



**Universidade Federal do Pampa
Programa de Pós-Graduação em Engenharias**

LUCAS CARVALHO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADILHA VACARIANA (*BROMUS
AULETICUS TRINIUS*) EM SECADOR DE LEITO FIXO**

**Bagé
2015**

LUCAS CARVALHO DE OLIVIERA

**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADILHA VACARIANA (*BROMUS
AULETICUS TRINIUS*) EM SECADOR DE LEITO FIXO**

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

Orientador: André Ricardo Felkl de Almeida

**Bagé
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

0933e	Oliveira, Lucas Carvalho de ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADILHA VACARIANA (BROMUS AULETICUS TRINIUS) EM SECADOR DE LEITO FIXO / Lucas Carvalho de Oliveira . 92 p. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2015. "Orientação: André Ricardo Felkl de Almeida Almeida". 1. Secagem. 2. Camada Delgada. 3. Forrageira. 4. Germinação. 5. Umidade. I. Título.
-------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

LUCAS CARVALHO DE OLIVEIRA

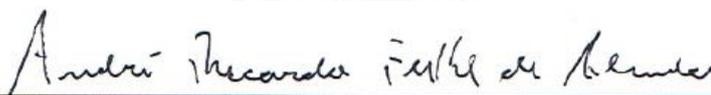
ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE CEVADILHA VACARIANA (*BROMUS AULETICUS TRINIUS*) EM SECADOR DE LEITO FIXO

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

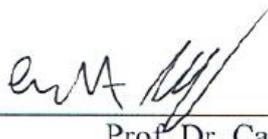
Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Dissertação defendida e aprovada Em: 24 de julho de 2015.

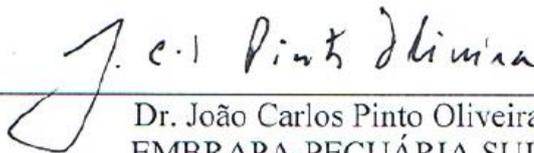
Banca examinadora:



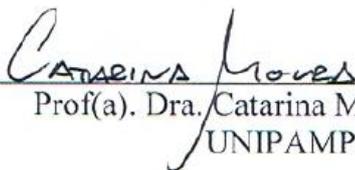
Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe
FURG-EQA



Dr. João Carlos Pinto Oliveira
EMBRAPA-PECUÁRIA SUL



Prof(a). Dra. Catarina Motta de Moura
UNIPAMPA

Dedico esta dissertação a todos que participaram dessa caminhada e principalmente a meus pais Laumar Jorge e Lúcia Carvalho, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compressão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Laumar e Lúcia. Pessoas mais importantes da minha vida. Sou eternamente grato por todo esforço, dedicação e educação que me concederam, com certeza vocês sempre serão minha motivação para seguir em frente.

Aos demais familiares que sempre estiveram me apoiando e torcendo por mim. Em especial minhas vós Irene e Laura, minha dinda Tânia e minhas primas Débora e Cláudia.

A Minha namorada Camila pelo carinho, paciência e companheirismo, em todas as horas, mas principalmente nos momentos de dificuldades. Também por ter me ajudado no meu amadurecimento pessoal e profissional.

Um agradecimento especial ao meu querido Mestre e Amigo professor André por toda confiança depositada em mim na elaboração desta dissertação. Agradeço também pelo conhecimento que me proporcionou ao longo desses anos, mas principalmente pela parceria, conselhos e puxões de orelha na hora do cafezinho e chimarrão. O senhor pode ter certeza que o meu aprendizado e dedicação foi inspirado no exemplo de pai, amigo, professor e ser humano que és. Um exemplo a ser seguido. *Obrigado MEU MESTRE.*

Aos laboratoristas e técnicos (Anderson, Aline, Vanessa, Cibele e Ricardo) pelo companheirismo e ajudas disponibilizadas no desenvolvimento das práticas.

Aos meus amigos de viagem (Artur, Valesca, Akel, Laura, Tamiris), companheiros de todas as quintas-feiras por quase um ano de idas e vindas de Alegrete.

Aos meus companheiros de apartamento (Lucas, Franco e Jéferson) essenciais nos momentos de descontração.

Ao pessoal do futebol em especial os Mineiros, Alemão e meu grande amigo Almeida, fundamental nos momentos de conversa e apoio. Meu parceiro de mestrado e amigo Reginaldo.

Aos professores Estevã, Valéria, Marcílio, Gabriela e Eliz por terem sempre me encorajado e acreditado no meu potencial na vida acadêmica.

A professora Catarina pela ajuda e conhecimento atribuído para o desenvolvimento dessa dissertação. Ao Pesquisador João Carlos pela amizade, por possibilitar esta parceria e principalmente pelas sugestões contribuídas que foram determinantes para o trabalho.

A todos que colaboraram das mais diversas formas para que eu chegasse ao final desta jornada.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Por fim a Deus, por ter me proporcionado essa vida cheia de oportunidades e obstáculos a serem vencidos.

“Mesmo quando tudo pede um pouco mais de calma
Até quando o corpo pede um pouco mais de alma
A vida não para...
Mesmo quando tudo pede um pouco mais de calma
Até quando o corpo pede um pouco mais de alma
Eu sei, a vida não para.” – Trecho da música
Paciência, Lenine e Dudu Falcão

“Foi legal estar onde eu estava, instante de vida
que vale por si só...toda felicidade é
perfeitamente inútil, já que tudo é útil para ela,
senão não tem razão ser...” – Trecho da palestra
Confiança para liderar novos desafios, Profº
Clovis de Barros Filho

RESUMO

A estação de clima frio que ocorre no Sul do Brasil causa uma dormência fisiológica nas plantas que vegetam estes campos, paralisando o crescimento e o desenvolvimento que afeta diretamente a pecuária. A inserção de espécies forrageiras de estação fria vem determinando uma grande demanda por sementes de qualidade. Entre estas sementes, pode ser citada a espécie *Bromus auleticus* Trinius, que é uma gramínea, também conhecida popularmente como cevadilha vacariana, considerada uma espécie nativa, perene de hábito cespitoso e com crescimento hibernal. Com a procura pela obtenção de semente de melhor qualidade, a secagem artificial pode ser uma etapa crucial para contribuir no processo de germinação, uma vez que a tecnologia mais empregada atualmente apresenta dificuldades que vão desde a fase de produção no campo, onde as sementes são colhidas precocemente, até seu beneficiamento, pois a secagem natural depende de condições climáticas e muitas vezes apresentam perdas fisiológicas no produto final. A secagem artificial torna-se de suma importância na tecnologia de beneficiamento de sementes, pois permite a redução do teor de água em níveis adequados para armazenamento e comercialização. Em face disso, o presente trabalho teve como objetivo principal realizar um estudo sobre o processo de secagem de sementes de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus*) em um secador de leito fixo com fluxo de ar paralelo. Para alcançar este objetivo, o trabalho foi dividido nas etapas de caracterização física e fisiológica das sementes quanto ao diâmetro de partícula, esfericidade, massa específica real, massa específica *bulk*, porosidade e germinação; observação das isotermas de dessecamento para as temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem das sementes *in natura*; análise do processo de secagem das sementes *in natura* em condições pré-estabelecidas; verificar estatisticamente, a partir de um planejamento experimental fatorial 2³ com réplica no ponto central os ensaios de secagem, bem como suas influências nos índices de germinação e umidade final das sementes; avaliação do processo de reumidificação para as sementes que passaram pela operação de secagem natural; estudo das isotermas de dessecamento das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas, e análise do processo de secagem das sementes reumidificadas. Os dados experimentais obtidos permitiram uma análise física, fisiológica e físico-química mais detalhada das sementes de cevadilha vacariana, uma vez que não há informações na literatura para este tipo de semente. Os resultados do estudo de secagem ficaram na faixa de 4 a 9 % em relação a umidade final em base úmida. No que se refere a germinação os valores encontrados ficaram na ordem de 23 a 58 %. Para estas duas respostas a temperatura foi a variável de

maior influência. O estudo de reumidificação seguido de secagem mostrou ser eficiente, uma vez que permitiu elevar a germinação das sementes de cevadilha vacariana para ordem de 84,33 e 82 % referentes a melhor e pior condição obtidos pela secagem da semente *in natura*.

Palavras-chave: Secagem. Camada Delgada. Forrageira. Germinação. Umidade.

ABSTRACT

The cold weather season covering Southern Brazil causes a physiological dormancy in forage plants grow these fields paralyzing growth and development which directly affects livestock. The inclusion of the forage species of cold weather has indicated a high demand for quality seeds. Among these seeds it is possible to point out the genus *Bromus auleticus* Trinius, which is a type of grass also popularly known as “cevadilha vacariana” considered to be a native species, perennial, with a caespitose habit and wintry growth. With the demand for obtaining better quality seeds, artificial drying can be a critical step to increase the quality and germination of the seed, since the technology currently employed presents more difficulties ranging from the production phase in the field where the seeds are harvested early until its processing, once the natural drying depends on weather conditions and often presents physiological losses in the final product. The artificial drying becomes of high importance in seed production technology, because it allows the reduction of the moisture content at appropriate levels for storage and marketing. This research goal was to conduct a study on the drying process of *Bromus auleticus* in a fixed bed dryer with parallel airflow. In order to achieve this objective, the work was divided into the steps physical and physiological characterization of the seeds as the particle diameter, sphericity, real density, bulk specific mass, porosity and germination; observation of desorption isotherms for temperatures used in the drying tests of the seeds *in nature*; analysis of the natural drying process in seeds harvested directly from the field in pre-set conditions; statistically verify, from a factorial design with 2^3 rejoinder at the midpoint drying trials as well as their influence on the final germination rates and humidity of oleander seed; evaluation of a rewetting process for the seeds that have gone through natural drying operation; study of desorption isotherms of remoistured seeds, and analysis of the drying process of remoistured seeds. Experimental data obtained so far permitted a physical, physiological and detailed physical-chemical analysis of *Bromus auleticus* seeds, since there is no data in the literature for this seed. Drying study results were in the range 4-9% compared to humidity-based moisture. Regarding to the germination values it was found at around 25 to 58%. For these two responses temperature variable it was the most influential. The rewetting study followed drying proved to be efficient, since it allowed to increase germination of the seeds of cevadilha vacariana for the order 84.33 and 82% concerning the best and worst condition obtained by drying the seed *in nature*.

Keywords: Drying. Thin Layer. Forage. Germination. Moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dados referente a produção de rebanhos bovinos no mundo (em milhões de cabeças).....	5
Figura 2.2 – Principais atividades analisadas no sistema de produção de pastagens.....	6
Figura 2.3 – Matéria seca por hectare em campo natural no RS (Produção mensal).....	9
Figura 2.4 – Distribuição da espécie <i>Bromus auleticus</i> no estado do RS.....	10
Figura 2.5 – Diferença de rendimento da semente de cevadilha vacariana no 1º e 2º ano de plantação.....	11
Figura 2.6 – Curva característica para materiais orgânicos.....	15
Figura 2.7 – Classificação das isotermas proposta por Brunauer et al., (1938).....	18
Figura 2.8 – Ilustração do sistema simplificado do processo de secagem para sementes.....	19
Figura 2.9 – Esquema ilustrativo do processo de secagem.....	21
Figura 2.10 – Representação da migração de umidade no interior de um sólido.....	22
Figura 2.11 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, teor de umidade em função do tempo.....	23
Figura 2.12 – Curva de taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade.....	23
Figura 3.1 – Sementes de cevadilha vacariana (<i>Bromus auleticus</i> Trinius).....	30
Figura 3.2(a) – Fluxograma operacional para estudo das sementes de cevadilha vacariana <i>in natura</i> (1ª etapa).....	31
Figura 3.2(b) – Fluxograma operacional para estudo das sementes de cevadilha vacariana secas naturalmente (2ª etapa).....	31
Figura 3.3 – Lavoura de cevadilha vacariana referente ao lote 2013/2014 (EMBRAPA).....	32
Figura 3.4 – Escarificador elétrico de sementes.....	32
Figura 3.5 – Soprador utilizado na limpeza das sementes.....	33
Figura 3.6(a) – Dimensões referente a semente de cevadilha vacariana.....	34
Figura 3.6(b) – Esquema de um elipsoide triaxial.....	34
Figura 3.7 – Material adotado para determinação da massa específica <i>bulk</i>	36
Figura 3.8 – Equipamento utilizado para a determinação da massa específica real.....	36
Figura 3.9 – Disposição das sementes de cevadilha vacariana na caixa gerbox.....	37
Figura 3.10 – Germinadora em operação para estudo da germinação.....	37
Figura 3.11 – Recipiente empregado para a realização das isotermas de dessorção.....	39
Figura 3.12 (a) – Secador de bandeja com escoamento paralelo de ar. (1) anemômetro, (2) balança digital, (3) painel de controle, (4) resistências elétricas, e (5) soprador centrífugo.....	42

Figura 3.12(b) – Vista frontal do interior do túnel de secagem.....	42
Figura 3.13 – Distribuição das sementes no interior do banho termostatzado para estudo da reumidificação.....	44
Figura 4.1 – Frações mássicas de semente de cevadilha vacariana em função do diâmetro médio de peneira.....	48
Figura 4.2 – Isotermas de desorção da semente de cevadilha, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.....	52
Figura 4.3 – Taxa de secagem em função da umidade média para a triplicata central.....	54
Figura 4.4 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da temperatura.....	54
Figura 4.5 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da velocidade do ar.....	55
Figura 4.6 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da espessura de sólidos.....	55
Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo da Lei de Fick.....	57
Figura 4.8 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Page.....	58
Figura 4.9 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Henderson e Pabis.....	58
Figura 4.10 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Dois Termos.....	59
Figura 4.11 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Verna.....	59
Figura 4.12 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Logarítmico.....	60
Figura 4.13 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Midilli.....	60
Figura 4.14 – Diagrama de pareto para estudo da resposta umidade final.....	67
Figura 4.15 – Diagrama de pareto para estudo da resposta germinação.....	68
Figura 4.16 – Umidade em base úmida em função do tempo.....	69
Figura 4.17 – Germinação das sementes de cevadilha vacariana em função do tempo.....	70
Figura 4.18 – Isotermas das sementes de cevadilha vacariana <i>in natura</i> e reumidificada, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.....	71
Figura 4.19 – Taxa de secagem em função da umidade média para sementes <i>in natura</i> e reumidificada.....	73
Figura 4.20 – Adimensional de água livre em função do tempo, com ajustes dos dados ao modelo de Midilli.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de atividade de água para as concentrações de H ₂ SO ₄ nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.....	38
Tabela 3.2 – Codificação das variáveis e níveis para elaboração do planejamento experimental fatorial.....	40
Tabela 3.3 – Matriz do planejamento experimental fatorial usada para avaliar as variáveis envolvidas no processo de secagem.....	41
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cevadilha vacariana <i>in natura</i>	46
Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros encontrados a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, GAB, Oswin, Peleg e Henderson.....	49
Tabela 4.3 – Dados do ar de secagem para cada ensaio, obtidos a partir da carta psicométrica.....	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste e difusividades efetiva para cada condição de secagem analisada pelo modelo da Lei de Fick, Page, Henderson e Pabis, Dois Termos, Verna, Logarítmico e Midilli.....	62
Tabela 4.5 – Respostas dos ensaios de secagem da semente de cevadilha vacariana.....	66
Tabela 4.6 – Valores dos parâmetros a partir do ajuste dos dados ao modelo de GAB.....	72
Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste dos dados pelo modelo de Midilli com suas respectivas difusividade efetiva e análises estatísticas.....	75
Tabela 4.8 – Respostas da umidade final, vigor e germinação das sementes de cevadilha vacariana reumidifica e <i>in natura</i>	75

LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS

AOAC – Association of Official Analytical Chemists

BET – Brunauer, Emmett e Teller

BU – Base Úmida

CPPSUL – Centro de Pesquisa de Pecuária dos Campos Sul Brasileiros

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FB – Fibra Bruta

GAB – Guggenheim-Anderson-de Boer

ISTA – International Seeding Testing Association

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

PIB – Produto Interno Bruto

RS – Rio Grande do Sul

SC – Santa Catarina

T_{BS} – Temperatura de Bulbo Seco

T_{BU} – Temperatura de Bulbo Úmido

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

VC – Valor Cultural

LISTA DE SÍMBOLOS

$a, a_1, b, b_1, c,$ $Ct, K, k_2, k_3, n,$ n_1, n_2	Constantes	[-]
a_w	atividade da água	[-]
d_e	diâmetro equivalente	[L]
D_{ef}	difusividade efetiva	[L ² T ⁻¹]
d_p	diâmetro de partícula	[L]
d_{pi}	média das aberturas das peneiras passante e retida	[L]
d_s	diâmetro médio de Sauter	[L]
e_0	espessura de sólidos na bandeja	[L]
G	Germinação	[%]
G_{total}	média da germinação das sementes	[%]
H	área superficial exposta ao secador	[L ²]
h	Horas	[θ]
h_{band}	altura da bandeja	[L]
k	constante de secagem	[T ⁻¹]
k_1, k_0	coeficientes de secagem	[T ⁻¹]
L_s	massa de sólido seco	[M]
m	massa total de sólido	[M]
$m_{água}$	massa de água	[M]
m_{as}	massa da amostra seca	[M]
m_{au}	massa da amostra úmida	[M]
m_{eq}	massa da amostra no equilíbrio	[M]
m_i	massa retida na peneira	[M]
$m_{sólido}$	massa de sólido	[M]
N	taxa de secagem	[MT ⁻¹ L ⁻²]
Nc	taxa de secagem constante	[MT ⁻¹ L ⁻²]
NN	número de parâmetros dos modelos	[-]
nn	número de observações experimentais	[-]
P	constante de valor 1,6075	[-]
P_p	erro médio relativo	[%]
p, r, f	metade do valor do diâmetro do elipsoide	[L]
P_v	pressão de vapor da água pura	[ML ⁻¹ T ⁻²]
P_w	pressão parcial	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ss	sólido seco	[M]
R^2	coeficiente de determinação	[-]
t	Tempo	[T]
T	temperatura do ar	[θ]
T_{sec}	temperatura do ar de secagem	[θ]
t_1	tempo inicial	[T]
t_2	tempo final	[T]
UA	umidade absoluta	[MM ⁻¹]
U_{BU}	umidade base úmida	[MM ⁻¹]
$U_{inicial}$	umidade inicial	[MM ⁻¹]
UR	umidade relativa	[-]
U_{secas}	umidade final das sementes	[MM ⁻¹]

V	Volume	M^3
v	velocidade do ar	$[MT^{-1}]$
$V_{elipsoide}$	volume do elipsoide	$[L^{-3}]$
$Vigor$	Vigor	$[\%]$
X^2	chi-quadrado	$[-]$
X	umidade livre	$[MM^{-1}]$
x_l	Espessura	$[L]$
X_0	umidade no tempo t_0	$[MM^{-1}]$
X_l	umidade final no t_l	$[MM^{-1}]$
X_c	umidade crítica	$[MM^{-1}]$
X_e	umidade de equilíbrio	$[MM^{-1}]$
X_{eExp}	valor experimental	$[-]$
X_{ePre}	valor teórico	$[-]$
x_i	fração ponderal retida	$[-]$
X_m	umidade da monocamada do material	$[MM^{-1}]$
X_m	umidade média do material	$[MM^{-1}]$
X_o	umidade inicial no tempo zero	$[MM^{-1}]$
X_t	umidade média no tempo t	$[MM^{-1}]$
X_{t0}	umidade no tempo inicial	$[MM^{-1}]$
ε	Porosidade	$[-]$
Π	constante = 3,1416	$[-]$
ρ_{bulk}	massa específica <i>bulk</i>	$[ML^{-3}]$
ρ_{real}	massa específica real	$[ML^{-3}]$
ρ_s	massa específica do sólido	$[ML^{-3}]$
ϕ	Esfericidade	$[-]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Panorama Pecuário e Sementes Forrageiras no Brasil	4
2.2 Sistemas de Pastagens dos Campos Brasileiros	6
2.3 Sementes Forrageiras no RS e a Espécie <i>Bromus auleticus</i> Trinius	8
2.4 Caracterização de Sementes	12
2.4.1 Qualidade das sementes forrageiras	12
2.4.2 Umidade de equilíbrio	14
2.5 Importância da Secagem em Sementes	18
2.6 Fundamentos da Secagem	21
2.6.1 Mecanismo de migração de umidade	22
2.6.2 Cinética de secagem	23
2.6.3 Modelos de secagem em camada delgada	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Matéria-Prima e Síntese Organizacional dos Experimentos	30
3.2 Limpeza e Preparo das Sementes	32
3.3 Caracterização Física, Fisiológica e Físico-Química	33
3.3.1 Análise física das sementes	34
3.3.2 Estudo de germinação.....	37
3.3.3 Determinação das isotermas de dessorção.....	38
3.4 Planejamento Experimental Fatorial do Estudo do Processo de Secagem	40
3.5 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes em Secador de Leito Fixo.....	41
3.6 Análise do Processo de Reumidificação.....	44
3.7 Análise das Isotermas de Dessorção e do Processo de Secagem das Sementes Reumidificadas.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cevadilha Vacariana	46
4.2 Isotermas de Dessorção das sementes de Cevadilha Vacariana <i>in natura</i>	49
4.3 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Cevadilha Vacariana <i>in natura</i>	52
4.4 Avaliação do Processo de Reumidificação das Sementes de Cevadilha Vacariana.....	68
4.5 Isotermas de Dessorção das Sementes de Cevadilha Vacariana Reumidificada.....	71

4.6 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Cevadilha Vacariana Reumidificada .	73
5 CONCLUSÕES.....	77
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
GLOSSÁRIO	90
Apêndice A	91
Apêndice B	92

1 INTRODUÇÃO

As pastagens são consideradas a principal fonte de alimentos para o setor pecuário, fato comprovado por ser uma das alternativas mais baratas para alimentação dos rebanhos. Além do mais, fornecem os nutrientes necessários para o crescimento e desenvolvimento dos ruminantes conferindo-lhes enorme potencial para a produção de carne, leite e derivados em diferentes sistemas de produção animal (FARIA et al., 1997). A diversidade climática e de espécies, bem como a produtividade e qualidade dos pastos estão associados à localização geográfica em que se encontra a região Sul do Brasil, uma vez que permite usufruir tanto de espécies forrageiras tropicais e subtropicais, como também espécies de clima temperado (MORAES, 1991).

O Rio Grande do Sul (RS) apresenta uma enorme variação de ecossistemas, devido aos diferentes tipos de solo e a variação em altitude e clima, o que reflete na composição florística das diferentes comunidades vegetais (SILVEIRA et al., 2005). O Bioma Pampa ocupa aproximadamente 63 % da área total do estado do RS, o qual é composto, majoritariamente, por vegetações de pastagens naturais. Segundo levantamento botânico são aproximadamente 523 espécies de gramíneas e 250 espécies de leguminosas, das quais boa parte são perenes e de crescimento estival, ou seja, apresentam boa oferta de forragem em estações quentes e baixa produtividade em estações frias (SANTOS, 2012).

O clima gaúcho é conhecido pela distribuição quase que igualitária das quatro estações ao longo do ano, ou seja, estações bem definidas. Com isso há necessidade da utilização de pastagens que se desenvolvam em todos os meses do ano, principalmente durante os períodos de outono e inverno, uma vez que essas estações são conhecidas como períodos críticos de carência alimentar para os rebanhos em decorrência da baixa produção de forragem (SILVEIRA et al., 1997).

Em geral para os períodos críticos, são utilizadas espécies de crescimento hibernal, como é o caso do azevém, que se trata de uma gramínea exótica que apesar de inúmeras vantagens tem produção geralmente baixa no outono. Também são utilizadas espécies de ciclo curto, ou seja, sementes que não persistem por ressemeadura natural (requer manejo anual), como é o caso do centeio, aveia e cevada (SILVA e MORAES, 2009).

Sendo as pastagens naturais um patrimônio genético, além de contribuir para alimentação animal, é justificável a importância de espécies forrageiras que supram o vazio forrageiro e possam dar como resposta um alto nível de crescimento nos períodos de maior

carência alimentar do rebanho, podendo ser atribuída à cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius) (FREITAS, 2010). Semente essa que se trata de uma gramínea forrageira perene, nativa de ampla disseminação na América do Sul temperada e principalmente nos campos sul brasileiro, com grande capacidade de crescimento hibernal (SILVA e MORAES, 2009).

A utilização de sementes forrageiras de alta qualidade sanitária e fisiológica é de grande interesse na implantação da pastagem, uma vez que as colheitas estão associadas ao conteúdo de umidade que as sementes encontram-se na lavoura, as quais devem ser colhidas com aproximadamente 35 % de umidade em base úmida. Para obter forragem de boa qualidade, que atendam a necessidade de crescimento hibernal, ausência de latência estival e ótimo valor forrageiro, deve-se apresentar um controle desde a fase da produção de sementes no campo passando pelo ponto de maturidade fisiológica, até chegar ao beneficiamento, onde o processo de secagem apresenta-se como uma etapa limitante necessitando um controle adequado para evitar perdas fisiológicas no produto final (HAMM, 2013).

Na tecnologia de produção de sementes a secagem artificial serve como auxílio no beneficiamento das sementes por antecipar as colheitas tendo como intenção aumentar o percentual de sementes pós-colheita, perfazendo reduções nas perdas de campo devido condições climáticas indesejáveis, ataque de insetos, micro-organismos, roedores entre outros animais, além de evitar a debulha natural (FERRARI FILHO, 2011).

Entretanto, o processo de secagem, seja ele qual for, deve acontecer de forma controlada e de maneira uniforme a fim de evitar elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do material, que podem provocar a perda da qualidade do produto final. O processo de secagem a uma temperatura constante faz com que o teor de água da semente sofra uma variação contínua até que sua pressão de vapor se iguale a pressão de vapor do ar circundante. O conhecimento da relação entre a umidade da semente e a umidade relativa do ar é de fundamental importância, em função das isotermas de equilíbrio, pois ajudam a estabelecer o teor de umidade final da semente e manter o controle para assim obter um bom processo germinativo (MORAES et al., 2008).

Com o que foi exposto anteriormente e visando contribuir para melhores condições de manutenção das propriedades fisiológicas das sementes forrageiras, no que se refere ao vigor e germinação, este trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da secagem artificial nas sementes de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius), a partir de um secador de

leito fixo com escoamento de ar paralelo. Para alcançar este objetivo, foram realizadas as seguintes etapas:

1. caracterização física e fisiológica das sementes quanto ao diâmetro de partícula, esfericidade, massa específica real, massa específica *bulk*, porosidade e germinação;
2. observação das isotermas de dessorção para as temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem para sementes *in natura*;
3. estudo do processo de secagem das sementes *in natura* em condições pré estabelecidas;
4. verificar estatisticamente, a partir de um planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central os ensaios de secagem, bem como suas influências nos resultados de germinação e umidade final das semente de cevadilha vacariana;
5. avaliação do processo de reumidificação para as sementes que passaram pela operação de secagem natural;
6. estudo das isotermas de dessorção das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas; e
7. análise do processo de secagem das sementes reumidificadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica enfoca inicialmente o panorama pecuário e de sementes forrageiras no Brasil. Depois passa sucintamente para o sistema de pastagens nos campos brasileiros e relata sobre as principais características das sementes de *Bromus auleticus* Trinius no Rio Grande do Sul. Posteriormente enfatiza sobre a qualidade das sementes e umidade de equilíbrio, além de abordar a importância da secagem em sementes. Finaliza agregando informações necessárias sobre o fundamento de secagem, cinética de secagem, bem como modelos de secagem em camada delgada.

2.1 Panorama Pecuário e Sementes Forrageiras no Brasil

Há aproximadamente quarenta anos dava-se início a utilização consciente de sementes forrageiras para formação de pastagens, que tinha como objetivo a disseminação vegetativa. A década de setenta foi marcada como os primeiros anos do uso de sementes por meio de incentivos e campanhas realizadas por instituições governamentais e privadas. Atualmente, este perfil apresenta-se bastante modificado, pois tem ocorrido uma rápida evolução na organização de sementes em alguns estados do Brasil. O aparecimento, no mercado, de novas cultivares de gramíneas e de leguminosas, lançadas pela pesquisa, deu um estímulo à produção de sementes de forrageiras (NERY et al., 2012).

As características para produção, distribuição e comercialização de sementes forrageiras no Brasil estão diretamente associadas às atividades exercidas na pecuária. Para o entendimento do panorama de sementes no país, na tentativa de uma singela compreensão, deve-se iniciar pelo conhecimento dos aspectos básicos do sistema pecuário (SOUZA, 1980).

A bovinocultura de corte e leite no Brasil engloba aproximadamente 225 milhões de hectares e um rebanho na ordem de 210 milhões de cabeças, distribuídos em mais de 2,7 milhões de propriedades, considerada uma das cadeias produtivas mais extensas e complexas, envolvendo múltiplos fatores (NERY et al., 2012). Atualmente, o Brasil possui o maior rebanho comercial do mundo, sendo o segundo maior produtor mundial de carne ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América, de acordo com Minerva Foods, conforme mostra a Figura 2.1, detendo desde 2003 a liderança de exportador mundial, o que representa mais de 8 % do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (LIMA et al., 2006).

Figura 2.1 – Dados referente a produção de rebanhos bovinos no mundo (em milhões de cabeças).

País	2009	2010	2011	2012	2013 ⁽¹⁾
Estados Unidos	11.891	12.046	11.988	11.855	11.386
Brasil	8.935	9.115	9.030	9.307	9.500
União Europeia	7.913	8.048	8.057	7.765	7.735
China	5.764	5.600	5.550	5.540	5.590
Índia ⁽²⁾	2.514	2.842	3.244	3.460	3.800
Argentina	3.380	2.620	2.530	2.620	2.800
Austrália	2.106	2.129	2.129	2.152	2.210
México	1.705	1.745	1.804	1.820	1.800
Pasquitào	1.441	1.470	1.435	1.400	1.400
Rússia	1.460	1.435	1.360	1.380	1.390
Canadá	1.252	1.273	1.154	1.075	1.000
Outros	8.819	8.980	8.777	8.883	8.916
Total	57.180	57.303	57.058	57.257	57.527

(1) Estimativa

(2) Rebanho não-comercial

Fonte: Minerva Foods, 2014.

Cabe frisar que o sistema pecuário de produção fundamenta-se quase que exclusivamente na utilização de pastagens como o principal recurso alimentar, onde as atividades são caracterizadas por fases distintas que também podem ser consorciadas:

- ✓ Fase de cria – composta pelo rebanho de fêmeas em reprodução, podendo estar incluída a recria de fêmeas para reposição, para crescimento do rebanho e para venda, os machos são vendidos imediatamente após desmama. Além dos machos desmamados, são comercializados bezerras desmamadas, novilhas, vacas e touros;
- ✓ Fase de cria e recria – difere da anterior pelo fato de os machos (terneiros) serem retidos até 15 a 18 meses de idade, quando então são comercializados, enquanto na fase anterior já são comercializados geralmente com 7 a 9 meses de idade;
- ✓ Cria, recria e engorda – considerada como atividade de ciclo completo, assemelha-se às anteriores, porém os machos são vendidos como bois gordos para abate, com idade de 15 a 42 meses, dependendo do sistema de produção em uso;
- ✓ Recria e Engorda – essa atividade tem início com o bezerro desmamado e termina com o boi gordo; e

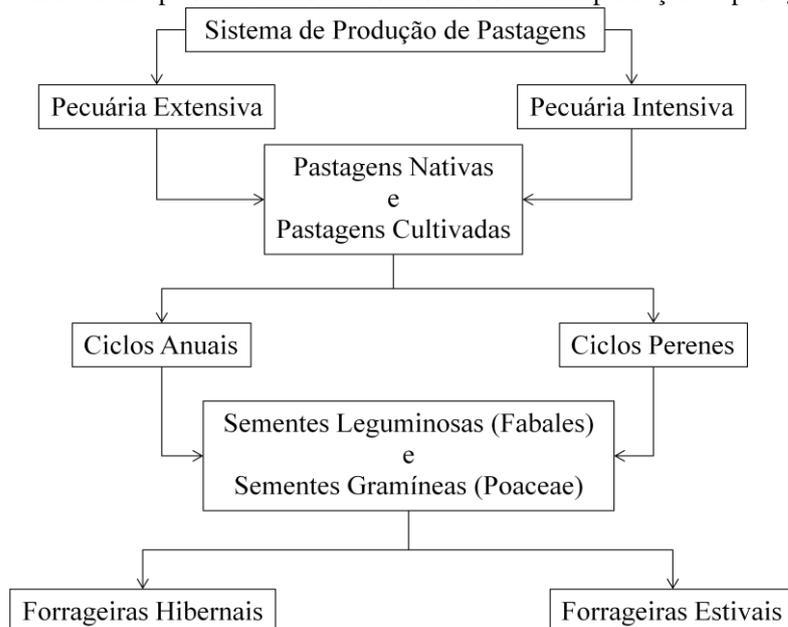
✓ Engorda – conhecida também como fase de terminação, pode ser utilizada como uma forma isolada, sendo muito utilizada em regiões de boas pastagens, o qual aproveita a grande oferta de boi magro (24 a 36 meses de idade) da época (CEZAR et al., 2005).

