado o processo de separação da semente através de um escarificador de sementes elétrico. Uma fotografia ilustrativa do escarificador de sementes é apresentada na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Fotografia de escarificador de sementes elétrico.



Fonte: autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes Adquiridas no Mercado Local

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos na caracterização física e fisiológica das sementes comerciais adquiridas no mercado local. Nessa tabela os resultados apresentados são a umidade das sementes em base úmida, o diâmetro médio de partícula, a densidade real, a densidade *bulk*, a porosidade média do leito estático, a esfericidade e a germinação.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos na caracterização física das sementes comerciais adquiridas no mercado local.

Propriedade	Valor
U_{secas}	$12,56 \pm 0,00017 \%$
\bar{d}_m	$0,625 \pm 0,29 \text{ mm}$
ρ_{real}	$1366 \pm 4,60 \text{ kg/m}^3$
ρ_{bulk}	$280 \pm 2,83 \text{ kg/m}^3$
ε	$0,80 \pm 0,01$
Φ	$0,17 \pm 0,01$
Germinação	$82,25 \pm 5,90 \%$

Fonte: autor.

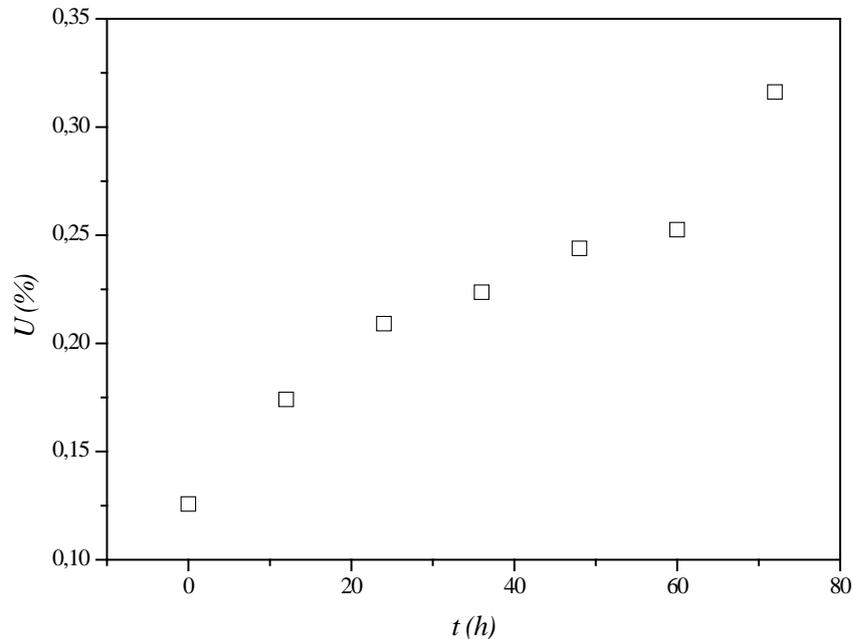
Ao analisar a Tabela 4.1 quanto ao teor de água das sementes compradas no mercado local foi verificado que o seu valor está na faixa indicada ideal segundo Macedo et al., (1987) para a comercialização de sementes de azevém, estando na faixa de 12 a 15 %. Os resultados obtidos para ρ_{real} , ρ_{bulk} , ε , Φ e o \bar{d}_m não foram comparados com a literatura devido a inexistência de dados deste tipo nas bibliografias consultadas. Já a germinação apresentou um valor satisfatório e dentro dos padrões exigidos comercialmente. Os resultados de ρ_{real} , encontrados pela picnometria gasosa são apresentados no Apêndice A.

4.2 Estudo do Processo de Reumidificação

Na Figura 4.1, é apresentado o estudo do processo de reumidificação das sementes de azevém adquiridas no mercado local. Nesta figura são mostrados os dados da umidade das

sementes em base úmida em função do tempo de exposição na atmosfera saturada do banho maria operando na temperatura de 35 °C.

Figura 4.1 – Estudo do processo de reumidificação.



Fonte: autor.

Na Figura 4.1 é possível verificar que as sementes em 48 horas apresentam um teor de umidade de aproximadamente 24 %. Este valor de umidade encontra-se próximo ao valor das sementes colhidas nas lavouras comerciais e que passaram pelo processo de limpeza antes de serem secas e enviadas ao mercado, conforme Maia (1995). A partir de 60 horas notou-se que as sementes sofreram com um processo de deterioração, isto é, verificou-se a presença de fungos. Devido a isto, os processos de reumidificação das sementes foram feitos sempre em 48 horas, com o intuito de garantir as condições encontradas na lavoura pós limpeza e antes do processo de secagem.

4.3 Isotermas de Dessorção das Sementes Reumidificadas

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores da atividade de água com sua respectiva umidade de equilíbrio para a temperatura de 40 °C. Verifica-se nessa tabela que os valores da umidade de equilíbrio diminuem com a redução do valor da atividade de água. Esse fato está de acordo com o esperado para materiais higroscópicos, tendo sido observado também por

Campos et al., (2009) e Oliveira et al., (2006) ao estudarem as isotermas de palma forrageira e casca do marcujá, respectivamente.

Tabela 4.2 – Atividade de água e umidade de equilíbrio para a temperatura de 40 °C.

a_w	X_e
0,878	0,2177
0,824	0,1868
0,753	0,1637
0,674	0,1444
0,574	0,1290
0,470	0,1116
0,366	0,0976
0,267	0,0845
0,178	0,0715
0,102	0,0589
0,049	0,0589

Fonte: autor.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros calculados a partir do ajuste dos modelos de GAB, BET, Oswin, Peleg e Henderson. Também nessa tabela são apresentados os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para cada modelo ajustado aos dados experimentais.

Tabela 4.3 – Parâmetros de ajustes e do coeficiente de determinação da isoterma do azevém para os diferentes modelos.

Modelo	Parâmetro	Valor do Parâmetro	R^2
GAB	X_m	0,0713 \pm 0,002	0,993
	C	67,859 \pm 21,038	
	K	0,7635 \pm 0,015	
BET	X_m	0,05831 \pm 0,002	0,982
	C	405,7069 \pm 1153,707	
	N	7,14244 \pm 0,504	
Oswin	A	0,1173 \pm 0,009	0,996
	B	0,3046 \pm 0,504	
	n_1	0,2937 \pm 0,0537	
Peleg	k_1	0,1255 \pm 0,012	0,991
	n_2	3,8879 \pm 0,813	
	k_2	0,1538 \pm 0,014	
Henderson	A	76,2847 \pm 23,773	0,965
	B	2,24654 \pm 0,162	

Fonte: autor.

Analisando-se a Tabela 4.3 percebe-se que o modelo GAB apresentou um bom ajuste para a temperatura estudada, sendo o valor de R^2 de 0,99316. Neste modelo encontrou-se um

X_m , que representa a umidade na monocamada, com um valor de 0,0713 kg/kg_{ss}. Já para o K , que representa o fator de correção das propriedades das moléculas na multicamada com relação ao volume do líquido, obteve-se um valor de 0,7636. Vidal et al., (2003) descreveu a impossibilidade de atribuir sentido físico para os valores do parâmetro C do modelo GAB. Valores de C alto também foram encontrados por Almeida et al., (2004) para isoterma da polpa da goiaba a 40°C. Para o modelo BET o ajuste foi considerado baixo em relação a todos os modelos testados, salve-se o modelo de Henderson. Este fato pode ter ocorrido devido ao modelo de BET ter restrições para a atividade de água, estando compreendida a faixa entre 0,05 e 0,45. Encontrou-se um valor de X_m , para este modelo, de aproximadamente 0,0583 kg/kg_{ss}. Para o modelo de Peleg, o ajuste foi considerado satisfatório, sendo este de 0,991.

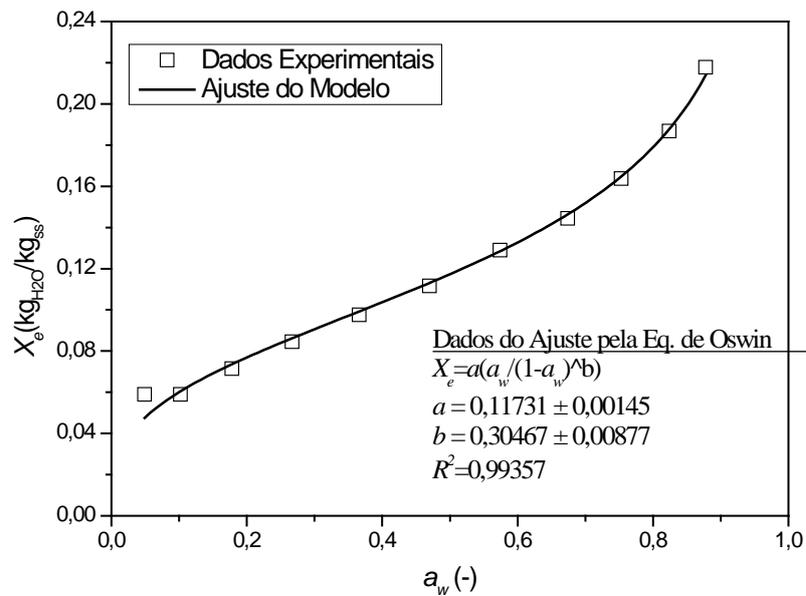
Ainda observando a Tabela 4.3, para o coeficiente de determinação, percebe-se que o modelo de Oswin descreveu satisfatoriamente as isotermas de azevém, tendo R^2 de 0,993. Este fato pode ter ocorrido devido a este modelo basear-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal, apresentando vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB, tendo somente duas constantes linearização. Os parâmetros de ajuste para o modelo de Oswin encontrados neste estudo, $a= 0,1173$ e $b= 0,3047$, estão dentro do esperado, isto é, de acordo com Blahovec (2004), o valor do parâmetros $a>0$ e $1\geq b>0$. Por fim, o modelo de Henderson, foi o que apresentou o pior coeficiente de determinação, sendo este de 0,96463, indicando ser inadequado para o estudo das isotermas de azevém. Porém neste modelo os parâmetros de ajustes foram encontrados de acordo com o previsto na literatura. Blahovec (2004) afirma que o modelo de Henderson deve apresentar $a>0$ e $b\geq 1$. Neste trabalho obteve-se $a= 76,2847$ e $b=2,2465$. Tanto para o modelo de Oswin quanto para o modelo de Henderson, ter os referidos parâmetros dentro destes intervalos, indica que não há ponto de inflexão na curva e, sendo assim, não há mudanças na concavidade das funções, logo, estes parâmetros possuem consistência matemática e física, conforme Alcântara et al., 2009).