Assim como na produtividade pecuária, a produção de sementes forrageiras também se destaca fazendo com que o Brasil detenha atualmente posição de maior produtor desse segmento, chegando a um volume de aproximadamente 1.000 ton/ano de sementes forrageiras (NERY et al., 2012). Os sistemas de produção pecuários são condicionados pela disponibilidade de sementes de alta qualidade e em quantidade suficiente, portanto o desenvolvimento da indústria de sementes se torna de particular relevância para o Brasil, uma vez que para cada hectare são necessários cinco quilos de semente com valor cultural (VC), logo são semeados aproximadamente 5,5 milhões de hectares por ano para formação de pastagens (NERY et al., 2012).

2.2 Sistemas de Pastagens dos Campos Brasileiros

O Brasil pode ser dividido em cinco grandes regiões geográficas. A variedade de ecossistemas e a diversidade socioeconômica de cada região faz com que o sistema de pastagens apresente diferenças. Para entender de uma forma simplificada o sistema de produção a pasto, a Figura 2.2 mostra as principais atividades que podem ser analisadas para produção de pastagens.

Figura 2.2 – Principais atividades analisadas no sistema de produção de pastagens.



Fonte: Autor, 2014.

Conforme mostra a Figura 2.2 a pecuária de corte brasileira apresenta sistemas de produção a pasto, que vão desde uma pecuária extensiva, comandada por pastagens nativas e/ou cultivadas de baixa produtividade com pouco uso de insumos, até uma pecuária dita como intensiva, através pastagens de alta produtividade e suplementação alimentar a pasto (CEZAR et al., 2005).

O Brasil possui uma vasta área de pastagens, a qual basicamente é constituída por pastagens perenes, que podem ser divididas em pastagens nativas e pastagens cultivadas (CEZAR et al., 2005).

As pastagens nativas tratam-se de uma vegetação espontânea que possuem algum valor forrageiro. Surge em áreas de cultura abandonada ou terras de pastagens cultivadas. Já as pastagens cultivadas são estabelecidas como espécies exóticas, onde a vegetação original foi extinta (CYPRIANO et al., 2012). A produtividade dessas pastagens varia em função do estabelecimento e do manejo empregado (CEZAR et al., 2005).

As espécies forrageiras predominantes nas pastagens tanto cultivadas quanto nativas possuem um tempo de vida no campo, dos quais são conhecidos como ciclos, destacando-se:

- ✓ ciclos anuais – sementes que germinam, desenvolvem e reproduzem em menos de um ano, tendo como prioridade a produção em períodos ditos como críticos (áreas de campos alteradas por distúrbios naturais, como seca ou geada, ou ainda afeições causados pelo homem como a lavração, queimadas e utilização de herbicidas) (SILVEIRA et al., 2008); e
- ✓ ciclos perenes – plantas que ocupam o solo com caráter permanente, logo não são incluídas em rotação de culturas e tem como duração mínima cinco anos independente das condições climáticas. As plântulas desse ciclo apresentam geralmente um crescimento inicial mais lento, priorizando o acúmulo de reservas (SILVEIRA et al., 2008).

As pastagens, além de apresentarem um ciclo de duração como visto anteriormente, possuem também características botânicas, dos quais podem ser ditas como gramíneas ou leguminosas (TONISSI et al., 2013). Mesmo correspondendo a espécies que formam o grupo das forrageiras, gramíneas e leguminosas são plantas diferentes entre si (VALENTIM e MOREIRA, 2001). No aspecto botânico as leguminosas possuem forma e estrutura de plantas dicotiledôneas. Já as gramíneas, são monocotiledôneas e suas folhas são lineares (CORRÊA, 2002).

No entanto a diferença mais relevante se tratando de âmbito pecuário está na composição nutricional de cada espécie. Enquanto as gramíneas fornecem energia mais expressiva na forma de carboidratos, as leguminosas têm como benefício a maior oferta de proteínas. Esse fato é devido às leguminosas possuírem a capacidade de fixação de nitrogênio da atmosfera através da presença de bactérias em suas raízes. Por outro lado, as gramíneas são mais eficientes na absorção de água, menos sensíveis a temperaturas extremas e à radiação solar, logo respondem mais rapidamente à fotossíntese, obtendo assim um desenvolvimento mais acelerando e acumulando mais massa (matéria seca), o que as tornam plantas mais produtivas (ROCHA, 2014).

Como já mencionado, torna-se de suma importância a escolha adequada das espécies forrageiras, onde pode ser levado em consideração o clima, o solo e a fertilidade de cada região, sendo atualmente utilizado consorciação entre gramíneas e leguminosas que sejam compatíveis, uma vez que a combinação dessas espécies resulta em uma alimentação equilibrada em carboidrato e proteína para os ruminantes. Além disso, quando uma entra em período de menor produção a outra responde como fonte nutricional necessária (SILVEIRA et al., 2008; ROCHA, 2014).

A pecuária de corte no Brasil se desenvolve basicamente em dois ecossistemas, ao norte, ocorre a maior incidência de pastagens perenes, os campos são formados por espécies tropicais, das quais estão relacionados a estações quentes. Ao sul são predominantes pastagens de clima temperado, indicativo de estações frias (MAIXNER, 2006).

As forrageiras estivais crescem durante os meses mais quentes do ano, iniciam seus rebrotes na primavera e frutificam no período verão-outono. Com a chegada do frio as espécies anuais morrem ou no caso das perenes paralisam seu crescimento. Já a produção de forrageiras hibernais ocorre nos meses mais frios do ano, ou seja, germinam ou rebrotam no outono, se desenvolvendo durante o inverno (SANTOS et al., 2003). No caso de regiões subtropicais, clima predominante no RS, a combinação de forrageiras é uma das etapas mais importantes para intensificar a produção de pastagens (DERESZ, 1992).

2.3 Sementes Forrageiras no RS e a Espécie *Bromus auleticus* Trinius.

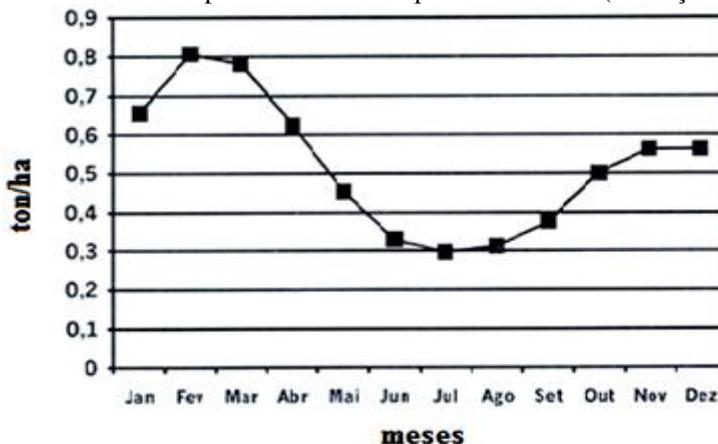
O Bioma Pampa possui como sua fisionomia predominante basicamente a presença de gramíneas, espécies vegetais de pequeno porte e algumas árvores, seu território é de aproximadamente 500.000 km², abrangendo, o Uruguai, Nordeste da Argentina, Sul do Brasil,

parte do Paraguai e Chile (BERRETA, 2001). No Brasil a área do Bioma Pampa é de aproximadamente 176.496 km², tratando-se de um importante domínio natural brasileiro, favorecendo a implantação da pecuária de corte na região em função do suporte oferecido pelas pastagens naturais para o desenvolvimento desta atividade (BEHLING et al., 2005 e IBAMA, 2004).

Mesmo com toda diversidade botânica, o RS ainda importa grande parte de sementes utilizadas para pastagens. Além disso, o mercado de sementes forrageiras muitas vezes apresenta-se de forma irregular, ignorando as Normas e Padrões de Produção de Sementes Forrageiras (KANNAN, 2014). Esse fato é decorrente da produção de sementes informal, que se desenvolve através das atividades de produção sem nenhum tipo de certificação e sem reconhecimento oficial (DOMINGUES, 2000).

São mais de 500 espécies de gramíneas no RS responsáveis pela maior contribuição na produção de biomassa nas pastagens naturais do Sul do Brasil. O sucesso das gramíneas está baseado na variabilidade e versatilidade de suas formas biológicas adaptadas às pressões impostas pelo meio ambiente, no entanto em grande parte por tratarem de espécies estivais paralisam seu crescimento com a chegada das estações de baixa temperatura, conforme ilustra a Figura 2.3 (BOLDRINI et al., 2005).

Figura 2.3 – Matéria seca por hectare em campo natural no RS (Produção mensal).



Fonte: Salomoni et al., 1994.

Como mostra a Figura 2.3, nos meses de maior frio (maio a setembro), ocorre uma baixa oferta forrageira nos campos nativos, que acaba acarretando numa defasagem alimentar para o rebanho bovino. Com isso há interesse agrônômico em utilizar espécies que atendam as perspectivas relacionadas ao clima do RS. Sendo *Bromus auleticus* Trinius uma espécie nativa, perene de clima temperado, há possibilidade dessa espécie ser considerada uma alternativa no

período de maior carência alimentar devido seu desenvolvimento ocorrer exatamente nos meses críticos para grande parte das espécies forrageiras (GARCIA, 1988).

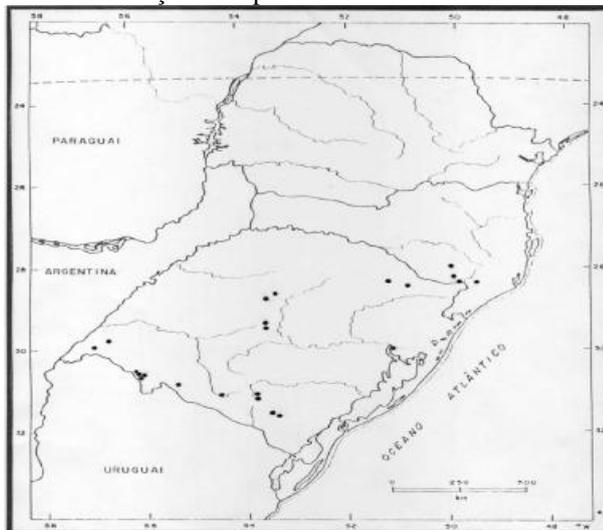
O gênero *Bromus* pertence à tribo *Festuceae* da família *Poaceae*, e se trata taxonomicamente de um gênero muito complexo com mais de 130 espécies anuais e perenes de larga distribuição geográfica, sendo várias espécies consideradas de grande valor forrageiro. Possivelmente o gênero teve origem na Eurásia e atualmente encontra-se distribuído pela Europa, Ásia, África, Austrália, América do Norte e América do Sul, sendo sua reprodução por autogamia ou fecundação cruzada (YANAKA, 2002).

No ano 1985 foram realizados estudos de várias espécies forrageiras nativas, através da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), onde foram realizadas coletas de germoplasma na região Sul do Brasil. A partir desses estudos o *Bromus auleticus* mostrou eficiência forrageira desde suas primeiras avaliações (MORAES e OLIVEIRA, 1990; OLIVEIRA e MORAES, 1993).

Os estudos realizados para avaliação e conhecimento desta espécie no Campo de Multiplicação de Sementes da Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul, na cidade de Vacaria-RS, no período de 1952-62, resultou no nome “vacariana” (SILVA e MORAES, 2009).

A colheita da cevadilha vacariana é realizada entre os meses de novembro e dezembro, e sua produção no estado do RS é referência na região da campanha, em especial nos municípios de Santana do Livramento, Uruguaiana e Bagé, conforme ilustra a Figura 2.4 (MORAES e OLIVEIRA, 1990; OLIVEIRA e MORAES, 1993; YANAKA, 2002).

Figura 2.4 – Distribuição da espécie *Bromus auleticus* no estado do RS.



Fonte: Yanaka, 2002.

A cevadilha vacariana é considerada de pouca aptidão para solos hidromórficos. Para solos arenosos, pesados e com textura argilosa apresentam comportamento satisfatório, isso apenas ressalta o potencial da espécie para uso futuro em cultivo como forrageira perene de estação fria, além do mais, possui distribuição uniforme de produção durante os períodos considerados críticos e uma boa qualidade de forragem (OLIVEIRA e MORAES, 1993; YANAKA, 2002).

Estudos realizados com o *Bromus auleticus* apontam a espécie com um crescimento inicial lento no ano de estabelecimento e uma melhora em seu desempenho a partir do segundo ano de produção. De acordo com Traverso (2001), o rendimento inicial de semente é de aproximadamente 30 kg/ha, chegando a 200 kg/ha no segundo ano, conforme ilustra a Figura 2.5, comprovando ser espécie de clima frio persistente em épocas de intenso calor.

Figura 2.5 – Diferença de rendimento da semente de cevadilha vacariana no 1º e 2º ano de plantação.



Fonte: Traverso, 2001.

Em relação a qualidade de forragem, Oliveira e Moraes (1993) avaliaram 45 acessos e obtiveram resultados positivos com elevados teores para proteína bruta, valores esses compreendidos entre 17,18 e 25,95 %. Para digestibilidade *in vitro* da matéria seca obteve-se valores entre 64,66 % e 73,60 % para os períodos de outono e inverno, respectivamente. Os autores ainda relatam que a espécie não apresentou dormência estival significativa, pois as produções de verão contribuíram 9,86 % em relação a proteína bruta e 46,19 % para digestibilidade *in vitro*.

Com isso fica evidente sua potencialidade como planta forrageira de ampla produção, boa qualidade e excelente distribuição da forragem, mesmo em solos sujeitos a adversidades. A persistência das plantas de cevadilha vacariana pode trazer inúmeros benefícios aos sistemas de produção, onde pode ser destacado uma maior estabilidade produtiva ao longo do tempo, um menor custo devido não estar incluída em rotação de culturas, uma menor dependência das condições climáticas, e vantagens ecológicas de trabalhar com uma espécie perene e nativa (SILVA e MORAES, 2009).

2.4 Caracterização de Sementes

O conhecimento da caracterização fisiológica e físico-química de uma partícula é de fundamental importância para futuras aplicações tecnológicas. Em adição, para materiais com alto teor de umidade há a necessidade de determinar a dependência das propriedades físico-químicas com o teor de umidade, a fim de prever sua variação ao longo do processo de secagem.

2.4.1 Qualidade das sementes forrageiras

A inexistência de padrões para algumas espécies, além de pouca tecnologia empregada para produção de sementes são fatores que contribuem para a qualidade da semente forrageira, caracterizando uma matéria-prima com baixa pureza física, varietal e viabilidade, com alta probabilidade de contaminação de plantas invasoras (SOUZA, 1980). Isso ocorre principalmente devido o não seguimento dos padrões recomendados pelas Normas e Padrões de Produção de Sementes, estabelecidos pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Destacam-se como as principais características que afetam a qualidade das sementes, os fatores genéticos, fisiológico, físicos e sanitários. A qualidade genética do lote está diretamente relacionada com a pureza varietal, que pode afetar a produtividade da lavoura. As propriedades fisiológicas têm sua ação determinada pelo ambiente durante a produção, a colheita, beneficiamento e armazenamento, definidas pela germinação e vigor. A pureza física está relacionada aos danos mecânicos e fissuras provenientes no tegumento, bem como a mistura com outras espécies. Os fatores sanitários se caracterizam pelos efeitos deletérios dos micro-organismos e insetos associados às sementes (LUCCA, 1985; FELIPE, 1999).

As características que indicam a qualidade da semente são complexas e dinâmicas, por isso não podem ser definidas por um único parâmetro (ROBERTS, 1974). Não existe uma regra universal estabelecida para comercialização de semente, qualquer laboratório oficial, privado ou de instituições de pesquisas pode definir suas próprias regras de análises. O importante é a padronização dentro do laboratório para diferentes lotes de sementes (POPINIGIS, 1985). Desde o ano 2000 o aumento na demanda, a exigência do mercado consumidor e a certificação, estimularam as empresas a melhorarem a qualidade das sementes (TEODORO et al., 2011).

Para análises referentes ao comércio internacional de sementes são utilizadas as regras e normas da International Seeding Testing Association (ISTA) onde são realizados Teste de Germinação, Teste do Tretrazólio, Teste de Emergência no solo e Teste de Vigor (MARCOS FILHO et al., 1987).

O teste de germinação se trata do método mais conhecido para determinar a qualidade de sementes, neste procedimento é avaliado a capacidade que uma semente tem de germinar em condições de luminosidade, temperatura e umidade ideais. É considerado como sinônimo de qualidade de semente. Infelizmente, para boa parte das forrageiras a existência de dormência e dureza confundem essa consideração na expressão da viabilidade da semente, visto que deixa sem resposta a questão sobre a viabilidade daquelas que não germinaram, não por estarem mortas, mas apenas dormentes (MARCOS FILHO e TOLEDO, 1977).

O teste do tretrazólio é utilizado para sementes forrageiras que apresentam dormência, se trata de um teste rápido que define dentro da amostra a proporção de sementes vivas ou mortas. Devido sua rapidez e praticidade pode ser utilizado para indicar qualidade de lotes de sementes que estão sendo negociados entre produtores e estabelecimentos comerciais (ROBERTS, 1974).

O teste em solo é o que mais aproxima das condições em que a plântula encontrará no campo. Se realizado com número adequado de repetições, fornecerá uma boa indicação da performance futura da semente a nível de cultivo (GARCIA et al., 1996).

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 (VIEIRA e CARVALHO, 1994; CARVALHO, 1986).

Uma das principais causas para variação da qualidade das sementes são os fatores extrínsecos, causados por interferências temporais, como é o caso da temperatura ambiente e a

umidade que as sementes encontram-se na lavoura. Geralmente, as sementes respondem à temperatura para germinarem, sendo necessária a determinação da faixa ótima de temperatura, ou seja, o intervalo de temperatura no qual ocorre a máxima germinação, em menor tempo. (DUARTE et al., 2010).

A umidade é outro fator que exerce importante influência, principalmente no período de colheita, uma vez que sementes colhidas com umidade elevada estão propensas a sofrer danos mecânicos e sanitários, e sementes colhidas em atraso correm o risco de sofrer deterioração ocasionando perdas na qualidade fisiológica devido a permanência extensiva no campo (SILVA et al., 2011).

Logo o processo de secagem de forma controlada se torna de fundamental importância para assegurar a qualidade da semente, uma vez que do ponto de vista bioquímico, as sementes mantêm uma alta taxa de respiração sob elevado grau de umidade, que em conjunto com a ação de micro-organismos, provoca elevação da temperatura. Este efeito provoca uma ação negativa afetando a semente, diminuindo a sua capacidade de armazenamento, até completa deterioração. Essa deterioração é diretamente proporcional ao grau de umidade, quanto maior o grau de umidade das sementes mais rápido será a velocidade de deterioração, então é necessário otimizar o tempo entre a colheita e o processo de secagem diminuindo assim o risco de danos nas sementes, aumentando a probabilidade de germinação (HAMM, 2013).

2.4.2 Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura e pressão, é definida 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 da umidade relativa do ar (FUMAGALLI, 2007).

Os dados experimentais de umidade de equilíbrio em função de diferentes umidades relativas a uma dada temperatura podem ser utilizados para a obtenção de curvas chamadas de isotermas de sorção ou isotermas de equilíbrio. Logo uma isoterma de equilíbrio pode ser definida como a relação entre a umidade do material e a atividade da água correspondente em uma determinada temperatura (CELESTINO, 2010).

No equilíbrio, a atividade da água (a_w) está relacionada com a umidade relativa (UR) do ambiente conforme indica a Equação 2.1.

$$a_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{UR}{100} \quad (2.1)$$

onde P_w é a pressão parcial do vapor de água no ar e P_v é a pressão de vapor da água pura na condição de saturação na mesma temperatura.

A umidade de equilíbrio (X_e) pode ser determinada através da Equação 2.2.

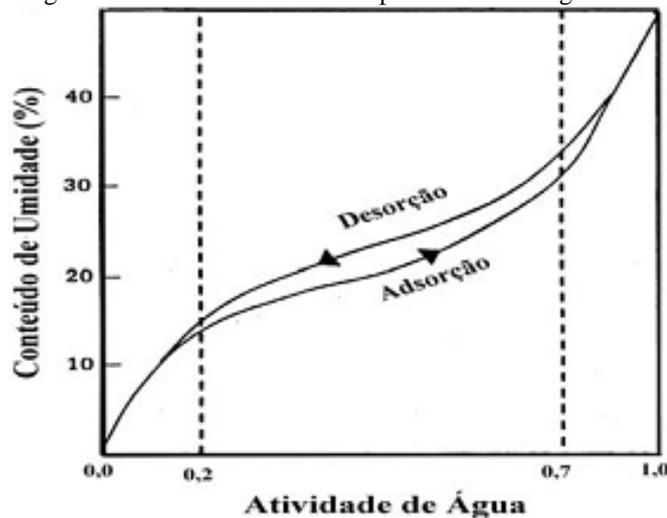
$$X_e = \frac{m_{eq} - m_{as}}{m_{as}} \quad (2.2)$$

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

A partir da relação entre a umidade do material e a atividade da água (a_w) uma isoterma de equilíbrio pode ser de adsorção ou dessorção. A isoterma de adsorção apresenta-se quando um material mais seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a atividade de água e controlando o aumento de peso devido ao ganho de água. Já a isoterma de dessorção é obtida quando um material inicialmente úmido é submetido sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo observada a perda de peso, devido à retirada de água do produto (PARK et al., 2007).

As curvas de adsorção e dessorção, obtidas pelas isotermas de equilíbrio não coincidem, e esta diferença entre as curvas de isotermas é conhecida como o fenômeno de histerese, conforme apresenta a Figura 2.6. Este fenômeno pode ocorrer devido diversos fatores, tais como, condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase (PARK et al., 2007).

Figura 2.6 – Curva característica para materiais orgânicos.



Fonte: Park et al., 2007.

Segundo Park et al., (2008) as três regiões mostradas na Figura 2.6 são classificadas como monocamada (a_w até 0,2), policamada (a_w entre 0,2 a 0,7) e condensação seguida da dissolução de materiais solúveis (a_w acima de 0,7).

Conforme Mortola et al., (2003), as isotermas de equilíbrio podem ser determinadas através dos métodos higrométrico e gravimétrico. No método higrométrico, a umidade do material é mantida constante até que o ar circundante atinja um valor constante de umidade 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. Ambos os métodos podem apresentar ainda uma variação em relação à movimentação do ar ambiente, podendo ser estático no qual o ar que circunda o material está sob condições estáticas; ou dinâmico, onde o fluido gasoso encontra-se em movimento (OLIVEIRA, 2006).

Para avaliar as isotermas de sorção vários modelos são propostos, os quais podem ser teóricos, semi-empíricos e empíricos (VILLA-VÉLEZ et al., 2012). De acordo com Park et al., (2008), existem muitas equações que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas em análise de grãos, as equações mais usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios mais utilizados são os de segunda ordem.

Segundo Moraes et al., (2008) o modelo Henderson é um dos modelos empíricos mais usados para a predição de isotermas de equilíbrio, conforme mostra Equação 2.3, no entanto só em casos muito especiais o modelo ajusta-se para determinação de material orgânico, sendo atualmente aplicado para alimentos com elevado conteúdo de proteína.

$$X_e = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{1/b} \quad (2.3)$$

onde a e b são constantes da equação.

Para Mulet et al., (2002), o modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) é uma das equações mais empregados para ajustar os resultados dos dados de produtos orgânicos, sendo de grande interesse por se tratar de um modelo teórico. Através do modelo GAB é possível representar adequadamente os dados experimentais numa atividade de água de interesse prático nos alimentos que varia entre 0,10 a 0,90, além de obter valores da umidade e do calor de sorção da monocamada. O modelo GAB é expresso pela Equação 2.4:

$$X_e = \frac{Xm.Ct.K.a_w}{(1 - K.a_w).(1 - K.a_w + Ct.K.a_w)} \quad (2.4)$$

onde X_m é a umidade na monocamada do material em kg_{H_2O}/kg_{ss} e Ct e K são constantes associadas às entalpias de sorção.

Segundo Alcântara e Daltin (2009), o modelo de Peleg é um modelo totalmente empírico que possui quatro parâmetros de ajuste. Esse modelo é expresso pela Equação 2.5:

$$X_e = k_2 \cdot a_w^{n_1} + k_3 \cdot a_w^{n_2} \quad (2.5)$$

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

De acordo com Kurozawa et al., (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 2.6:

$$X_e = \left[\frac{(X_m \cdot c \cdot a_w) \cdot [1 - (n_1 + 1) \cdot a_w^{n_1} + n_1 \cdot a_w^{n_1+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 - (1 - c) \cdot a_w - c \cdot a_w^{n_1+1}]} \right] \quad (2.6)$$

onde X_m é a umidade na monocamada do material em kg_{H_2O}/kg_{ss} e c e n_1 são constantes

A Equação 2.6 não representa a isoterma de sorção para toda a faixa de umidade relativa do ar dos alimentos, apresenta um bom ajuste aos dados provenientes de vários alimentos dentro da região 0,05 e 0,55 (VILLA-VÉLEZ et al., 2012).

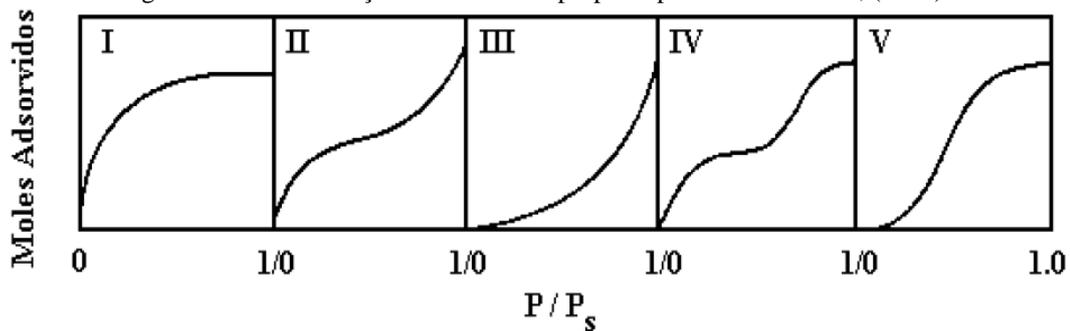
Segundo Gomes et al., (2002), o modelo de Oswin é empírico e se baseia na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Apresenta muitas vezes vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB devido à presença de somente duas constantes de fácil linearização, no entanto tem a desvantagem de suas constantes não representarem significado físico. Esse modelo é definido através da Equação 2.7:

$$X_e = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (2.7)$$

onde a e b são constantes da equação.

Segundo Porpino (2009), existem diversos tipos de isotermas, porém, a maioria destas isotermas pode ser agrupada em cinco classes diferentes seguindo a classificação proposta por Brunauer et al., (1938). Estas classes são enquadradas nos tipos de I a V, conforme mostra a Figura 2.7, onde são apresentados esboços destes tipos de isotermas.

Figura 2.7 – Classificação das isotermas proposta por Brunauer et al., (1938).



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.

As isotermas do tipo II e III resultam de adsorventes que possuem uma gama variada na dimensão dos poros. Esta variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar (SCHWANKE, 2003).

Isotermas do tipo IV são obtidas com adsorventes mesoporosos. As isotermas deste tipo exibem uma proeminente região na qual a pressão relativa varia pouco e o volume adsorvido aumenta bruscamente. Por fim, as isotermas do tipo V são aquelas em que os efeitos da atração intermolecular são influentes, ou seja, as atrações entre as moléculas adsorvidas são mais fortes que as interações sorbato-superfície (AMGARTEN, 2006).

Logo, a determinação das isotermas de equilíbrio é de suma importância, pois através das mesmas é possível determinar a umidade de equilíbrio, ou seja, a quantidade de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor de água na semente e do seu meio circundante. Determinando o teor mínimo de umidade que o material pode atingir durante o processo de secagem (FUMAGALLI, 2007).

2.5 Importância da Secagem em Sementes

Como já mencionado anteriormente há vários fatores que podem interferir na qualidade da semente durante o processo de produção. Uma das formas para que ocorra a menor influência da atividade biológica nas sementes é a antecipação da colheita, ou seja, colheitas próximas da maturidade fisiológica que tendem minimizar as perdas na lavoura através da diminuição de umidade, atuando na redução do metabolismo, contribuindo para diminuição

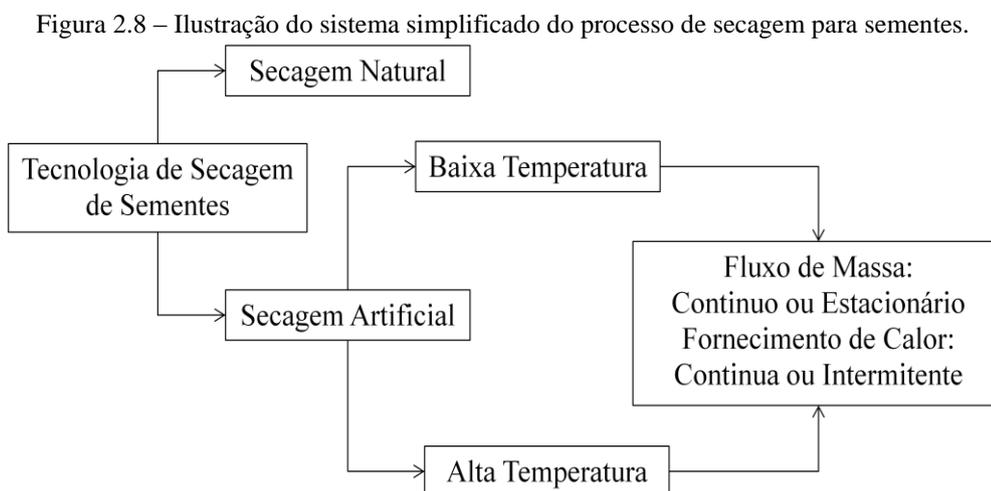
dos impactos referentes a qualidade que as sementes possam sofrer durante as etapas de beneficiamento (ZONTA et al., 2011).

Para que ocorra a redução de umidade, a secagem, que trata de uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas, se torna de suma importância, uma vez que tem a finalidade de retirar parte da água contida nas sementes, antecipando a colheita, disponibilizando a área para novos cultivos e permitir a armazenagem por períodos mais longos (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999).

No entanto essa operação deve ser desenvolvida de forma consciente e planejada, visto que, se realizada de maneira inadequada tende a causar danos irreversíveis à preservação da qualidade das sementes ao longo do seu beneficiamento (EICHELBERGER et al., 2003).

A escolha para o método mais adequado de secagem de sementes leva geralmente em consideração a quantidade de sementes que usufruirá dessa operação, sendo usualmente utilizada para escala industrial a secagem artificial, uma vez que os custos de operação estão diretamente relacionados com volume, velocidade de secagem e temperatura do ar de secagem. No entanto, dentro da tecnologia empregada para sementes, a secagem ainda pode ocorrer de forma natural (GARCIA et al., 2004).

Conforme ilustra a Figura 2.8 o sistema de secagem para sementes pode acontecer de forma natural ou artificial.



A secagem natural beneficia-se das energias solar e eólica para remover a umidade da semente, realizada na própria planta, no período compreendido entre a maturidade fisiológica e a colheita. Geralmente são empregados recursos complementares, como eiras, tabuleiros ou lonas, onde as sementes são esparramadas. Apesar de apresentar baixo custo, é um método

lento, e as sementes não devem ser expostas em camadas superiores a 6 cm, e deve ter revolvimento periódico. Além disso, esse método decorre do intensivo uso de mão de obra, uma vez que as operações geram baixo rendimento e o processo é totalmente dependente das condições climáticas disponíveis (MAIA, 1995; PESKE et al., 2012).

Na secagem artificial, a fonte de calor pode ser variável, caracterizado pelo fato do processo ser executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas, sendo o ar utilizado forçado. Tem como vantagens permitir o controle da temperatura, do fluxo do ar de secagem e do tempo de exposição das sementes ao ar aquecido, fatores fundamentais para garantir a eficiência do processo (GARCIA et al., 2004).

A secagem artificial é baseada na capacidade do ar em fornecer calor e na necessidade do aumento de temperatura do ar de secagem. A partir desse embasamento podem ser aplicados dois métodos. Secagem em baixa temperatura, utilizado o ar natural ou com aquecimento até 8 °C acima da temperatura ambiente. E secagem em alta temperatura que consiste em aquecer o ar em temperaturas superiores a 8 °C a partir da temperatura ambiente (VILLELA, 1991).