Baseando-se no coeficiente de determinação de melhor ajuste e também devido a várias bibliográficas encontradas para forrageiras, o modelo que foi utilizado para o ajuste das isotermas de dessorção das sementes de azevém reumidificadas, foi o de Oswin, cuja curva experimental e ajustada pelo respectivo modelo é apresentada na Figura 4.2.

Observando-se a isoterma do azevém da Figura 4.2, percebe-se que esta é do tipo II, seguindo a classificação de Brunauer cuja a forma sigmoidal é utilizada principalmente em isotermas de produtos orgânicos. Este tipo de isoterma resulta de adsorventes nos quais há

uma extensa variação de tamanhos de poros. Esta variação permite, ao adsorvente, a capacitação de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar.

Figura 4.2 – Isoterma do azevém para a temperatura de 40 °C ajustada para o modelo de Oswin.



Fonte: autor.

4.4 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Azevém Reumidificadas

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da umidade das sementes após o processo de reumidificação e depois das secagens para as condições experimentais estudadas neste trabalho, ensaios 1 a 10.

Tabela 4.4 – Umidade pós-reumidificação e depois da secagem.

Ensaio	Respostas (%)	
	U_{PR}	U_{PS}
1	26,47±1,29	18,07±0,32
2	21,41±0,07	13,30±0,14
3	20,60±0,07	10,97±0,14
4	22,79±0,37	14,05±0,04
5	22,74±0,00	11,74±0,03
6	22,95±0,59	12,69±0,07
7	23,40±0,03	11,27±0,02
8	20,10±0,30	10,85±0,01
9	20,49±0,15	14,39±0,19
10	21,27±0,22	13,58±0,33

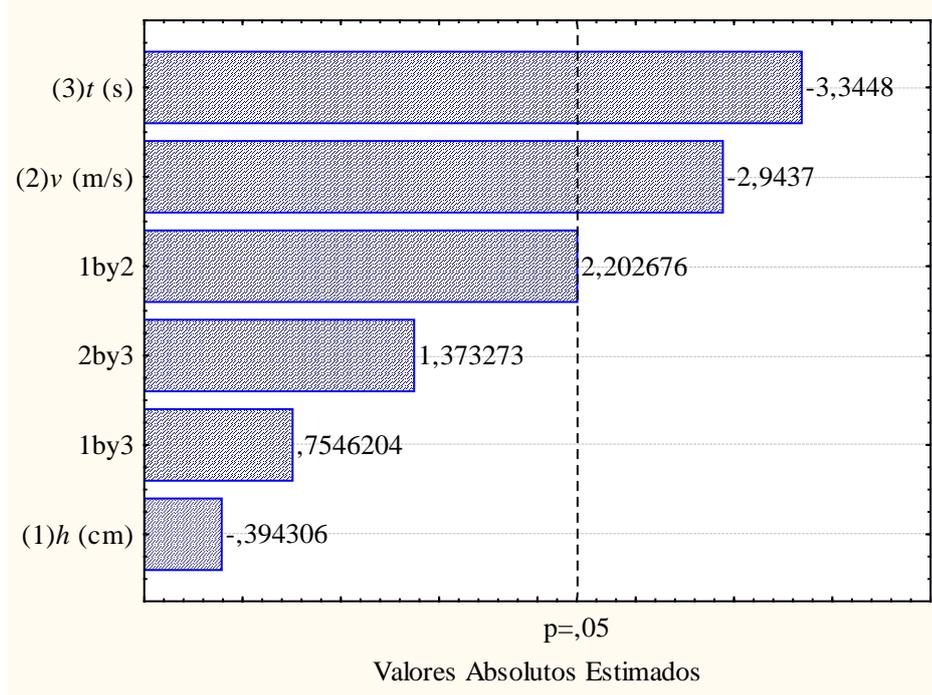
Fonte: autor.

Analisando os resultados encontrados na Tabela 4.4, verificou-se que a reumidificação em todos os experimentos aconteceu de forma eficiente, estando sempre na faixa de 20 a 26 % de umidade. Já os resultados obtidos para a umidade das sementes secas mostraram que para quase todas as condições experimentais estudadas neste trabalho os valores de U_{PS} encontraram-se na faixa de 10 a 15 %, que é a faixa considerada a ideal para a comercialização das sementes, de acordo com Macedo; Marques Neto; Batista (1987). Exceção para o ensaio 1, onde o valor de U_{PS} foi de aproximadamente 18 %.

Para uma melhor compreensão da influência das variáveis de altura da bandeja, velocidade do ar e tempo de secagem nos valores de U_{PS} , é apresentada a seguir a análise do diagrama de Pareto do planejamento experimental 2^3 com duplicata no ponto central.

A Figura 4.3 mostra diagrama de Pareto do planejamento experimental 2^3 com duplicata no ponto central. Nessa figura a magnitude dos efeitos sobre a resposta U_{PS} é apresentada pelas colunas, enquanto que a linha transversal à coluna representa a magnitude dos efeitos com significado estatístico para $p=0,05$, ou seja, os fatores que são estatisticamente significativos ao nível de 95 % de confiança.

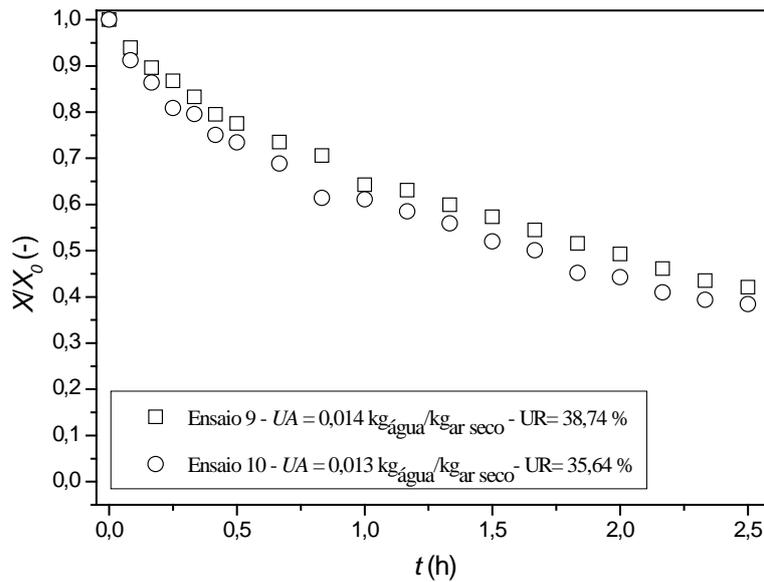
Figura 4.3 – Diagrama de Pareto para a resposta U_{PS} .



Analisando-se a Figura 4.3 observa-se que o fator tempo foi o que influenciou de forma mais significativa a resposta U_{PS} , atingindo um efeito estimado de - 3,3448. Uma possível explicação para que o tempo de secagem tenha sido a variável de maior influência deve-se ao fato de que quando maior o tempo, menor será a umidade pós-secagem. O sinal negativo indica que a diminuição do tempo de secagem aumenta a umidade pós secagem. Outro fator que também exerceu influência significativa na resposta U_{PS} foi à velocidade do ar, com um efeito estimado de -2,9437. O sinal negativo indica que com aumento da velocidade do ar diminui-se a umidade pós secagem. Destaca-se ainda que a interação entre as variáveis tempo de secagem e velocidade do ar também exerceram influência na resposta, com um efeito positivo estimado de 2,2026. Outro aspecto importante observado na Figura 4.3 é que a variável altura da bandeja e suas respectivas interações não exerceram influência significativa na U_{PS} . Este fato pode ter ocorrido devido as secagens terem sido feitas em camada delgada e em apenas uma temperatura.

Na Figura 4.4 apresenta-se o adimensional de umidade em função do tempo para as secagens realizadas com temperatura de 40 °C, altura da bandeja de 0,75 cm, velocidade do ar de 1,5 m/s e tempo de 2,5 horas, ensaios 9 e 10.

Figura 4.4 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 9 e 10.

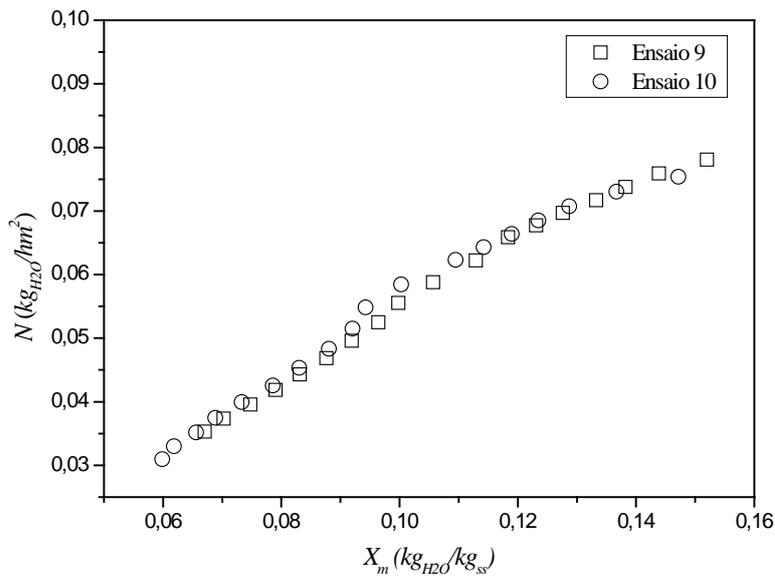


Fonte: autor.

Na Figura 4.4, é verificado a diminuição do teor de água durante o processo de secagem. Outro aspecto observado nessa figura foi a boa reprodutibilidade do experimento para a duplicata.

A Figura 4.5 apresenta a taxa de secagem em função da umidade média para as secagens realizadas com temperatura de 40 °C, altura da bandeja de 0,75 cm, velocidade do ar de 1,5 m/s e tempo de 2,5 horas, ensaios 9 e 10 mostrados na Figura 4.4.

Figura 4.5 – Taxa de secagem em função da umidade média para os ensaios 9 e 10.



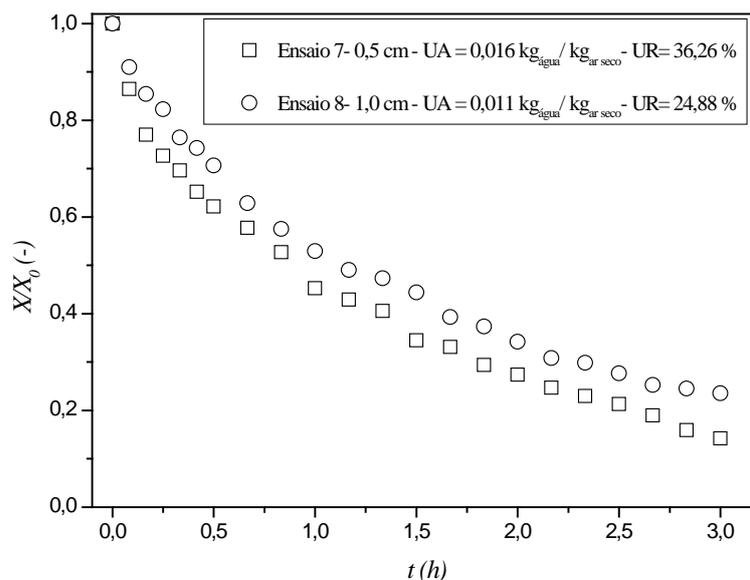
Fonte: autor.

Analisando-se a Figura 4.5, observa-se que taxa de secagem teve um comportamento representado somente pelo período de taxa decrescente. A inexistência da taxa constante condiz com o esperado fisicamente, visto que as sementes reumidificadas possuíam uma umidade inicial baixa, refletida nos valores inferiores a 26 %, e sem a presença de água superficial. Esse fato indica que toda a umidade adquirida no processo de reumidificação ficou localizada nos poros da semente. Portanto, a sua retirada deve ocorrer por mecanismos de transporte difusivos ou capilaridade, que estão representados na Figura 4.5 através da curvatura apresentada no decaimento da taxa de secagem.

A Figura 4.6 apresenta o adimensional de umidade em função do tempo para as secagens 7 e 8. Nessa figura é avaliada a influência da altura da bandeja através da sua variação nos valores de 0,5 e 1,0 cm. Na Figura 4.6, as condições experimentais mantidas constantes foram à velocidade do ar de 2,0 m/s e tempo de 3 h.

Na Figura 4.6, percebe-se que o aumento na espessura da bandeja proporcionou uma diminuição no processo de secagem, isto é, no ensaio 8, onde a altura da bandeja era maior (1,0 cm), a secagem foi mais lenta do que no ensaio 7, onde a altura da bandeja era menor (0,5 cm). Este fato pode ter ocorrido, pois o aumento na altura de bandeja provoca uma resistência maior ao processo de secagem, o que dificulta a transferência de calor e de massa do sistema.

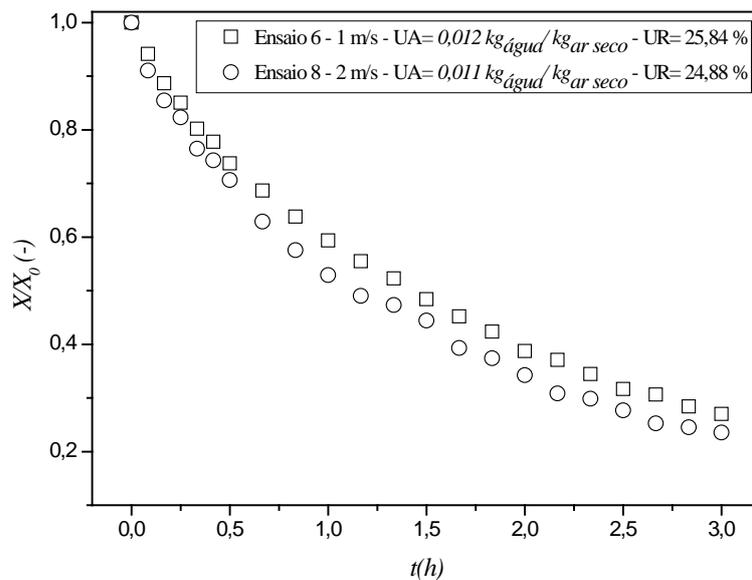
Figura 4.6 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 7 e 8 – $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v= 2,0\text{ m/s}$, $t= 3\text{ h}$.



Fonte: autor.

A Figura 4.7 apresenta o adimensional de umidade em função do tempo para as secagens 6 e 8. Nesta figura é avaliada a influência da velocidade do ar através da sua variação nos valores de 1,0 e 2,0 m/s. Na Figura 4.7 as condições experimentais mantidas constantes foram a altura da bandeja de 1,0 cm e o tempo de 3 h.

Figura 4.7 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 6 e 8 – $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A= 1,0\text{ cm}$, $t= 3\text{ h}$.

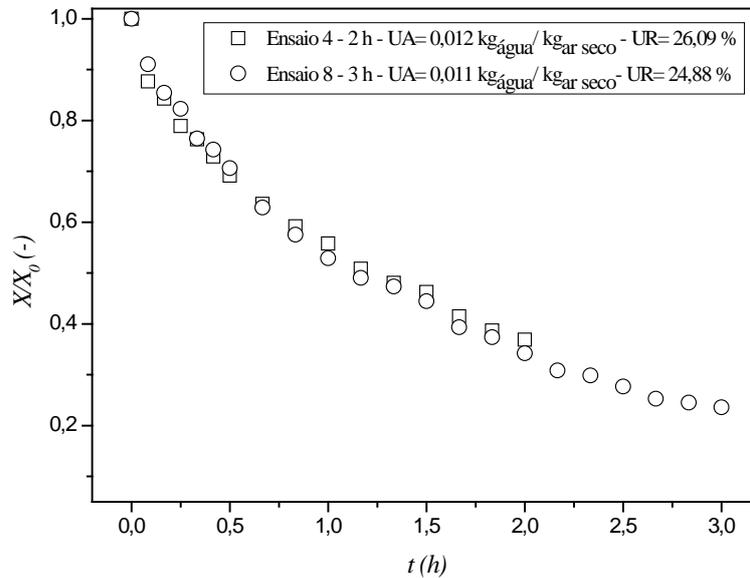


Fonte: autor.

Através das curvas de secagem da Figura 4.7, pode-se observar a influência da velocidade do ar no processo de secagem. O ensaio 6, onde a velocidade do ar foi de 1 m/s apresentou intensidade de secagem menor que o ensaio 8, onde a velocidade do ar foi de 2 m/s. O aumento do escoamento do ar de secagem promove um aumento na força motriz do processo de secagem, facilitando assim, a transferência de calor e de massa do sistema.

A Figura 4.8 apresenta o adimensional de umidade em função do tempo para as secagens 4 e 8, onde é avaliado a influência do tempo de secagem através da sua variação nos valores de 2 e 3 h. As condições experimentais mantidas constantes foram a altura da bandeja de 1,0 cm e velocidade do ar de 2 m/s.

Figura 4.8 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios 4 e 8 – $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A= 1,0\text{ cm}$, $v= 2\text{ m/s}$.