O fluxo de sementes no interior do equipamento de secagem pode ser contínuo, que implica em manter as sementes em constante movimento no interior do secador, permanecendo o tempo todo em contato com o ar aquecido. Ou o fluxo pode ser estacionário, o qual consiste em forçar o fluxo de ar através de uma camada de sementes, que permanece estática no interior do secador. A secagem estacionária ocorre em camadas, em função da formação da frente de secagem, que correspondem às regiões de intercâmbio de água entre as sementes e o ar. Na região anterior à frente de secagem, as sementes permanecem secas e a temperatura é maior e, na região posterior, têm-se sementes úmidas e baixa temperatura (GARCIA et al., 2004; PESKE et al., 2012).

O fornecimento de calor pode ser contínuo ou o processo pode ser intermitente, caracterizada pela permanência das sementes em contato com o ar aquecido por períodos curtos, intercalados com períodos sem exposição ao fluxo de ar aquecido no equipamento de secagem (GARCIA et al., 2004; PESKE et al., 2012).

Com o relatado anteriormente observa-se a importância da secagem com ar forçado, uma vez que sementes colhidas da lavoura apresentam teores de umidade inicial de 35 a 60 % e devem ser armazenadas com teores dentro da faixa ideal de 10 a 15 % de maneira a prevenir a deterioração pós-maturação fisiológica e manter sua qualidade (MACEDO et al., 1987). A

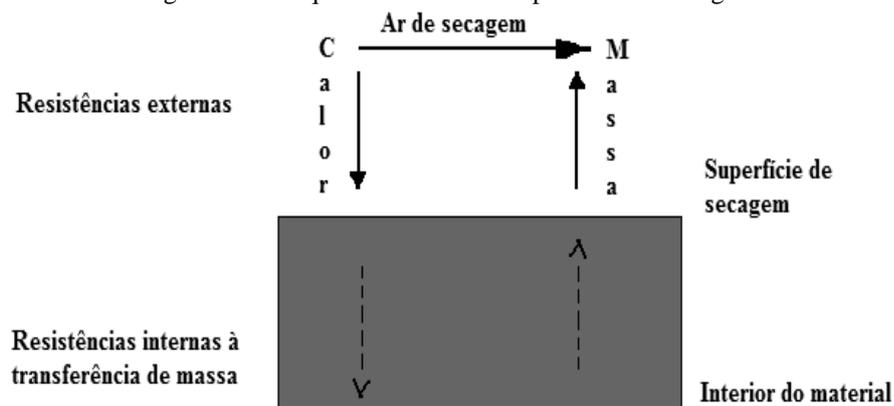
aplicação desse sistema se devidamente projetado, pode tornar-se um processo econômico e tecnicamente eficiente, uma vez que possibilita a obtenção de sementes com umidade adequada e com qualidade. Desta forma, o estudo da retirada de umidade torna-se de fundamental importância para o entendimento do processo.

2.6 Fundamentos da Secagem

A secagem, de acordo com a literatura, é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas em diversos processos usados em indústrias agrícolas, alimentícias, cerâmicas, farmacêuticas, químicas, entre outras. A secagem tem por finalidade, eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação. Portanto, a secagem é caracterizada pela evaporação de um líquido do material biológico (Mc CORMICK, 1983).

Para que ocorra a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material a ser seco. Então, quando o calor necessário para evaporar umidade de um sólido é fornecido, ocorrem transferências simultâneas de calor e de massa. Devido à complexidade deste fenômeno, a secagem é considerada uma das operações mais difíceis de serem compreendidas perante a deficiência na descrição matemática desses processos simultâneos de transferência (GEANKOPLIS, 1998). Um esquema ilustrativo mostra o processo de secagem, onde a umidade removida é a água, conforme apresenta a Figura 2.9.

Figura 2.9 – Esquema ilustrativo do processo de secagem.



Fonte: Tobinaga e Pinto, 1992.

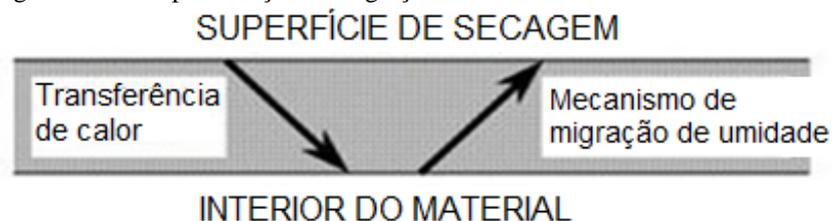
Observa-se na Figura 2.9 a representação de transferências simultâneas de calor e de massa. A existência da diferença de pressão parcial d'água entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar. Logo uma parte de calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. O material úmido está em contato com o ar insaturado e se obtém como resultado a diminuição do conteúdo de umidade deste material e conseqüentemente a umidificação deste ar (PARK et al., 2007).

A transferência de energia, que se apresenta como forma de calor, provém do ambiente para evaporar a umidade superficial do sólido. Esta transferência depende de condições externas como temperatura, pressão, umidade do ar e fluxo e direção do ar. Já a transferência de massa se dá por meio da evaporação do teor de água, em função da umidade entre o sólido e o meio.

2.6.1 Mecanismos de migração de umidade

Para que haja a evaporação de água da superfície do material, a água deve ser transportada do interior do sólido para a superfície durante a operação de secagem (BROD et al., 1999). A Figura 2.10 mostra uma representação da transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem em um sólido.

Figura 2.10 – Representação da migração de umidade no interior de um sólido.



Fonte: BROD et al., 1999.

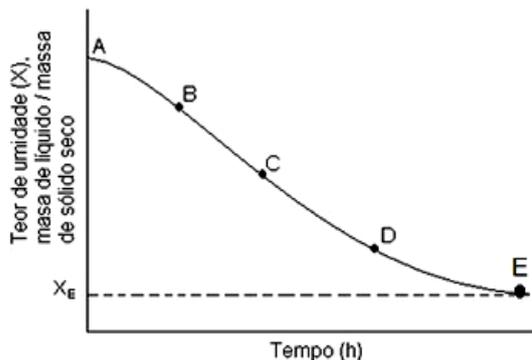
Segundo Park et al., (2007) a migração de umidade do interior do material até à superfície é analisada por meio dos mecanismos de transferência de massa, que indicam o grau de dificuldade de secagem nos materiais. A umidade pode movimentar-se por mecanismos diferentes, dependendo do material que está sendo seco. Os possíveis mecanismos de transporte de umidade mais importantes são a difusão líquida, difusão de vapor e o escoamento de líquido e vapor (BROOKER et al.,1992).

A difusão líquida ocorre devido à existência do gradiente de concentração. A difusão de vapor ocorre devido formação do gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura, e o escoamento de líquido e de vapor ocorre devido à diferença de pressão externa e de concentração, advindo da alta temperatura (GEANKOPLIS,1998; MARTINS, 2002).

2.6.2 Cinética de secagem

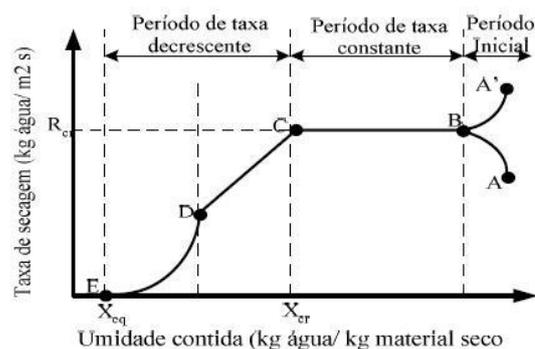
A cinética de secagem pode ser descrita como a rapidez com que o material orgânico perde umidade, sendo controlada pelas características da matriz do material e pelas variáveis temperaturas, velocidade e umidade relativa do ar. De acordo com o apresentado por McCormick (1983), nos processos de secagem, são geralmente observados dois períodos de secagem, um inicial conhecido como período de taxa constante, onde ocorre a maioria da evaporação da água livre, e um com baixa velocidade de evaporação, conhecido como período de taxa decrescente, onde o movimento da água para a superfície é controlado por forças ou resistências internas. As Figuras 2.11 e 2.12 fazem uma representação para entender os períodos que se apresentam no processo de secagem.

Figura 2.11 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, teor de umidade em função do tempo.



Fonte: Foust et al., 1982.

Figura 2.12 – Curva da taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade.



Fonte: Geankoplis, 1998.

A Figura 2.11 leva em consideração o teor de umidade livre em função do tempo, obtida pela variação da massa sólida durante a secagem, sob uma determinada condição. A Figura 2.12 relaciona a taxa de secagem (velocidade) em função da umidade média do material durante toda a secagem.

Segundo Biagi et al., (1992), os segmentos A-B e A'-B, demonstrados na Figura 2.12, representam os períodos em que o material entra em regime operacional, ou seja, a taxa de evaporação pode ser crescente devido à elevação (A-B) ou decrescente (A'-B) na temperatura do produto e da pressão de vapor de água até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa no ponto B. (GEANKOPLIS, 1998).

No segmento B-C (Figuras 2.11 e 2.12) a taxa de secagem é constante, pois as transferências de calor e de massa são equivalentes, isto é, todo o calor fornecido ao sistema é utilizado para evaporar água da superfície. A temperatura do sólido permanece constante com a temperatura de bulbo úmido do ar e a taxa de secagem apresenta-se como uma reta. A água evaporada é a água pura e a secagem ocorre sem uma influência direta no sólido, sendo assim, a secagem se dá como se fosse a evaporação de uma massa líquida. O regime de secagem continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície (GEANKOPLIS, 1998; FOUST et al., 1982).

O ponto C é caracterizado pelo período onde a taxa constante chega ao fim. Este ponto é denominado como umidade crítica (X_c), que indica que a migração interna de água para a superfície não supri mais condição de equivalência com a taxa evaporativa. A taxa evaporativa diminui e ocorre o aumento da temperatura do sólido referente a temperatura de bulbo úmido até a temperatura de secagem (FOUST et al., 1982; MARTINS, 2002). A umidade crítica está relacionada com a facilidade com que a umidade se desloca do interior do sólido até a superfície, dependendo, portanto, da estrutura porosa do sólido (SILVA, 2008).

Para o último período, segmento C-E, tem-se o período de taxa decrescente onde a transferência de massa é menor devido à menor quantidade de água presente na superfície do sólido. O fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do sólido, fazendo com que haja um aumento da temperatura do sólido até atingir a temperatura do ar de secagem. Este processo chega ao final quando o sólido atinge a umidade de equilíbrio (X_e) com o ar de secagem. Este período é o de maior importância na análise de secagem de produtos agrícolas e alimentares (OLIVEIRA et al., 2006; PARK et al., 2007).

Conforme Park et al., (2007) a taxa decrescente corresponde à migração interna de água que fixa a cinética de secagem. Os principais mecanismos que descrevem os movimentos da água são o escoamento capilar (período C-D), a difusão líquida (período D-E) e a difusão de vapor, visualizados na Figura 2.11.

A complexidade dos fenômenos de secagem faz com que haja inúmeras teorias e equações empíricas a fim de prever a cinética de secagem. O estudo da cinética de secagem se faz importante para a modelagem dos fenômenos de transferência de calor e de massa para o projeto de secadores. É através deste estudo que se estabelecem as equações da umidade em função do tempo de secagem para os diferentes períodos de taxa de secagem (KANNAN, 2014).

Como visto anteriormente, os períodos representados pela Figura 2.12, são expressos através da análise da taxa de secagem (N). A taxa de secagem é referente ao conteúdo de umidade retirado em função do tempo de secagem, e está relacionada com a movimentação da água do interior para superfície da semente (CAVARIANI, 1996). A Equação 2.8 representa a equação da taxa de secagem em coordenadas cartesianas na direção do eixo z , sentido horizontal:

$$N = -\frac{L_S}{H} \frac{dX}{dt} \quad (2.8)$$

em que, L_S é a massa total de sólido seco, H é a altura da massa de sólidos na direção z , X a umidade livre e t o tempo de secagem.

A Equação 2.8, pode ser reordenada e integrada em função do intervalo de tempo para secagem, através das seguintes condições de contorno: X_0 a $t_1 = 0$ até X_1 a $t_2 = t$, conforme mostra Equação 2.9:

$$\int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{L_S}{H} \int_{X_0}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad (2.9)$$

em que, X_0 é a umidade livre inicial no tempo zero e X_1 é a umidade livre no tempo final.

Se a secagem está dentro do período de taxa constante, de maneira que tanto X_0 como X_1 são maiores que o conteúdo de umidade crítica (X_c), então, a taxa de secagem é constante ($N = N_c$). A integral da Equação 2.8, para o período de taxa constante, é expressa na Equação 2.10.

$$t = \frac{L_S}{HN_c} (X_0 - X_1) \quad (2.10)$$

De acordo com Foust et al., (1982) em um sólido relativamente homogêneo, ocorre uma provável movimentação da umidade para a superfície em virtude da difusão molecular. A teoria difusional baseia-se na segunda Lei de Fick, a qual expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. A velocidade do movimento da umidade é então expressa na forma unidimensional, pela Equação 2.11:

$$\frac{dX}{dt} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2.11)$$

em que, D_{ef} é o coeficiente de difusão efetiva aplicável ao movimento através do sólido e z a espessura ou a distância da massa sólida.

Pela 2ª Lei de Fick, a taxa decrescente de secagem é função do tempo de secagem, espessura da massa sólida e da difusividade. Logo, a difusividade pode ser entendida como a facilidade com que a água é removida do material (OLIVEIRA et al., 2006).

A integração da Equação 2.11 requer que as condições de contorno sejam conhecidas e que as características da D_{ef} sejam especificadas. Em casos mais simples, D_{ef} pode ser considerada como uma constante, onde a secagem ocorre nas faces superior e inferior do sólido, utilizando as condições iniciais e de contorno como $X=X_0$ em $t=0$, $X=X_e$ em $z = \frac{e_0}{2}$ e $-\frac{e_0}{2}$, e admitindo que no estado inicial a umidade esteja uniformemente distribuída, a solução obtida é dada pela Equação 2.12:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left[- (2n + 1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{e_0^2} t \right] \quad (2.12)$$

em que, X_t é a umidade no tempo t , X_e é a umidade de equilíbrio, X_{t0} é a umidade no tempo zero e e_0 é a espessura de sólidos na bandeja.

Para elevados tempos de secagem, o primeiro termo da série da Equação 2.12 é o que possui significado no seu valor numérico, logo, a expressão pode ser simplificada conforme mostra a Equação 2.13 (GEANKOPLIS, 1998; OLIVEIRA et al., 2006).

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{e_0} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (2.13)$$

Para obter a constante de secagem (k) para longos períodos de exposição do material, leva-se em consideração a difusividade efetiva de umidade (D_{ef}) e a espessura de sólidos (e_0) com fluxo do ar de secagem pelos dois lados, como indica a Equação 2.14.

$$k = D_{ef} \left(\frac{\pi}{e_0} \right)^2 \quad (2.14)$$

De acordo com Duadin (1983), a Lei de Fick explica a teoria de migração de água por difusão, expressa em termos do gradiente de umidade, no qual essa lei enfoca os efeitos globais de fenômeno interno. Logo, para descrever o processo de secagem, utilizam geralmente a transferência de massa, através de modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos.

2.6.3 Modelos de secagem em camada delgada

Os inúmeros modelos existentes para estudo da secagem em camada delgada contribuem efetivamente para o conhecimento das características dos materiais. Os modelos matemáticos geralmente representam satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem.

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. Nesse caso, considera-se que o valor médio da razão de umidade, seja determinado pela solução de uma série truncada ou por integração de um conjunto de pontos discretos, distribuído na matriz do produto.

Os métodos empíricos são métodos de abordagem com base em dados experimentais e na análise adimensional. Apresentam uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem. Seus parâmetros não possuem significado físico, por isso, os mesmos não seguem os fundamentos do processo de secagem. Logo, não oferecem uma visão apurada dos processos que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (MARTINAZZO et al., 2007).

De acordo com Park et al., (2007) os modelos semi-empíricos são baseados 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 somente à superfície do material.

Conforme o tipo de material adotado durante a secagem e conforme as condições do processo de secagem, diferentes tipos de modelos se ajustam a cada situação específica. Isto se deve a movimentação da umidade no interior do material (MARTINAZZO et al., 2007).

O primeiro modelo proposto foi o de Lewis em 1921, a maioria dos modelos semi-empíricos de secagem são baseados a partir desse modelo, o qual realiza uma analogia do período de taxa de secagem com a lei de resfriamento de Newton. Esse modelo foi desenvolvido a partir de um balanço global de transferência de massa assumindo que a umidade seja uniforme em qualquer posição da amostra, variando apenas em função do tempo, e que a resistência à transferência de massa encontra-se apenas na superfície do material (COSTA, 2013).