Analisando-se as curvas de secagem na Figura 4.8 percebe-se uma concordância nos dados. Como as condições experimentais de altura da bandeja, velocidade do ar e temperatura foram mantidas constantes, as curvas de secagem dos ensaios 4 e 8 se sobrepõem até o tempo de 2 h, tempo final do ensaio 4. A partir de então, o ensaio 8 com tempo de secagem de 3 h continuou diminuindo seu conteúdo de água livre até o processo ser interrompido conforme planejamento do experimento.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados do teste de germinação total e suas respectivas leituras ao quinto e décimo quarto dia para as sementes comerciais adquiridas no mercado local e para as sementes reumidificadas e secas de acordo com o planejamento experimental 2^3 com duplicata no ponto central.

Tabela 4.5 – Resultados do teste de germinação.

Amostra-Ensaio	5 dias (%)	14 dias (%)	Total (%)
Semente comercial	61,00 ± 4,55	21,25 ± 6,02	82,25 ± 5,91
1	43,00 ± 5,48	20,75 ± 6,70	63,75 ± 3,69
2	64,00 ± 3,91	16,50 ± 4,04	80,50 ± 6,61
3	65,50 ± 8,54	19,25 ± 5,90	84,75 ± 9,11
4	65,25 ± 2,63	2,50 ± 1,29	67,75 ± 3,77
5	79,00 ± 3,56	1,50 ± 0,58	80,50 ± 3,42
6	66,00 ± 6,38	1,50 ± 1,00	67,50 ± 5,80
7	73,25 ± 2,36	1,75 ± 0,50	75,00 ± 2,45
8	52,00 ± 11,77	31,70 ± 9,06	83,75 ± 3,64
9	44,5 ± 14,73	29,00 ± 8,79	73,50 ± 2,69
10	66,0 ± 3,16	4,00 ± 1,15	70,00 ± 0,92

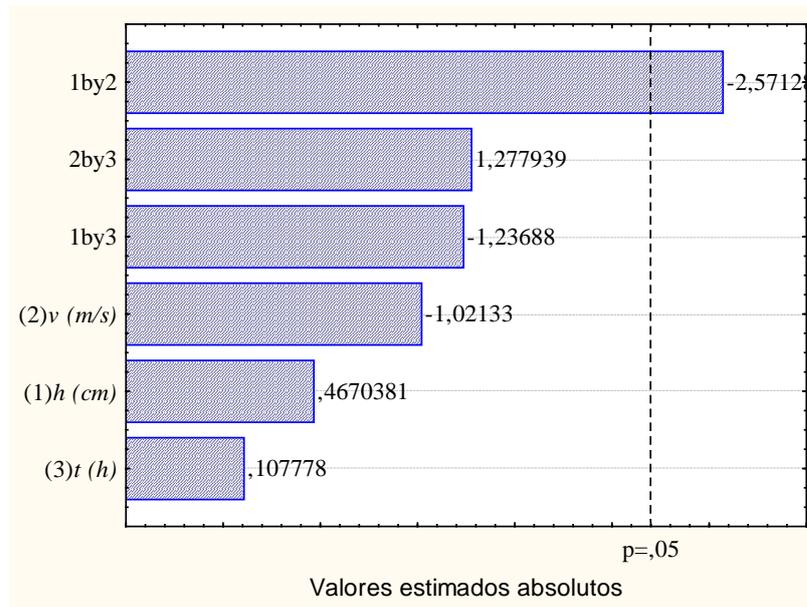
Fonte: autor.

Comparando-se os resultados no 5° e no 14° dia de germinação, na Tabela 4.5, percebe-se que o maior percentual de sementes germinadas ocorreu até o 5° dia. Devido a alta velocidade de emergência das sementes neste período é possível afirmar que essas possuem bom vigor.

Analisando-se os índices totais de germinação da Tabela 4.5, é possível dizer que os valores ficaram compreendidos entre 63 a 84 %. O ensaio 3 foi o que apresentou a melhor germinação com um valor total de 84,75 ± 9,11 %, valor este bastante similar ao das sementes comerciais . Já o ensaio 1, foi o que apresentou o pior índice de germinação com um valor total de 63,75 ± 3,69%.

Para uma melhor compreensão da influência das variáveis altura da bandeja, velocidade do ar e tempo de secagem na germinação, é apresentada na Figura 4.9 o diagrama de Pareto do planejamento experimental 2³ com duplicata no ponto central. Nessa figura a magnitude dos efeitos sobre a resposta germinação é apresentada pelas colunas enquanto que a linha transversal à coluna representa a magnitude dos efeitos com significado estatístico para p=0,05, ou seja, os fatores que são estatisticamente significativos ao nível de 95 % de confiança.

Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para a resposta índice total de germinação.



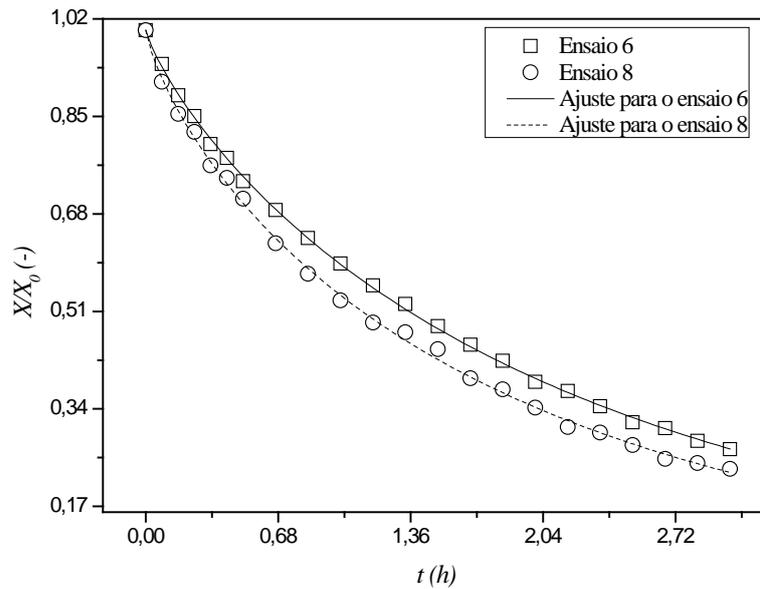
Analisando-se a Figura 4.9 observa-se que somente a interação entre os fatores altura da bandeja e velocidade do ar exerceu influência significativa, atingindo um efeito estimado de -2,5712. O sinal negativo indica que a interação entre esses fatores promove uma diminuição nos índices totais de germinação das sementes.

4.5 Análises dos Modelos de Secagem

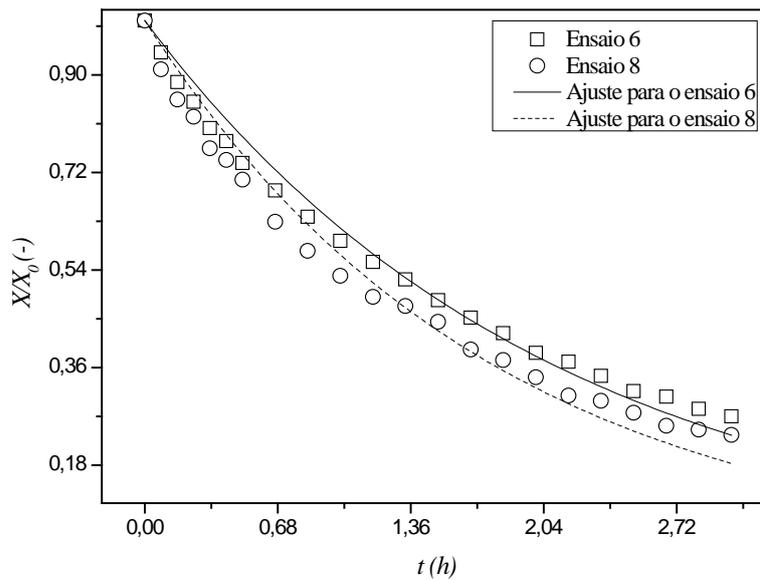
Neste item serão apresentados somente os ajustes dos modelos Page e Fick para algumas condições experimentais devido ao fato de que o comportamento qualitativo para todos os ajustes das curvas foi semelhante. Os demais ajustes das curvas encontram-se no Apêndice B.

As Figuras 4.10 (a) e (b) apresentam o ajuste dos modelos de Page e Fick para os ensaios 6 e 8, onde as condições experimentais foram $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A= 1,0\text{ cm}$, $v= 1\text{ e }2\text{ m/s}$ e $t= 3\text{ h}$.

Figura 4.10 (a), (b) – Ajuste para os ensaios 6 e 8 nos modelos (a) Page e (b) Fick.



(a)



(b)

Fonte: autor.

As curvas da Figura 4.10 (a) e (b) mostram boa concordância entre os dados experimentais e os preditos pelos modelos Page e Fick, onde pelas figuras é possível observar visualmente que o modelo de Page foi o que apresentou melhor concordância. Para comprovar este fato, são mostrados na Tabela 4.6 os parâmetros de ajuste dos modelos de Page e Fick para os ensaios 4, 6, 7 e 8. Nessa tabela também é apresentada as respectivas difusividades efetivas calculadas a partir das constantes de secagens.

Tabela 4.6 – Parâmetros de ajuste e difusividade efetiva para cada condição de secagem analisada pelos modelos da Lei de Fick e de Page.

Ajuste do Modelo da Lei de Fick				
Ensaio	$K (h^{-1})$	R^2	$D_{ef} (m^2/h)$	
4	0,580 ±0,026	0,9327	5,880 x10 ⁻⁶	
6	0,482 ±0,010	0,98495	4,886 x10 ⁻⁶	
7	0,725±0,031	0,94619	2,397 x10 ⁻⁶	
8	0,566 ±0,016	0,97298	5,733 x10 ⁻⁶	
Ajuste do Modelo de Page				
Ensaio	$K (h^{-1})$	J	R^2	$D_{ef} (m^2/h)$
4	0,603 ±0,005	0,701 ±0,013	0,997	6,1072x10 ⁻⁶
6	0,524 ±0,002	0,833 ±0,006	0,999	5,3094x10 ⁻⁶
7	0,791 ±0,010	0,724 ±0,017	0,995	2,5201x10 ⁻⁶
8	0,620 ±0,004	0,788 ±0,009	0,999	6,2786x10 ⁻⁶

Fonte: autor.

Pela análise da Tabela 4.6 observa-se que a equação empírica de Page apresentou melhores ajustes em relação ao modelo da Lei de Fick, revelado pelos valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99. Isso é explicado pelo fato de que em algumas situações a teoria difusional, representada pela Lei de Fick, não é adequada para ajustar o comportamento da taxa de secagem devido às interferências no efeito da resistência interna da matéria segundo Oliveira et al., (2006) e Arim; Rodrigues; Almeida (2012).

Pode-se observar também na Tabela 4.6 que o aumento na velocidade do ar (ensaio 6 e 8) promoveu um aumento na difusividade efetiva para uma mesma altura de bandeja e tempo de secagem. Isso é explicado pela maior força motriz na maior velocidade do ar, fato que facilita a difusão da fase líquida. Analisando o tempo de secagem (ensaio 4 e 8), mantendo as outras condições constantes, percebe-se que com a diminuição do tempo de secagem a difusividade efetiva manteve-se praticamente constante. Este comportamento pode ser explicado pela sobreposição das curvas que foram apresentadas na Figura 4.8. Ainda observando-se a Tabela 4.6, verificou-se que a altura da bandeja (ensaio 7 e 8) exerceu influência no processo de secagem. Esperava-se que quanto menor altura da bandeja maior a difusividade efetiva, pois diminui-se a resistência interna ao processo. Porém, neste caso obteve-se um pequeno aumento na difusividade quando elevou-se a altura da bandeja. Este fato pode ter ocorrido devido a maior concentração de água na maior altura de bandeja, facilitando assim, a retirada da água livre. Sankat; Castaigne; Mahara (1996) em um estudo da

secagem da banana, também observou que um aumento espessura da bandeja também elevou a difusividade efetiva.

4.6 Testes de Secagem de Sementes de Azevém *in natura*

A Tabela 4.7 apresenta os resultados do teste de germinação total e suas respectivas leituras ao quinto e décimo quarto dia para as sementes *in natura* colhidas na Embrapa Pecuária Sul nos dias 22 e 29 de novembro de 2012. Nessa tabela os resultados do índice de germinação são apresentados para as sementes secas nas condições do ensaio 1 ($T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v= 1\text{ m/s}$, $A=0,5\text{ cm}$, $t= 2\text{ h}$), ensaio 3 ($T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v= 2\text{ m/s}$, $A= 0,5\text{ cm}$, $t= 2\text{ h}$) e ensaio 7 ($T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v= 2\text{ m/s}$, $A= 0,5\text{ cm}$, $t= 3\text{ h}$) do planejamento experimental feito para as sementes reumidificadas. Esses ensaios foram escolhidos em virtude de serem estes os que apresentaram as condições mais favoráveis (ensaios 3 e 7) e a condição menos favorável (ensaio 1) para a manutenção da germinação das sementes reumidificadas e secas nas condições do planejamento experimental.

Tabela 4.7 – Resultados do teste de germinação para as sementes *in natura*.

Data da colheita	Ensaio	U_i	U_{PS}	Índice de Germinação		
				5º dia	14º dia	Total
22/11/2012	3	55,51 \pm 0,02%	41,59 \pm 0,68%	0	0	0
	1	50,85 \pm 0,25%	35,51 \pm 2,63%	5	9	14
	7	50,46 \pm 0,01%	32,21 \pm 1,22%	1	0	1
29/11/2012	3	32,66 \pm 0,02%	24,26 \pm 1,10%	11	16	27
	1	32,28 \pm 0,63%	23,79 \pm 0,72%	6	18	24
	7	32,21 \pm 0,55%	21,73 \pm 0,50%	57	9	66

Fonte: autor.

Analisando-se a Tabela 4.7, percebe-se que os resultados encontrados para os testes de germinação das sementes colhidas nos dias 22 e 29 de novembro de 2012 foram baixos se comparados com os resultados encontrados para as sementes reumidificadas. Este fato pode ter ocorrido devido ao alto grau de umidade inicial (U_i) encontrado nas sementes *in natura*, o que fez com que estas sementes tivessem após o processo de secagem, nas condições dos ensaios 1, 3 e 7, um alto grau de umidade final (U_{PS}). Esse elevado U_{PS} ocasionou, visivelmente, a deteriorização das sementes mesmo antes dos testes de germinação, o que resultou nos baixos índices observados na Tabela 4.7. A explicação para o U_{PS} ser elevada

possivelmente esta relacionada ao tempo de secagem. Uma vez que as sementes *in natura* apresentavam um U_i maior que o das sementes reumidificadas, era de se esperar que seria necessário um aumento no tempo de secagem para que as sementes *in natura* atingissem os teores de U_{PS} em níveis adequados para sua comercialização (10 a 15 %). Recomenda-se então que em estudos futuros, os ensaios 1, 3 e 7 sejam testados para tempos maiores de secagem. Outro aspecto que pode ter contribuído para os baixos índices de germinação apresentados na Tabela 4.7, foi o fato de que as sementes *in natura* não passaram pelo tratamento com fungicida. Portanto, essas sementes ficaram propícias ao ataque de fungos e bactérias que se proliferem na presença de umidade.

5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões deste trabalho com respeito aos objetivos propostos na introdução para o estudo da secagem de sementes de azevém (*Lolium multiflorum*) em leito fixo com escoamento de ar paralelo.

Na caracterização física das sementes comerciais foi possível obter-se um valor do diâmetro médio de $0,625 \pm 0,29$ mm, de massa específica real de $1366 \pm 4,60$ kg/m³, de massa específica *bulk* de $280 \pm 2,83$ kg/m³, de porosidade do leito estático de $0,80 \pm 0,01$, de esfericidade de $0,17 \pm 0,01$, de umidade em base úmida de $12,56 \pm 0,00$ % e o do índice de germinação de $82,25 \pm 5,90$ %.

No estudo do processo de reumidificação pode-se concluir que o mesmo foi adequado para as sementes de azevém (*Lolium multiflorum*), visto que não deteriorou as sementes e possibilitou coloca-lás em níveis de umidade próximos aos de sementes *in natura* e que passaram pelo processo de pré-limpeza.

Para o estudo da secagem das sementes reumidificadas pode-se concluir que quase todas as condições experimentais estudadas neste trabalho possibilitaram colocar os índices de umidade final das sementes nas condições exigidas comercialmente. Através dos dados também foi possível concluir que as variáveis que exerceram maior influência sobre a resposta umidade final foram o tempo, velocidade do ar e a respectiva interação entre esses fatores.

No estudo das isotermas de desorção, pode-se concluir que a forma da isoterma na qual as sementes de azevém (*Lolium multiflorum*) seguem é a do tipo II da classificação de Brunauer. Também pode-se concluir nesse estudo, que o modelo matemático que melhor representou as isotermas na temperatura de 40 °C foi de Oswin com um coeficiente de determinação de 0,994.

Em relação a técnica experimental de secagem utilizada no desenvolvimento deste trabalho, foi possível concluir, através da boa reprodutibilidade das replicas dos ensaios 9 e 10 (curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem) que a mesma mostrou-se ser adequada. Isso validou tanto a metodologia utilizada nos experimentos quanto os instrumentos de medida usados neste trabalho.

Nas curvas da taxa de secagem, conclui-se que a cinética de secagem das sementes reumidificadas tiveram um comportamento típico com predominância do período de taxa

decrecente. Outro aspecto importante observado foi que os mecanismos de transporte de secagem foram os difusivos ou capilaridade.

Na análise do adimensional de umidade pelo tempo concluiu-se que um aumento na espessura da bandeja proporcionou uma diminuição no processo de secagem. Pode-se também concluir através destes adimensionais, que a velocidade do ar influencia no processo de secagem aumentando a força motriz do processo.

Os testes fisiológicos para as sementes e reumidificadas apresentaram bons índices de germinação em comparação com as sementes compradas no mercado local. A melhor reposta foi obtida no ensaio 3 com um valor de $84,75 \pm 9,11\%$ de índice de germinação total. Já o ensaio 1 foi o que apresentou a pior resposta de índice de germinação total com valor de $63,75 \pm 3,69\%$. Através dos resultados do índice de germinação também foi possível concluir que as variáveis que exerceram maior influência sobre essa resposta foi a interação entre os fatores velocidade do ar e altura da bandeja, atingindo um efeito estimado de -2,5712.

Dos modelos matemáticos testados, o modelo de Page foi o que se mostrou mais adequado para representar os dados experimentais das sementes reumidificadas. Para os valores de difusividade efetiva calculada, a velocidade e altura da bandeja mostraram-se significativas. Já o tempo de secagem não foi significativo para a região de valores analisados. Os valores encontrados de D_{ef} ficaram compreendidos entre $2,397 \times 10^{-6}$ e $6,279 \times 10^{-6}$ m²/h.