Segundo Afonso Júnior e Corrêa, (1999) o método de Lewis sugere que durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos, a mudança da umidade deve ser proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material, quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, conforme a Equação 2.15.

$$\frac{dX}{dt} = -k_1(X - X_e) \quad (2.15)$$

em que k_1 é um coeficiente de secagem, s^{-1} .

Conforme Oliveira et al., (2006) quando há uma elevada interferência da resistência interna do material no processo de secagem, o modelo de Page desenvolvido em 1949 é o mais indicado, representado pela Equação 2.16.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \exp(-k_1 \cdot t^n) \quad (2.16)$$

em que k_1 é um coeficiente de secagem, s^{-1} e n é um parâmetro de ajuste do modelo.

De acordo com Carlesso et al., (2007) o modelo de Henderson e Pabis proposto em 1961, contribui para mostrar que os coeficientes genéricos de secagem não são apenas constantes sem significado e sim dependentes da temperatura do ar e dos mecanismos de difusão de água ou vapor d'água no interior das sementes.

O modelo de Henderson e Pabis foi um dos primeiros modelos baseados na solução da “segunda Lei de Fick”, o qual consiste em truncar o primeiro termo da série obtida a partir da solução do modelo unidirecional e transiente, transformando a expressão em uma equação análoga à lei do resfriamento de Newton, conforme mostra a Equação 2.17.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.17)$$

sendo a_1 é constantes dos modelos e k_1 é coeficiente de secagem, s^{-1} .

Segundo Dandamrongrak et al., (2002), o modelo da difusão de Dois Termos desenvolvido em 1974 foi criado na tentativa de melhorar a precisão dos modelos já existentes, especialmente no período final de secagem. O modelo da difusão de Dois Termos mostra os primeiros dois termos da solução em série da segunda Lei de Fick. Este modelo pode ser aplicado a qualquer tipo de geometria de partícula e condições contorno, considerando-se que a difusividade é constante. É um modelo recomendado para prever o comportamento dos dados de secagem de produtos agrícolas, descrito pela Equação 2.18.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + b_1 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) \quad (2.18)$$

sendo a_1 e b_1 constantes dos modelos e k_1 e k_0 são coeficientes de secagem, s^{-1} .

Conforme Martinazzo et al., (2007), o modelo de Midilli proposto em 2002, foi desenvolvido por Midilli, Kucuk e Yapar, na tentativa de encontrar um novo modelo que se adequasse a secagem em camada fina de materiais com formato definidos, tal modelo é representado pela Equação 2.19.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a. \exp(-k_1. t^n) + b. t \quad (2.19)$$

sendo a e b constantes do modelo, n é um parâmetro de ajuste e k_1 coeficiente de secagem, s^{-1} .

Conforme Ferreira et al., (2012), o modelo de Verna desenvolvido em 1985 é expresso pela Equação 2.20.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a. \exp(-k_0. t^n) + (1 - a). \exp(-k_1. t) \quad (2.20)$$

sendo a constante do modelo, n é um parâmetro de ajuste e k_0 e k_1 coeficiente de secagem, s^{-1} .

Ferreira et al., (2012), ainda cita o modelo Logarítmica desenvolvido em 1999, apresentado por Yagcioglu, Degirmencioglu e Cagatay em estudos com secagem de folhas de louro sob diferentes condições, conforme mostra a Equação 2.21.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a. \exp(-k_1. t) + c \quad (2.21)$$

sendo a e c as constantes dos modelos e k_1 é coeficiente de secagem, s^{-1} .

Devido à existência na literatura de uma variedade muito grande dessas equações, é necessário um conhecimento mais detalhado para saber quais modelos podem ser aplicados para um determinado tipo de material. Estes estudos têm o objetivo de fornecer informações sobre os modelos que são encontradas na literatura, contribuindo para os trabalhos em camada fina. Segundo, Queiroz et al., (1985), a secagem em camada fina (camada delgada) refere-se ao processo no qual o material a ser seco está inteiramente exposto ao ar que se move através dele. Para que isso ocorra a massa de sólidos para grande parte dos produtos orgânicos fica na faixa de 3 mm até 10 mm de espessura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais e equipamentos utilizados na parte experimental e a metodologia adotada para o desenvolvimento de cada análise deste trabalho.

3.1 Matéria-Prima e Síntese Organizacional dos Experimentos

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de cevadilha vacariana, da espécie *Bromus auleticus* Trinius, conforme mostra a Figura 3.1, fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/Pecuária Sul localizada na cidade de Bagé/RS. Todos os experimentos foram realizados a partir de um mesmo lote de sementes, referente ao ano 2013/2014, com o intuito de garantir um material com as mesmas características físicas e fisiológicas iniciais.

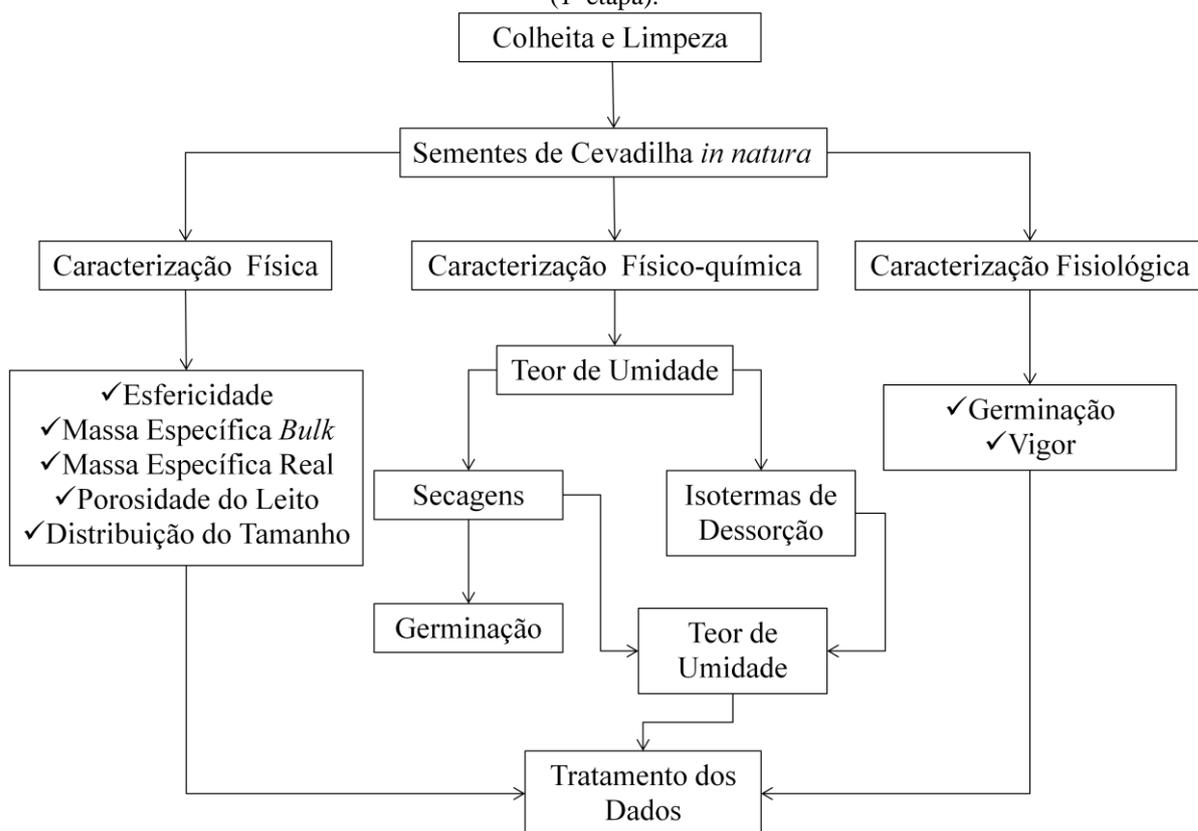
Figura 3.1 – Sementes de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius).



Fonte: Autor, 2014.

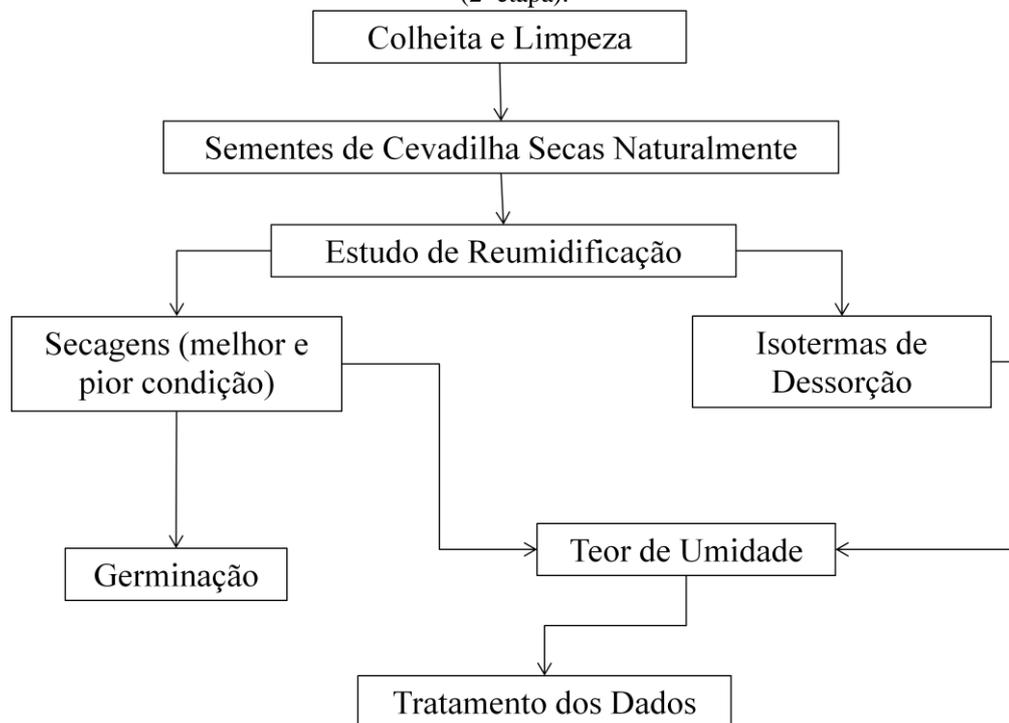
Para compreender melhor as etapas e procedimentos adotados durante a parte experimental, foi elaborado um fluxograma organizacional, conforme mostra a Figura 3.2(a) e 3.2(b) que indicam as principais etapas desenvolvidas ao longo do trabalho. A Figura 3.2(a) representa a primeira etapa do trabalho realizado com sementes de cevadilha vacariana *in natura*, ou seja, a matéria-prima colhida foi imediatamente submetida aos seus respectivos procedimentos. Na Figura 3.2(b) as sementes passaram por um processo de secagem natural na EMBRAPA/Pecuária Sul, para posteriormente dar início as atividades propostas.

Figura 3.2(a) – Fluxograma operacional para estudo das sementes de cevadilha vacariana *in natura* (1ª etapa).



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.2(b) – Fluxograma operacional para o estudo das sementes de cevadilha vacariana secas naturalmente (2ª etapa).



Fonte: Autor, 2014.

3.2 Limpeza e Preparo das Sementes

Para dar início aos procedimentos adotados nesse trabalho, as sementes passaram por um processo de limpeza, essas etapas foram desenvolvidas na EMBRAPA/Pecuária Sul. Primeiramente foi realizada colheita manual, na lavoura de multiplicação de sementes, ilustrada na Figura 3.3, cultivada na EMBRAPA/Pecuária Sul. A colheita foi aferida numa área de aproximadamente 6 m² de cevadilha vacariana realizada no dia 03 de dezembro de 2013.

Figura 3.3 – Lavoura de cevadilha vacariana referente ao lote 2013/2014 (EMBRAPA).



Fonte: Autor, 2014.

O processo de separação da semente ocorreu através de um escarificador elétrico, o qual tinha o intuito fazer incisões sobre a semente, bem como a separação da semente de outras partes da planta, conforme ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Escarificador elétrico de sementes.



Fonte: Autor, 2014.

A limpeza propriamente dita foi realizada através de um soprador do tipo South Dakota da marca Deleo, como mostra a Figura 3.5. As sementes de cevadilha foram limpas através da diferença de densidade, onde ao entrarem em contato com o ar ascendente as partículas menos densas adquiriram um movimento ascendente, ou seja, arrastadas pelo fluxo de ar, e as mais densas permaneciam em leito fixo na base do soprador.

Figura 3.5 – Soprador utilizado na limpeza das sementes.



Fonte: Autor, 2014.

Efetuada a limpeza das sementes, uma pequena porção foi acondicionada em sacos plásticos para evitar a troca gasosa e encaminhadas ao Laboratório de Fenômenos dos Transportes da Universidade Federal do Pampa, a fim de dar início às análises. O restante do lote foi submetido à secagem natural na EMBRAPA/Pecuária Sul até adquirirem condições de umidade propícia para realização dos estudos propostos.

3.3 Caracterização Física, Fisiológica e Físico-Química

As sementes de cevadilha vacariana foram caracterizadas quanto ao teor de umidade, esfericidade, distribuição do tamanho médio de partículas, massa específica *bulk*, massa específica real e porosidade do leito estático. Para a caracterização fisiológica foi realizada a determinação dos valores de germinação e a caracterização físico-química consistiu na análise das isotermas de dessorção. As técnicas e procedimentos de análises utilizados para a determinação destas propriedades são descritos nos itens que se seguem.

3.3.1 Análise física das sementes

Teor de umidade - o teor de umidade das sementes de cevadilha vacariana em base úmida (U_{BU}) foi determinado através do método gravimétrico estático recomendado pela *Association of Official Analytical Chemists* - AOAC (1997). O método consistiu em manter as amostras em uma estufa da marca Nova Ética e modelo 400-5ND, a 105 °C por 24 h. Para a pesagem das amostras utilizou-se uma balança analítica da marca SHIMADZU e modelo AUY220 com carga máxima de 220 g \pm 0,001 g.

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

$$U_{BU} = 100 \cdot \left(\frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{as}}} \right) \quad (3.1)$$

em que U_{BU} 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 3.2:

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

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

Esfericidade - a esfericidade (ϕ) das sementes de cevadilha vacariana foi calculada através de 20 medidas dos comprimentos longitudinais, transversais e circunferenciais obtidos através de ensaios de paquimetria, a partir da metodologia citada por Cremasco (2012). O paquímetro utilizado foi o paquímetro digital da marca King Tools (0–150 mm) com precisão de \pm 0,01 mm.

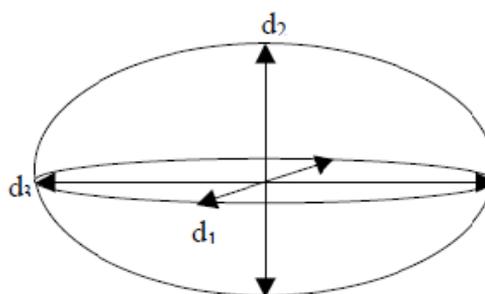
Como mostra a Figura 3.6(a) em comparação com a Figura 3.6(b) a semente de cevadilha vacarina apresenta três dimensões bem definidas podendo ser comparado com a geometria de um elipsoide.

Figura 3.6(a) – Dimensões referente a semente de cevadilha vacariana.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.6(b) – Esquema de um elipsoide triaxial.



Fonte: Fumagalli, 2007.

Com a diferença entre as dimensões o procedimento de cálculo para a esfericidade foi desenvolvido segundo a Equação 3.3:

$$\begin{aligned} \emptyset &= \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume}}{\text{área da superfície da partícula}} \\ &= \frac{\pi \cdot [d_e]^2}{4 \cdot \pi \cdot \left[\frac{p^P \cdot r^P + p^P \cdot f^P + r^P \cdot f^P}{3} \right]^{1/P}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que p , r e f são a metade do valor dos comprimentos longitudinais, transversais e circunferenciais do elipsoide, P é uma constante de valor 1,6075. O diâmetro equivalente (d_e) foi determinado através da Equação 3.4:

$$d_e = \left(\frac{6}{\pi} \cdot V_{elipsoide} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

em que o volume do elipsoide ($V_{elipsoide}$) foi determinado a partir da Equação 3.5.

$$V_{elipsoide} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot p \cdot r \cdot f \quad (3.5)$$

Distribuição do tamanho médio de partículas - utilizando-se um conjunto de peneiras da série Tyler (1/4, 4, 6, 9, 14, 24) e um agitador de peneiras, ambos da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda., foi determinada a curva da distribuição granulométrica e o diâmetro médio de Sauter (d_s) das sementes de cevadilha vacariana, seguindo a metodologia citada por Cremasco (2012). As análises foram realizadas em triplicata. O cálculo do diâmetro médio de Sauter foi proposto através da Equação 3.6:

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (3.6)$$

em que x_i é a fração ponderal retida e d_{pi} é a média das aberturas das peneiras passante e retida. A fração ponderal retida (x_i) foi calculada por meio da Equação 3.7:

$$x_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.7)$$

em que m_i é a massa retida na peneira e m é a massa total da amostra.

Massa específica bulk - a massa específica bulk (ρ_{bulk}) das sementes foi determinada através de ensaios de proveta conforme indica a Figura 3.7, o qual uma proveta da marca Global Glass Científica de 50 ml \pm 0,05 ml foi preenchida com as sementes de cevadilha, sendo sua massa determinada com auxílio de uma balança analítica da marca SHIMADZU e modelo AUY220 com carga máxima de 220 g \pm 0,001 g a partir da Equação 3.8. Esse estudo foi desenvolvido em quintuplicata e seguiu a metodologia citada por Cremasco (2012)

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{sólido}}{V} \quad (3.8)$$

em que, $m_{sólido}$ é massa de sementes e V é referente ao volume da proveta.

Figura 3.7 – Material adotado para determinação da massa específica *bulk*.



Fonte: Autor, 2014

Massa específica real - a massa específica real (ρ_{real}) das sementes foi obtida por picnometria gasosa através de um equipamento da marca Quantachrome Instruments, ultrafoam1000e, modelo UPY-30F e balança analítica citada anteriormente, conforme ilustra a Figura 3.8. O gás inerte utilizado no experimento foi o hélio com índice de pureza de 6.0.

Figura 3.8 – Equipamento utilizado para a determinação da massa específica real.



Fonte: Autor, 2014.

Para análise da massa específica real o equipamento foi ajustado para realizar dez medidas sucessivas de massa específica em uma pressão de operação de 19 psi e na temperatura de aproximadamente 20 °C, ajuste estes referentes a especificações do equipamento.

Porosidade do leito estático - a porosidade média do leito estático das sementes de cevadilha vacariana foi determinada pela relação entre a massa específica *bulk* e a massa específica real das sementes, conforme mostra a Equação 3.9, citada por Cremasco (2012).

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{real}} \right) \quad (3.9)$$

Todos os procedimentos adotados para obter os resultados da caracterização física foram desenvolvidos nos laboratórios do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa.

3.3.2 Estudo de germinação

Os testes de germinação foram efetuados seguindo a metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes, propostas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA/ACS (1992). O procedimento para esta análise consistiu na utilização de caixas gerbox juntamente com papel filtro embebecidos em água, onde foram distribuídas através da área total da caixa 100 sementes de cevadilha vacariana, como mostra a Figura 3.9. As amostras foram submetidas a um confinamento controlado em uma germinadora da marca Nova Ética e Modelo 403-3D (Figura 3.10), operando na temperatura de $22 \pm 2,0$ °C na influência de luz solar natural. As contagens das plântulas foram procedidas no décimo (vigor) e no vigésimo primeiro (germinação) dia após o início do teste, sendo a soma das plântulas que se desenvolveram no 10º e 21º dia referentes a germinação total. Ressalta-se que todos os testes de vigor e germinação aplicados nesse trabalho foram realizados em triplicata.

Figura 3.9 – Disposição das sementes de cevadilha vacariana na caixa gerbox.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.10 – Germinadora em operação para estudo da germinação.



Fonte: Autor, 2014.

Os procedimentos adotados para obter os resultados da caracterização fisiológica foram desenvolvidos nos laboratórios do curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa e os resultados tratados por um programa computacional.

3.3.3 Determinação das isotermas de dessecção

A determinação das isotermas de dessecção das sementes de cevadilha vacariana foi embasada através do método gravimétrico estático. Para tal, foram empregadas soluções de ácido sulfúrico em onze diferentes concentrações que garantiram a variação da umidade relativa de 5 a 89 %, ou seja, atividade de água de 0,05 a 0,89 conforme apresentado na Tabela 3.1. Os valores referentes a Tabela 3.1 representam as atividade de água para cada concentração de ácido sulfúrico nas temperaturas de 40, 50, 60 °C, tendo como justificativa a utilização dessas temperaturas obter informações para o estudo do processo de secagem dessas sementes em secador de leito fixo.

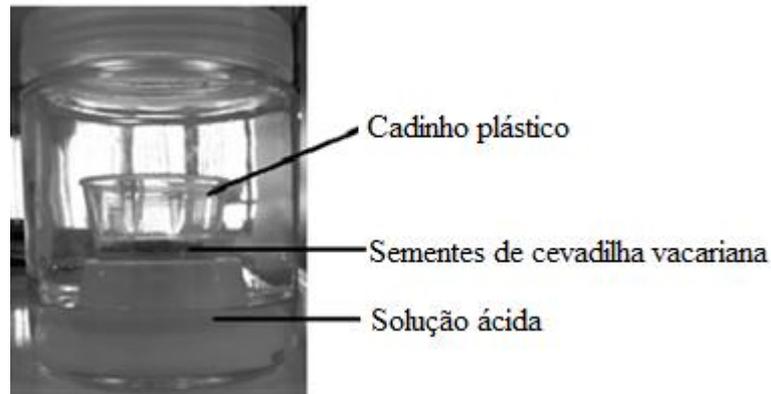
Tabela 3.1 – Valores de atividade de água para as concentrações de H₂SO₄ nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

Concentração de H ₂ SO ₄	a_w a 40 °C	a_w a 50 °C	a_w a 60 °C
20 %	0,878	0,888	0,890
25 %	0,824	0,829	0,830
30 %	0,753	0,770	0,776
35 %	0,674	0,681	0,682
40 %	0,574	0,582	0,584
45 %	0,470	0,483	0,488
50 %	0,366	0,380	0,388
55 %	0,267	0,280	0,287
60 %	0,178	0,189	0,199
65 %	0,102	0,110	0,124
70 %	0,049	0,055	0,061

Fonte: Adaptado pelo Autor, 2014 de Perry e Chinton, 1983.

Os experimentos conduzidos nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C foram analisados em réplicas, fazendo o uso de recipientes de vidros hermeticamente fechados, suporte, cadinho de plástico e matéria-prima a ser analisada conforme mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Recipiente empregado para a realização das isotermas de dessorção.



Fonte: Autor, 2014.

O procedimento para determinação das isotermas de dessorção consistiu basicamente em inserir 30 mL das soluções de ácido sulfúrico ($0,20-0,70 \text{ kg.kg}^{-1}$) no interior de cada recipiente de vidro. Assim como a inserção do ácido no recipiente de vidro, foi colocado também um suporte, garantindo que não houvesse contato da amostra com o ácido sulfúrico, que sustentava o cadinho plástico que continha em seu interior aproximadamente 1,0 g de sementes de cevadilha vacariana.

Os trinta e três recipientes foram colocados em estufa de circulação forçada, marca Nova Ética, modelo 400-5ND, para cada temperatura de estudo (40, 50 e 60 °C). Foram realizadas pesagens dos cadinhos de plástico contendo a amostra em balança analítica utilizada em testes anteriores no primeiro, sétimo, décimo e décimo quarto dia de experimento. Essas pesagens foram aferidas com o objetivo de verificar o equilíbrio mássico para cada atmosfera estudada. Com a condição de equilíbrio mássico alcançado no décimo quarto dia, o teor de umidade de equilíbrio (em base seca) foi calculado através da Equação 2.2. Nessa equação, a diferença entre a massa da amostra no equilíbrio mássico e a massa da amostra seca, foi determinada através do método gravimétrico estático recomendado pela AOAC, (1997).

Os resultados obtidos nas isotermas de dessorção das sementes foram analisados através do ajuste dos dados experimentais, a partir de um software computacional aos modelos de Henderson, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), Peleg, Brunauer, Emmett e Teller (BET), Oswin, em substituição das Equações 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, respectivamente.

O coeficiente de determinação (R^2) foi o primeiro critério estatístico para analisar a melhor correlação dos dados. Além do R^2 , o erro médio relativo (P_p) e o chi-quadrado (X^2), representados pela Equação 3.11 e 3.12, respectivamente foram usados para determinar a

qualidade do ajuste do melhor modelo para descrever o comportamento da isoterma de dessecção das sementes de cevadilha vacariana.

$$P_p = \frac{100}{nn} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{eExp} - X_{ePre}|}{X_{eExp}} \quad (3.11)$$

$$X^2 = \frac{\sum (X_{eExp} - X_{ePre})^2}{nn - NN} \quad (3.12)$$

em que, X_{eExp} é o valor encontrado experimentalmente, X_{ePre} o valor calculado (predito) pela equação do modelo e nn o número de observações experimentais e NN é o número de parâmetros da equação de ajuste.

Nessa perspectiva, para um bom ajuste matemático dos dados aos modelos estudados, o R^2 deve ser próximo à unidade, P_p ficar a baixo de 10% e X^2 o obter o menor valor (MOHAPATRA e RAO, 2005).

3.4 Planejamento Experimental Fatorial do Estudo do Processo de Secagem

Para elaboração de um Planejamento Experimental Fatorial no presente estudo foram analisados fatores de entrada envolvidos no processo de secagem (altura da bandeja correspondente a espessura de sólidos, velocidade do ar de secagem e temperatura do ar de secagem), bem como os seus respectivos níveis, conforme mostra a Tabela 3.2. Os níveis utilizados para cada variável foram previamente definidos em testes preliminares e revisão na literatura.

Tabela 3.2 – Codificação das variáveis e níveis para elaboração do planejamento experimental fatorial.

Variáveis	T (°C)	v_{ar} (m/s)	h_{band} (cm)
Níveis			
-1	40	1	0,5
0	50	1,5	0,75
1	60	2	1

Fonte: Autor, 2014

Com a definição dos níveis, para a realização dos ensaios de secagem em camada delgada, os dados foram organizados de acordo com um planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central, totalizando 11 ensaios de secagens, apresentado pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Matriz do planejamento experimental fatorial usada para avaliar as variáveis envolvidas no processo de secagem.

Nº de ensaios	T (°C)	v (m/s)	h (cm)
1	40	1,0	0,5
2	60	1,0	0,5
3	40	2,0	0,5
4	60	2,0	0,5
5	40	1,0	1,0
6	60	1,0	1,0
7	40	2,0	1,0
8	60	2,0	1,0
9	50	1,5	0,75
10	50	1,5	0,75
11	50	1,5	0,75

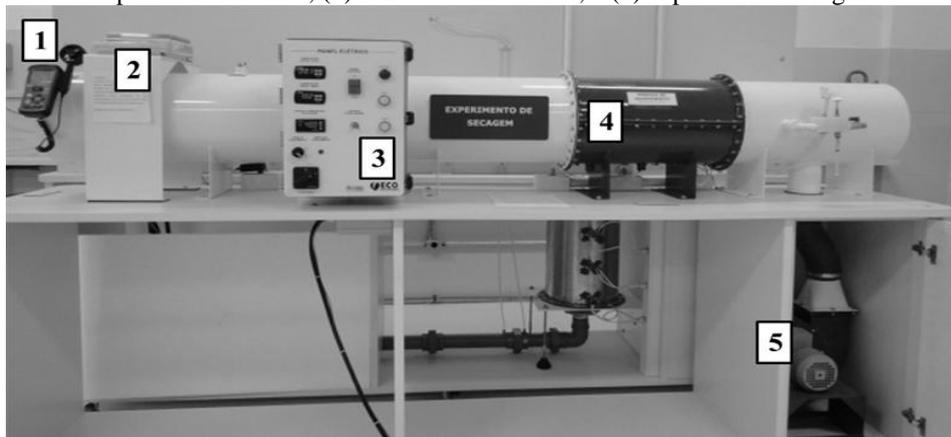
Fonte: Autor, 2014

A fim de evitar a ocorrência de distorção estatística nos resultados, isto é, impedir que desvios atípicos sejam obrigatoriamente associados a determinadas combinações de níveis, os ensaios foram realizados de forma aleatória. Por meio do planejamento experimental fatorial foram avaliados os efeitos principais e interações dos fatores temperatura do ar de secagem (40, 50 e 60 °C), velocidade do ar de secagem (1,0, 1,5 e 2,0 m/s) e altura de bandeja (0,5, 0,75 e 1,0 cm) sobre as respostas umidade final em base úmida e germinação das sementes.

3.5 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes em Secador de Leito Fixo

A aplicação do planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central foi idealizada para o estudo da cinética de secagem das sementes de cevadilha vacariana em camada fina. Para a realização dos experimentos de secagem, foi utilizado um secador de bandeja com escoamento paralelo de ar, da marca ECO Educacional, conforme ilustra as Figuras 3.12(a) e 3.12(b), que representam imagens ilustrativas do secador e de seus componentes periféricos.

Figura 3.12 (a) – Secador de bandeja com escoamento paralelo de ar. (1) anemômetro, (2) balança digital, (3) painel de controle, (4) resistências elétricas, e (5) soprador centrífugo.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.12(b) – Vista frontal do interior do túnel de secagem.



Fonte: Autor, 2014.

O secador apresentado na Figura 3.12(a) é composto por componentes periféricos de fornecimento de ar, ajuste da vazão de ar, medidas de temperatura, aquecimento do ar, controle da temperatura e balança para a determinação da perda de massa das sementes. Nos itens que se seguem são descritos o detalhamento e funcionalidade dos periféricos que compõem o sistema de secagem.

Painel para ajuste da vazão do ar - o ajuste da vazão do ar de secagem foi realizado por meio de um sistema de controle do secador (Figura 3.12a(3)), o qual é constituído por um inversor de frequência acoplado ao soprador. Para determinar a velocidade do escoamento do ar no túnel de secagem, utilizou-se um anemômetro do tipo ventoinha da marca Instrutherm TAD-500 com precisão de $\pm 3\%$, conforme mostrado na Figura 3.12a(1).

Determinação da massa - as bandejas eram constituídas de um formato cilíndrico de fundo telado com 0,5, 0,75 e 1,0 cm de altura e 9,5 cm de diâmetro (Figura 3.12b). A massa das amostras foi determinada por uma balança da marca Marte Balanças e Aparelhos de Precisão Ltda. com carga máxima de $4200 \pm 0,01$ g, conforme apresenta a Figura 3.12a(2).

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 pelo uso de sensores do tipo PT100, onde as leituras eram realizadas diretamente no painel de controle mostrado na Figura 3.12a(3).

Aquecimento do ar - o ar de secagem foi aquecido por quatro resistências elétricas de 800 W cada. Tais resistências elétricas localizam-se no secador entre o sistema de fornecimento do ar e câmara de secagem, conforme ilustra a Figura 3.12a(4) e a informação da temperatura do ar de secagem foi obtido pelo painel de controle Figura 3.12a(3).

Fornecimento de ar - o ar de secagem foi fornecido por um soprador centrífugo (Figura 3.12(5)) modelo Facitar de 1 CV.

Para cada condição de secagem estabelecida no planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central, o sistema foi monitorado de 5 em 5 min para os primeiros 30 min do procedimento de secagem e de 10 em 10 min até o meio atingir o equilíbrio mássico. As variáveis medidas durante os experimentos foram Temperaturas de Bulbo Seco (T_{BS}) e Temperatura de Bulbo Úmido (T_{BU}) do ar na entrada do túnel de secagem, a temperatura do ar de secagem (T) e a massa de sementes contida na bandeja (m). 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, foi determinado a Umidade Relativa (UR) e a Umidade Absoluta (UA) antes e após o aquecimento do ar de secagem. Esta determinação foi feita através do *software* livre Catt2, que é específico para cálculos psicrométricos.

Além da análise das respostas advindas do planejamento experimental fatorial, foram estudadas também as curvas da taxa de secagem (N) em função da umidade média (X_m) e do adimensional de umidade livre ($X_t - X_e / X_{t0} - X_e$) em função do tempo (t). A partir dos dados do adimensional de umidade livre em função do tempo determinaram-se as difusividades efetiva (D_{ef}) de cada processo de secagem pelo ajuste dos dados aos modelos da Lei de Fick, Page, Henderson e Pabis, Dois Termos, Midilli, Verna e Logarítmica, em substituição das Equações 2.13, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21, respectivamente.

Os resultados obtidos nesse estudo de secagem foram verificados a partir de um programa computacional e através da análise estatística dos dados para validação e interpretação dos resultados.