Na análise do teste de germinação para as sementes *in natura* concluiu-se que resultados encontrados foram baixos devido a alta umidade inicial e final presente nas sementes.

Finalmente concluiu-se que o estudo da cinética de secagem das sementes de azevém que foi desenvolvido nesta dissertação de mestrado proporcionou contribuições fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o beneficiamento deste produto de elevada importância para a Região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que em trabalhos futuros sobre este tema sejam abordados os seguintes itens:

- ✓ Estudar a secagem das sementes de azevém em temperaturas maiores do que 40 °C e em tempos suficientes para as sementes atingirem o equilíbrio mássico;
- ✓ Realizar o estudo das isotermas de sorção em outros níveis de temperatura;
- ✓ Analisar outros modelos matemáticos empíricos e também modelos mecanísticos para descrever a cinética de secagem, e
- ✓ Desenvolver estudos semelhantes aos que foram efetuados neste trabalho utilizando outros tipos de secadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION OF OFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 16. ed. Washington, 1997.

AFONSO JUNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999. Disponível em: < <http://www.agriambi.com.br/revista/v3n3/349.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2012.

AGUINAGA, A. J. Q. **Caracterização de sistemas de produção de bovinos de corte na região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Tese (Doutorado) - PPGZ-UFRGS, 2009, p. 51.

AGROLINK. **Plantas forrageiras**. 2012. 2 fotografias. Disponível em: <www.agrolink.com.br>. Acesso em: 15 de nov. 2012.

ALCÂNTARA, S. R.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P. Isotermas de adsorção do pedúnculo seco do caju. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 13, n. 1, p. 81-87, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n1/v13n01a12.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2012.

ALMEIDA, F. A. C.; GOUVEIA, J. P. G; ARAÚJO, M. E. R.; SILVA, F. L. H. ALMEIDA, S. A. Comparação de modelos matemáticos do calor isostérico de dessecamento em polpa de goiaba. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 28-34, 2004.

ARIM, A. L.; RODRIGUES, L. M.; ALMEIDA, A. R. F. Caracterização e análise da semente de mamão formosa (*Carica papaya* L.) Seca em leito fixo com escoamento de ar horizontal. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 20., 2012, Joinville. **Anais eletrônicos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Disponível em: <cbecimat.com.br/resumos/trabalhos_completos/416-165.doc> . Acesso em: 10 jan. 2013.

ARNOSTI JÚNIOR, S. Desenvolvimento de um Secador Transportador do Tipo Esteira com Escoamentos Cruzados e Caracterização de Sementes de Gramíneas. In: FUMAGALLI, F. **Estudo da Transferência de Calor e Massa na Secagem das Sementes de *Brachiária brizantha***. São Carlos, SP: Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2007. p. 5-8.

BAUDET, L. M. L.; VILLELA, F. A.; CAVARIANI, C. Princípios de secagem. **Revista Seed News**, Pelotas, RS, n. 10, p. 20-27, 1999.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. Seeds: physiology of development and germination. In: EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S. T.; MORAES, D. M. Composição química de sementes de azevém em resposta ao retardamento da secagem e ao armazenamento. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 693-701, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v37n5/9539.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2012.

BIAGI, J. D.; VALENTINI, S. R. T.; QUEIROZ, D. M. Secagem de produtos agrícolas. In: CORTEZ, L. A. B.; MAGALHÃES, P. S. G. **Introdução à engenharia agrícola**. In: MARTINS, R. R. **Secagem intermitente com fluxo cruzado e altas temperaturas e sua influência na qualidade do trigo duro (*Triticum durum L.*)**. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, 1997. p. 20-21.

BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, República Tcheca, v. 65, p. 489-495, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877404000664>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

BOUNOUS, E. B. Comparação de métodos de secagem de sementes de azevém-anual (*Lolium multiflorum Lam.*). In: LUCCAFILHO, O. A.; PORTO, M. D. M.; MAIA, M. S. Fungos em sementes de azevém-anual (*Lolium multiflorum Lam.*) e seus efeitos no estabelecimento da pastagem. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 21, n. 2, p. 142-147, 1999. Disponível em: <<http://www.abrates.org.br/revista/artigos/1999/v21n2/artigo21.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2012.

BORBA, C. S.; ANDRADE, R. V. Qualidade das sementes. **Boletim Embrapa**, Sete Alagoas, MG, Circular 19, p. 5, 1993. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/57372/1/Circ-19-Qualidade-sementes.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2012.

BRASIL, M. A. R. A. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CL, 1992. p. 365.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. 6. ed. New York: Van Nostran Dreinhold, 1992. p. 450.

BRUIN, S.; LUYBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: a review of recent developments. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**. 1. ed. São Carlos: Departamento de Engenharia Química – UFCar, 1992. cap. 6.

CAMACHO, D. G.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782004000200045>. Acesso em: 12 dez. 2012.

CAMPOS, A. R. N.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P.; OLIVEIRA, L. S. C.; OLIVEIRA, M. M. Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.13, n. 6, p. 734-740, 2009.

CARAMBULA, M. **Produccion de semillas de plantas forrajeras**. 1. ed. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 1984. p. 332-335.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; VIANNA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-29452005000300025&script=sci_arttext>. Acesso em: 10 dez. 2012.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARVALHO, N. M. A secagem das sementes. In: CAMACHO, D. G.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. Piracicaba: Tese (Doutorado) – ESALQ, Universidade Federal de São Paulo, 1996. p. 85.

CHEN, C.; JAYAS, D.S. Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. In: VIEIRA, H. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas se adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, PB, v. 07, n. 1, 2007. Disponível em: <<http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/isotermasdeadsorcao.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2012.

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MARTINS, P. C. **Secagem de Cebola (*Allium cepa* L.) em Camada Delgada: Estudo da Cinética e das Características do Produto Desidratado**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Fundação Universidade de Rio Grande, 2002. p. 13-15.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Inglaterra: Oxford University Press, 1975. p. 414.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Guia de plantas para a adubação verde de inverno**. Londrina: IAPAR, 1985. p. 96.

EICHELBERGER, L. MAIA, M. S.; PESKE, S. T.; MORAES, D. M. Efeito da pré-limpeza na qualidade fisiológica de sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) submetidas ao retardamento da secagem e ao armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 22, n. 2, p. 268-278, 2000. Disponível em: <<http://www.abrates.org.br/revista/artigos/2000/v22n2/artigo36.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2012.

EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S.T; MORAES, D. M. Efeito Imediato do Retardamento da Secagem na Qualidade Fisiológica de Sementes de Azevém Anual (*Lolium multiflorum* Lam.). **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 23, n. 1, p. 219-225, 2001. Disponível em: <<http://www.abrates.org.br/revista/artigos/2001/v23n1/artigo31.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2012.

EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S.T; MORAES, D. M. Efeito do Retardamento da Secagem na Qualidade Fisiológica de Sementes de Azevém Anual. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 5, p. 643-650, 2003.

ELIAS, M. C. **Armazenamento e conservação de grãos em médias e pequenas escalas**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Pólo de Inovação Tecnológica em Alimentos da Região Sul, Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2002. p. 218.

ELLIS, R. H.; SIMON, G.; COVELL, S. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. In: EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S. T.; MORAES, D. M. Composição química de sementes de azevém em resposta ao retardamento da secagem e ao armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 693-701, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v37n5/9539.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

FELIPE, C. A. S. **Influência das Variáveis de Processo na Qualidade de Sementes de Soja Submetidas à Secagem em Leito Deslizante e Escoamentos Concorrentes**. Uberlândia: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, 1999. p. 11-15.

FERRARI FILHO, E. **Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. p. 5.

FLORES, R. A. **Avaliação e seleção de azevém anual (*Lolium multiflorum L.*)**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p.13-24. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8666/000585451.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 abr. 2012.

FONTANELI, P. R. S. Azevém anual. In: FLORES, R. A. **Avaliação e seleção de azevém anual (*Lolium multiflorum L.*)**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 13-18. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8666/000585451.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 abr. 2012.

FONSÊCA, M. G.; MAIA, M. S.; LUCCA-FILHO, O. A. Avaliação da qualidade de sementes de azevém (*Lolium multiflorum Lam.*) produzidas no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 21, n. 1, p. 101-106, 1999.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. . 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 670-675.

FUMAGALLI, F.; **Estuda da transferência de calor e massa na secagem das sementes de *Brachiária brizantha***. São Carlos: Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2007. p. 19-25.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, M. L. A secagem de sementes. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 34, n. 2, p. 606, 2004.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3. ed. México: CECSA, 1998. p. 579-619.

GERDES, L. **Introdução de uma mistura de três espécies forrageiras de inverno em pastagem irrigada de capim Aruana**. Piracicaba: Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, 2003. p. 73. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11139/tde-05012004-153828/pt-br.php>>. Acesso em: 25 out. 2012.

GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Caracterização e isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 157-165, 2002. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev42/Art428.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2012.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis L.*) durante a secagem e o armazenamento**. Viçosa: Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, 2008. p. 199. Disponível em: <http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/12/TDE-2008-04-24T143526Z-1137/Publico/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 25 out. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário Estatístico do Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro, v. 56, 1996.

IGLESIAS, H.A; CHIRIFE J. Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food components. In: VIEIRA, H. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, PB, v. 07, n. 1, p. 11-15, 2007. Disponível em: <<http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/isotermasdeadsorcao.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2012.

JÚNIOR, P. C. A.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v3n3/349.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2012.

KREYGER, J. Practical Observations on the Drying of Seed. **Journal Seed Science and Technology**, Cambridge, UK, p. 645-670, 1973.

KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isotermas de dessecamento de cogumelo *in natura* e desidratado osmoticamente. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 25, n. 4, p. 828-834, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cta/v25n4/27659.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2012.

LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. In: PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 1, p. 83-94, 2008. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev101/Art1010.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2012.

LYNDERSEN, A. L. Mass transfer in engineering practice. In: MARTINS, P. C. **Secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada: Estudo da cinética e das características do produto desidratado**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Fundação Universidade de Rio Grande, 2002. p. 21-25.

LUCCA FILHO, O. A.; PORTO, M. D. M.; MAIA, M. S. Fungos em sementes de azevém-anual (*Lolium multiflorum* Lam.) e seus efeitos no estabelecimento da pastagem. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 21, n. 2, p. 142-147, 1999. Disponível em: <<http://www.abrates.org.br/revista/artigos/1999/v21n2/artigo21.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2012.

MACEDO, G. A. R.; MARQUES NETO, J. E.; BATISTA, J. S. Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 9, n. 3, p. 29-37, 1987. Disponível em: <www.abrates.org.br/revista/artigos/1987/v9n3/artigo03.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2012.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. In: RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000600010>. Acesso em: 19 abr. 2012.

MAIA, M. S. **Secagem de sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum*) com ar ambiente forçado**. Pelotas: Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pelotas, 1995. p.108.

MAIA, M. S. **Avanços em tecnologia de sementes de espécies forrageiras. Encontro sobre avanços em tecnologia de sementes**. Pelotas: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1992. p. 55-62.

MARCOS FILHO, J.; CÍCERO, S. M.; SILVA, W. R. Avaliação da qualidade das sementes. In: PERES, W. B. **Incrustamento em sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.): características físicas e qualidade fisiológica**. Pelotas: Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pelotas, 2010. p. 16.

MARCOS FILHO J.; TOLEDO, F. F. Manual de Sementes: Tecnologia da Produção. In: FUMAGALLI, F.; **Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de *Brachiária brizantha***. São Carlos: Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2007. p. 15-17.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.11, n. 3, p. 301-306, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n3/a09v11n3.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2012.

MARTINELLI, R. R. **Efeitos do retardamento na secagem da semente de sorgo sacarino sobre sua qualidade fisiológica**. Pelotas: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1985. p. 60.

MARTINS, P. C. **Secagem de cebola (*Allium cepa L.*) em camada delgada: estudo da cinética e das características do produto desidratado**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2002, p. 13-15.

McCORMICK, P. Y. Solids drying fundamentals. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**. 1. ed. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1992. cap. 6.

McCORMICK, P. Y. Solids drying fundamentals. In: OLIVEIRA, E.G. **Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2006. p. 23-25.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília, 2009.

MORAES, Y. J. B. **Forrageiras: conceito, formação e manejo**. Guaíba: Editora Agropecuária, 1995. p. 215.

MOREIRA, M. F. P. **Secagem de Gel Agar**. São Carlos: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2000. p. 8-11. Disponível em: <www.bdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde_arquivos/10/TDE-2004-09-22T13:26:51Z-214/Publico/DissMFPM.pdf>. Acesso em: 25 out. 2012.

MOTA, F. S.; BERNY, Z. B.; MOTA, J. F. A. S. Índice climático de crescimento de pastagens naturais no Rio Grande do Sul. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 4, p. 453-472, 1981.

MOTTA, W. A. **Adaptação do método contínuo de secagem para as sementes de arroz**. Pelotas: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1997. p. 58.

MORAES, M.; ROSA, G. S.; PINTO, L. A. A. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple Fuji and garlic. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, p. 1824-1831, 2008.

MOREY, V. W. F.; MERONUCK, R. A.; LANG, J. P. Relationship between equilibrium relative humidity and deterioration of shelled corn. **Journal Transactions of ASAE**, Asia, v. 38, n. 4, p. 1139-1145, 1995.

MORTOLA, V. B.; MEILI, L.; PINTO, L. A. A. Determinação das isoterms de equilíbrio para cebola, gelatina e farinha de pescado: análise dos modelos de GAB, BET e Henderson. **Revista Vetor**, Rio Grande, RS, v. 13, n. 2, p. 79-91, 2003.

MULET, A.; GARCIA-PASCUAL, P.; SANJÚAN, N.; GARCIA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric heat of morel. **Journal of Food Engineering**, Valencia, Spain, n. 53, p. 75-81, 2002.

OHLSON, O. C.; SOUZA, C. R.; PANOBIANCO, M. Levantamento da qualidade de sementes de azevém comercializadas no estado do Paraná. **Informativo Abrates**, Curitiba, PR, v. 18, 2008, n. 1, p. 18-22. Disponível em: <www.abrates.org.br/portal/images/stories/informativos/v18n123/artigo02.pdf>. Acesso em: 21 out. 2012.

OLIVEIRA, J. C. P.; MORAES, C. O. C. Cadeia forrageira para a região da campanha. In: **Cadeias forrageiras regionais**. Porto Alegre: Caramuru, 1995. p. 203.

OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; DANTAS, J. P.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. Isoterma de dessecção da casca do maracujá (*Passiflora edulis Sims*): determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 36, n. 5, p. 1624-1629, 2006.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P. D.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 26, n. 1, p.181-189, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30109.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2013.

PARK, K. J.; Nogueira, R. I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. In: PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 1, p. 83-94, 2008. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev101/Art1010.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 1, p. 83-94, 2008. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev101/Art1010.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*pyrus* sp.) em fatias. **Revista Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, K. J.; TUBONI, C. T.; OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 1, p. 71-86, 2004. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev61/Art619.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2013.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. p. 1228-1237.

PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: TORRES, M. A. P. **Desempenho de diferentes métodos de secagem e seus efeitos sobre a qualidade fisiológica de sementes de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 15-18. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11858/000618599.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

PEZZUTTI, A.; CRAPISTE, G. H. Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic. In: OLIVEIRA, E. G., ROSA, G. S., MORAES, M. A., PINTO, L. A. A. Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis* utilizing perpendicular air flow. **Journal Bioresource Technology**, England, v. 100, n. 3, p. 1297-1303, 2009.

PICOLI, V. A. **Influência de diferentes níveis de hidratação na qualidade fisiológica e sanitária de sementes de azevém anual**. Pelotas: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 2005. p. 1.

POPINIGIS, F. Fisiologia da semente. In: ALMEIDA, A. R. F. **Secagem de sementes de Brachiaria brizantha em esteira fluidizada: uso de sensor virtual para a obtenção da umidade na fase sólida**. São Carlos: Pós-Doutorado - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2010. p. 6-9.

PORPINO, K. K. P. **Biossorção de ferro (ii) por casca de caranguejocides cordatus**. Paraíba: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, 2009. p. 22-24. Disponível em: <www.quimica.ufpb.br/posgrad/dissertacoes/Dissertacao_Karina_Karla.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2013.

PORTER, H. F.; SCHURR, G. A.; WELLS, D. F.; SEMRAU, T. K. Solids drying and gas solid. In: MARTINS, P. C. **Secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada: estudo da cinética e das características do produto desidratado**. Rio grande: Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2002. p. 12-15.

ROBERTS, E. H. Physiology of ageing and its application to drying and storage. **Journal Seed Science and Technology**, Cambridge, UK, v. 9, p. 359-372, 1981.

ROSO, C.; RESTLE, J. Aveia preta, triticale e centeio em mistura com azevém. 2. produtividade animal e retorno econômico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Brasília, v. 29, n. 1, p. 85-93, 2000. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/rbz/v29n1/5735.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2013.

ROY, S.K., ROLSTON, M.P., ROWARTH, J. S. Reygrass seed yield loss to undersised. In: ANNUAL CONFERENCE AGRONOMY SOCIETY OF NEW ZEALAND. **Proceedings Couterbury**. New Zealand, p. 95-98, 1994.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F.; MAHARA, J. R. The drying behavior of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International Journal of Food Science**, Valencia, Spain, v. 31, n. 2, p. 123-135, 1996.

SAMANIEGO-ESGUERRA, C.M.; BOAG, I.F.; ROBERTSON, G.L. Comparison of regression methods for fitting the Gab model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables. In: VIEIRA, H. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas se adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**,

Campina Grande, PB, v. 7, n. 1, 2007. Disponível em: <<http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/isotermasdeadsorcao.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2012.

SALOMONI *et al.* In: POLÍ, C. H. E. C.; CARVALHO, P. C. F.; MORAES, C. O. C.; GONZAGA, S. S. **Sistema de criação de ovinos nos ambientes ecológicos do sul do Rio Grande do Sul**. Embrapa Pecuária Sul, Bagé, 2008. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Ovinos/CriacaoOvinosAmbienteEcologicosSulRioGrandeSul/>>. Acesso em: 20 agos. 2012.

SCHWANKE, R, O. **Determinação da difusividade de hidrocarbonetos aromáticos em zeólitas y por métodos cromatográficos**. Santa Catarina: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. p. 12-14. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH09/Ronald_Olavo_Schwanke_PRH09_UFSC_M.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2012.

SOUZA, F. H. D. **As sementes de espécies forrageiras tropicais no Brasil**. Campo Grande: Embrapa, Circular Técnica 4, 1980. p. 53.

STRUMILLO, C.Z.; KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. In: OLIVEIRA, E.G. **Secagem de Spirulina platensis: análise das técnicas de leite de jorro e camada delgada**. Rio Grande: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2006. p. 23-24.

SYARIEF, A. M.; MOREY, R. V.; GUSTAFSON, R. J. Thin-layer drying rate of sunflower seed. **Journal Transaction of the ASAE**, Ásia, v. 27, n. 1, p. 195-200, 1984.

TOBINAGA, S.; PINTO, L. A. A. Secagem de materiais fibrosos: músculo de peixes. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. 1. ed. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1992. cap. 6.

THOMPSON, T. L; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying-A new model. **Journal Transaction of the ASAE**, Ásia, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

TORRES, M. A. P. **Desempenho de diferentes métodos de secagem e seus efeitos sobre a qualidade fisiológica de sementes de sorgo granífero (*Sorghum bicolor L. Moench*)**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 14-17. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11858/000618599.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 fev. 2012.

VALLE, I. C. *Efeitos do retardamento de secagem de sementes de arroz Blue belle (Oryza sativa L.) sobre sua qualidade fisiológica*. In: EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S. T.; MORAES, D. M. **Efeito imediato do retardamento da secagem na qualidade fisiológica de sementes de azevém-anual (*Lolium multiflorum Lam.*)**. Revista Brasileira de Sementes, Londrina, PR, v. 23, n. 1, p. 219-225, 2001. Disponível em: <<http://www.abrates.org.br/revista/artigos/2001/v23n1/artigo31.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2012.

VIDAL, D.; FITO, P.; GRAS, M. L.; GIMENO, V. Estudio de la actividad del agua de dátiles españoles tipo candil. **Journal of Food Science**, Valencia, Spain, v. 2, p. 107-112, 2003.

APÊNDICE A

Figura A1 – Resultados encontrados para a **Arzol** através da picnometria gasosa.

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapyc 1200e V4.01
Analysis Report

Fri Mar 22 10:18:25 2013
User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: AZEVEM
Weight: 12.7247 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 80.7206 cc
V Cell: 58.2468 cc
Analysis Temperature: 17.7 C
Target Pressure: 19.0 psig
Type of gas used: DryHelium
Equilibration Time: Auto
Flow Purge: 1.0 min.
Maximum Runs: 10
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

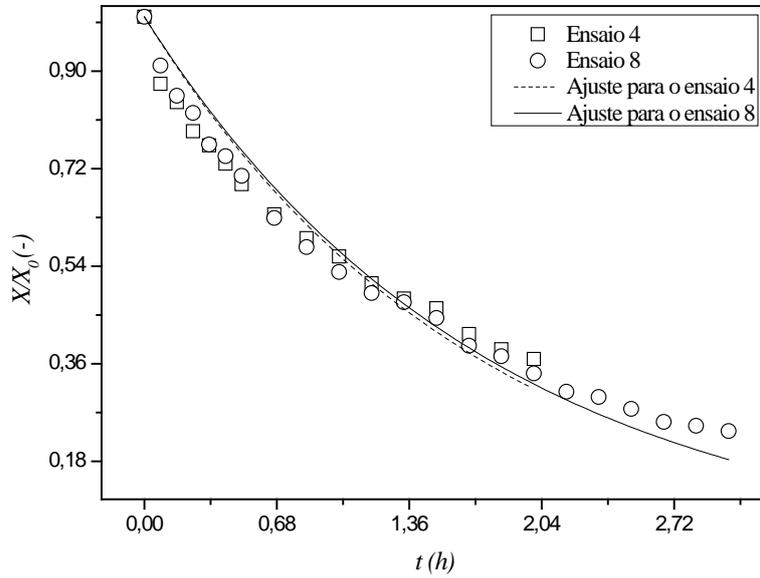
Deviation Achieved: 0.2306 %
Average Volume: 9.3496 cc
Volume Std. Dev.: 0.0233 cc
Average Density: 1.3610 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0034 g/cc
Coefficient of Variation: 0.2488 %

Run Data		
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	9.2417	1.3769
2	9.3031	1.3678
3	9.3307	1.3638
4	9.3111	1.3666
5	9.3583	1.3597
6	9.3003	1.3682
7	9.3292	1.3640
8	9.3282	1.3641
9	9.3387	1.3626
10	9.3820	1.3563

Fonte: autor.

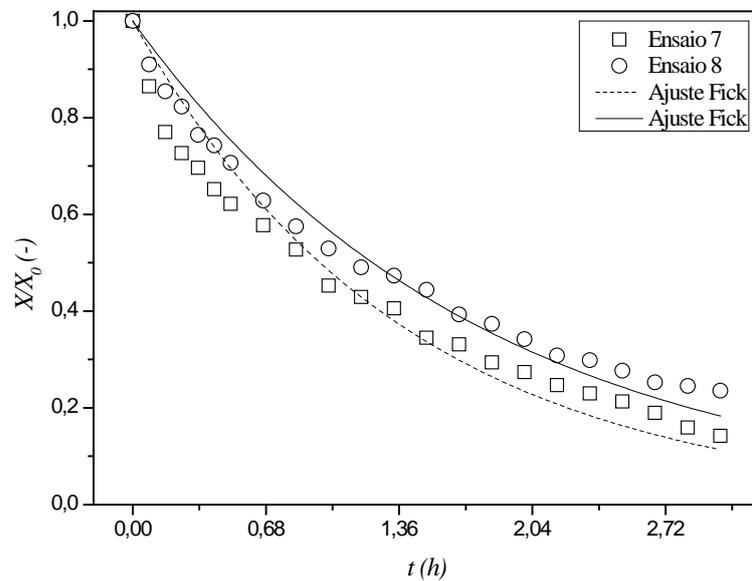
APÊNDICE B

Figura B1 – Ajuste para os ensaios 4 e 8 no modelo Fick .



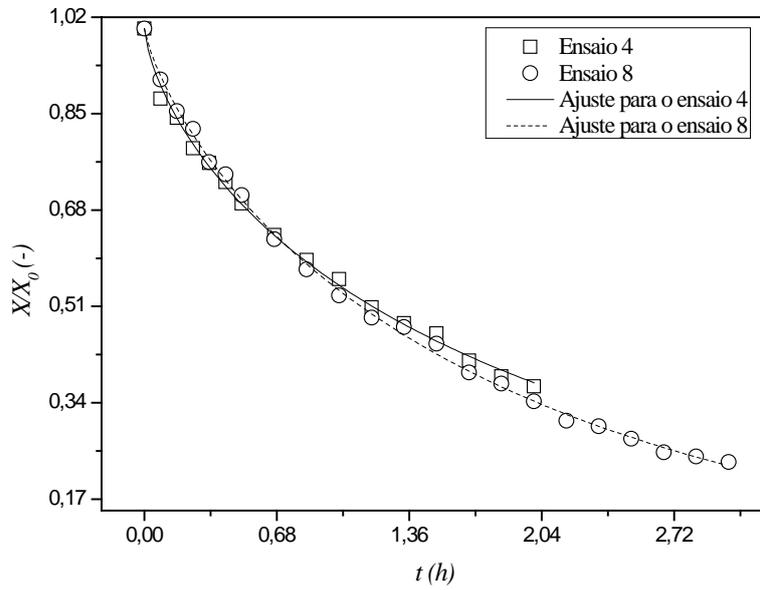
Fonte: autor.

Figura B2 – Ajuste para os ensaios 7 e 8 no modelo Fick.



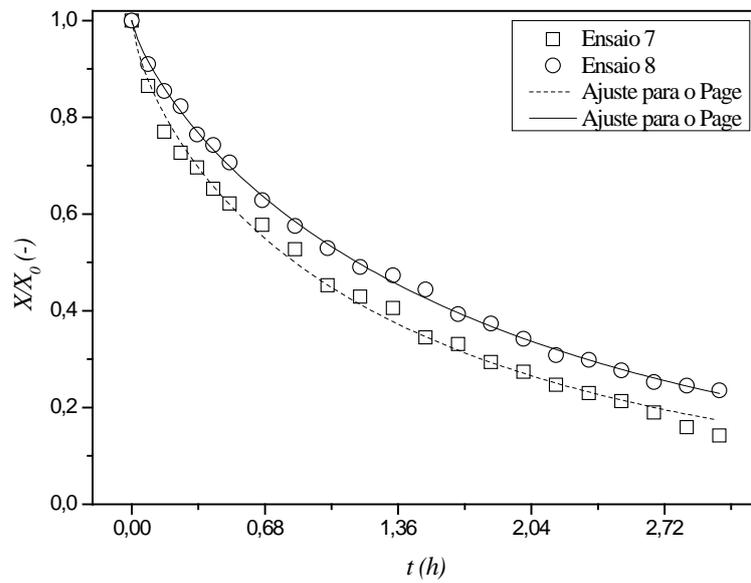
Fonte: autor.

Figura B3 – Ajuste para os ensaios 4 e 8 no modelo Page.



Fonte: autor.

Figura B4 – Ajuste para os ensaios 7 e 8 no modelo Page.



Fonte: autor.