3.6 Análise do Processo de Reumidificação

Conforme mostrado pelo fluxograma organizacional descrito no item 3.1 o estudo de reumidificação foi proposto apenas na segunda etapa deste trabalho, ou seja, apenas nas sementes de cevadilha vacariana que passaram pela operação de secagem natural.

Esse procedimento foi realizado devido as sementes de cevadilha vacariana secas naturalmente se encontrarem com teor de umidade comercial (10 a 12 %), ou seja, propicias para o plantio. Com isso, o estudo de reumidificação teve como objetivo analisar as condições ideais para que as sementes de cevadilha vacariana apresentassem um teor de umidade semelhante ao encontrado nas sementes recém-colhidas na lavoura e avaliar a influencia desse estudo na germinação.

Análise seguiu a metodologia de saturação proposta por Arnost Jr. (1997), o qual consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e saturado sob as temperaturas de 30, 35 e 40 °C. O equipamento utilizado para promover tais condições foi um banho termostatizado (banho-maria) da marca Quimis e modelo Q215M2, conforme mostra a Figura 3.13.

Figura 3.13 – Distribuição das sementes no interior do banho termostatizado para estudo da reumidificação.



Fonte: Autor, 2014.

O procedimento consistiu em distribuir as sementes em uma camada de aproximadamente 1 cm de altura, dispostas em um suporte de fundo telado para facilitar o processo de transferência de massa. Tanto antes de iniciar o processo de reumidificação como a cada doze horas de processo, foi determinado o teor de umidade das sementes através do método gravimétrico estático recomendado pela AOAC, (1997), bem como submissão das mesmas para análise de germinação seguindo a metodologia recomendada nas Regras para

Análise de Sementes, propostas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA/ACS (1992).

Para análise do melhor resultado do estudo de reumidificação foi levado em consideração o maior valor de germinação, maior umidade em base úmida da semente de cevadilha vacariana no menor tempo de reumidificação.

3.7 Análise das Isotermas de Dessorção e do Processo de Secagem das Sementes Reumidificadas

Com a definição da melhor condição para realizar o processo de reumidificação, foram desenvolvidas as isotermas de dessorção para as sementes de cevadilha vacariana reumidificadas, com intuito de analisar a interação entre a atividade de água e a umidade de equilíbrio das sementes, comparando-as com as isotermas obtidas pelas sementes *in natura*.

A metodologia proposta para o desenvolvimento das isotermas de dessorção das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas foi embasada através do método gravimétrico estático descrito pelo item 3.3.3. As temperaturas para esse estudo foram de 40 e 60 °C, referentes às temperaturas utilizadas para o processo de secagem das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas.

A análise do processo de secagem das sementes reumidificadas foi desenvolvida com intuito de avaliar uma possível quebra de dormência, ajudando a acelerar e uniformizar o processo. Para tal, as mesmas foram submetidas a reumidificação e posteriormente ao processo de secagem na melhor e na pior condição observada pelas respostas (germinação e umidade final) referentes aos ensaios do Planejamento Experimental Fatorial, ensaio 1 (40°C, 1 m/s e 0,5 cm) e ensaio 4 (60 °C, 2,0 m/s e 0,5 cm).

A metodologia proposta para o estudo da cinética de secagem das sementes de cevadilha vacariana reumidificada para os ensaios 1 e 4, foi desenvolvido segundo a descrição do item 3.5.

O ajuste dos dados experimentais tanto das isotermas de dessorção quanto do processo de secagem das sementes reumidificadas, foi embasado a partir do modelo que melhor ajustou aos dados da isoterma de dessorção e da cinética de secagem das sementes *in natura*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são abordados os resultados e as respectivas discussões para cada estudo presente neste trabalho.

Inicialmente são apresentados os resultados da semente de cevadilha vacariana *in natura* quanto às suas características físicas e fisiológicas. Apresenta-se também a análise físico-química das sementes através das isotermas de dessecamento. Na sequência mostra-se a cinética de secagem em função da temperatura, velocidade do ar e altura da bandeja para obter como respostas umidade final do *Bromus auleticus* e suas respectivas germinações para cada ensaio proposto. Também são apresentados os resultados da reumidificação das sementes secas naturalmente, que indicam a melhor temperatura e tempo de exposição. Por fim, avalia-se as isotermas de dessecamento e a cinética de secagem das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas.

4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cevadilha Vacariana

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos na caracterização física e fisiológica das sementes de cevadilha vacariana *in natura* fornecidas pela Embrapa - Pecuária Sul. Os valores com seus respectivos desvios são referentes à umidade das sementes recém-colhidas da lavoura, umidade das sementes após passagem pelo processo de limpeza e umidade das sementes advindas da secagem natural, sendo todos os valores representados em base úmida (*BU*). São apresentados também os resultados do diâmetro médio de Sauter, a massa específica real, a massa específica *bulk*, a porosidade média do leito estático, a esfericidade e a germinação da semente advinda da secagem natural.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cevadilha vacariana *in natura*.

Propriedade	Valor
U_{BU} (%) (recém-colhidas)	$34,74 \pm 1,248$
U_{BU} (%) (pós-limpeza)	$27,63 \pm 0,372$
U_{BU} (%) (secagem natural)	$12,94 \pm 0,019$
ρ_{real} (kg/m ³)	$1415,01 \pm 1,710$
ρ_{bulk} (kg/m ³)	$375,71 \pm 6,431$
ε (-)	$0,741 \pm 0,004$
d_s (mm)	$1,710 \pm 0,010$
Φ (-)	$0,607 \pm 0,002$
G (%)	$45,67 \pm 1,732$

Fonte: Autor, 2015.

Com os dados referentes a Tabela 4.1 observa-se que a umidade das sementes de cevadilha vacariana recém-colhidas encontra-se de acordo com os estudos de Silva, (2001) e Tamanini, (2002) que encontraram aproximadamente 35 % de umidade em *BU* para semente de cevadilha vacariana pós-colheita. Toledo e Marcos Filho (1977) ressaltam que o manuseio após a colheita é fundamental para a qualidade a ser obtida e, possivelmente seja nesta etapa do beneficiamento que ocorra os maiores danos à semente, visto que a colheita é normalmente realizada quando o teor de umidade está em torno de 50 %, existindo ainda atividade fisiológica nas sementes devido alto teor de umidade.

As sementes limpas, de acordo com Garcia et al., (2004), podem compreender uma faixa de umidade inicial de 22 a 24 %, valor próximo ao obtido no presente estudo. Este valor de umidade inicial referente às sementes limpas pode variar dependendo do tempo de espera para iniciar os processos de limpeza bem como as características climáticas em que as sementes se encontram ainda na lavoura.

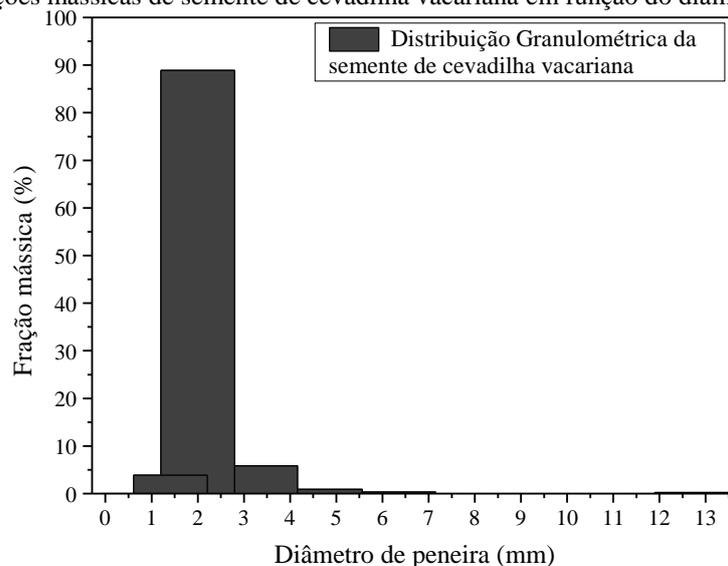
Segundo Macedo et al., (1987), as sementes de gramíneas forrageiras, são secas de forma natural em solo ou lonas, podendo atingir nessa operação de 10 a 12 % de umidade (*BU*). Para o *Bromus auleticus*, Silva et al., (2001), descreveu a umidade média pós-secagem natural de 10 % para diferentes acessos da cevadilha vacariana presente no RS, corroborando com o presente estudo.

Os resultados obtidos para massa específica real, massa específica *bulk* e porosidade não foram comparados com a literatura devido a inexistência de dados deste tipo nas bibliografias consultadas. No entanto, Kannan (2014) e Hamm (2013), encontraram para a massa específica real das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) e azevém (*Lolium multiflorum* L.) valor de 1363,6 kg/m³ e 1366,0 kg/m³ respectivamente, valores esses próximos ao obtido para sementes de cevadilha vacariana que foi de 1415,01 kg/m³. Os autores apresentaram para massa específica *bulk* 858,3 kg/m³ e 280,0 kg/m³ para sementes de cornichão e azevém, respectivamente, o que resultou em um valor de porosidade do leito de 0,37 para o cornichão e 0,80 para o azevém. Por se tratar de um elipsoide triaxial o azevém teve valores mais compatíveis com a cevadilha vacariana que apresentou 375,71 kg/m³ para massa específica *bulk* e 0,741 para porosidade do leito estático.

Através do ensaio de peneiramento, foi obtida a distribuição granulométrica, no qual a grande parte da amostra ficou retida na peneira com aberturas de diâmetro médio 2,00 mm, contendo aproximadamente 90,0 % das sementes conforme mostra a Figura 4.1. A partir

dessas considerações foi calculado o diâmetro médio de Sauter (d_s) através da Equação 3.8, valor este indicado na Tabela 4.1. Sem indícios desse parâmetro para a matéria-prima em estudo foi feita uma comparação com sementes cornichão, o qual Kannan (2014) encontrou 1,37 mm para d_s . Resultado este inferior ao observado pela cevadilha vacariana, sendo o diâmetro médio de Sauter o diâmetro mais indicado para sistemas particulados uma vez que relaciona volume/superfície das partículas (FOUST et al., 1982).

Figura 4.1 – Frações mássicas de semente de cevadilha vacariana em função do diâmetro médio de peneira.



Fonte: Autor, 2015.

A esfericidade ou fator de forma define o quanto esférica é a partícula sendo que para um círculo perfeito, a esfericidade equivale ao valor 1. Para as sementes de cevadilha vacariana o fator de forma foi obtido através da Equação 3.3 com valor de 0,607, conforme mostra a Tabela 4.1. Este resultado indica que as sementes fisicamente não se assemelham a uma esfera perfeita. Em comparação com outras sementes forrageiras Kannan (2014) e Hamm (2013) encontraram para cornichão e azevém um valor de 0,98 e 0,17, respectivamente. O resultado encontrado para semente em estudo foi a partir da variação em função do comprimento, largura e espessura, que variaram de 8,86 a 10,34 mm para o comprimento, de 1,28 a 1,58 mm para a largura e de 0,79 a 0,99 mm para a espessura.

Por não constar no manual de Regras Para Análises de Sementes, é difícil constatar se essa espécie encontra-se dentro de um padrão numérico desejado para o resultado obtido pela germinação (G). No entanto, Silva et al., (2007) encontrou para espécie *Bromus auleticus* aproximadamente 69 % e 57 % de germinação a partir do teste padrão nos acessos Livramento e Limoeiro, respectivamente. Sendo relatado por Silva et al., (2007) valores

considerados acima do normal, já que em situações semelhantes, ou seja, nove meses pós colheita normalmente a germinação fica abaixo dos 50 % para essa espécie. Maia et al., (2006) ainda ressalta que aproximadamente 75 % do rendimento da cevadilha vacariana é advindo dos três primeiros perfilhos de cada planta, e o peso e a germinação das sementes diminui consideravelmente conforme aumenta a ordem cronológica do perfilho, logo as últimas sementes a serem produzidas por uma planta apresentam peso reduzido e menor germinação, além de baixa qualidade, relatos que podem justificar os valores de germinação obtida no presente estudo, que foi de 45,67 %.

Com os resultados propostos, pode ser estabelecido a caracterização física e fisiológica como de suma importância, pois fornece informações sobre as sementes necessárias para fins de semeadura, bem como para o dimensionamento e regulagem das máquinas que serão utilizadas na colheita e nas etapas de beneficiamento. Uma vez que, quando um equipamento é regulado de acordo com as características físicas do produto, o risco de perdas por injúrias mecânicas é menor, favorecendo maiores rendimentos.

4.2 Isotermas de Dessorção das Sementes de Cevadilha Vacariana *in natura*

A Tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros obtidos a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, GAB, Oswin, Peleg e Henderson para cada temperatura de estudo. Também nessa tabela são apresentados os respectivos coeficientes de determinação (R^2), chi-quadrado (X^2) e o erro médio relativo (P_p) para cada modelo utilizado.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros encontrados a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, GAB, Oswin, Peleg e Henderson.

Modelo	Parâmetro	Valor a 40 °C	R^2	X^2	P_p (%)
BET	X_m	0,045±0,002	0,968	6,49x10 ⁻²	7,284
	C	-1,88E ⁴⁵ ±6,30E ⁴⁰			
	n	6,903±0,595			
GAB	X_m	0,060±0,002	0,992	8,96x10 ⁻³	2,260
	C_t	42,822±10,523			
	k	0,727±0,0191			
Oswin	a	0,909±0,001	0,993	9,95x10 ⁻³	2,730
	b	0,295±0,008			
Peleg	k_1	0,112±0,007	0,992	1,16x10 ⁻²	2,589
	n_1	0,368±0,041			
	k_2	0,110±0,014			
Henderson	n_2	5,149±1,166	0,974	5,93x10 ⁻²	6,750
	a	160,471±50,200			
	b	2,319±0,143			

Continuação Tabela 4.2.

Modelo	Parâmetro	Valor a 50 °C	R^2	X^2	$P_p(\%)$
BET	X_m	0,042±0,001	0,972	3,02x10 ⁻²	4,746
	c	-1,13E ⁴⁴ ±4,35E ⁴⁰			
	n	4,334±0,266			
GAB	X_m	0,058±0,003	0,982	2,37x10 ⁻²	3,928
	C_t	45,255±9,371			
	k	0,513±0,037			
Oswin	a	0,072±0,001	0,971	3,24x10 ⁻²	4,905
	b	0,203±0,012			
	k_1	0,192±0,050			
Peleg	n_1	0,103±0,642	0,989	8,54x10 ⁻²	1,675
	k_2	0,091±0,048			
	n_2	0,700±0,407			
Henderson	a	4382,85±1260,49	0,991	1,01x10 ⁻²	2,747
	b	3,385±0,114			
Modelo	Parâmetro	Valor a 60 °C	R^2	X^2	$P_p(\%)$
BET	X_m	0,033±0,923	0,923	9,49x10 ⁻²	8,398
	c	9,01E ⁴⁴ ±9,55E ⁴⁰			
	n	4,382±0,509			
GAB	X_m	0,051±0,003	0,982	1,74x10 ⁻²	3,773
	C_t	25,729±3,600			
	k	0,388±0,061			
Oswin	a	0,057±0,002	0,922	1,06x10 ⁻¹	8,869
	b	0,208±0,021			
	k_1	0,084±0,002			
Peleg	n_1	0,435±0,022	0,988	2,13x10 ⁻²	3,497
	k_2	166,71±1,37			
	n_2	1,15±1,43			
Henderson	a	6292,43±3563,22	0,970	4,05x10 ⁻²	5,475
	b	3,233±0,206			

Fonte: Autor, 2015.

De acordo com os valores vistos na Tabela 4.2, todos os modelos testados representam satisfatoriamente as isotermas de dessecção de semente de cevadilha vacariana, uma vez que todos os modelos obtiveram valores do coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,922, erro médio relativo (P_p) abaixo 10% e chi-quadrado (X^2) menor que 1x10⁻¹. No entanto os modelos que apresentaram os melhores resultados para as temperaturas estudadas foram os modelos de GAB, com coeficientes de determinação entre 0,982 e 0,992, erro médio relativo entre 2,260 e 3,928 % e chi-quadrado entre 8,96x10⁻³ e 1,74x10⁻², e Peleg, com coeficiente de determinação entre 0,988 e 0,992, erro médio relativo de 1,675 e 3,497 % e chi-quadrado entre 1,16x10⁻² e 8,54x10⁻². A partir desses valores o modelo escolhido para representar a curvas de isoterma foi o modelo de GAB, devido esse modelo tratar de uma equação

triparamétrica de polinômio menor que o modelo de Peleg, além de suas constantes (Ct , K , Xm) representarem significado físico.

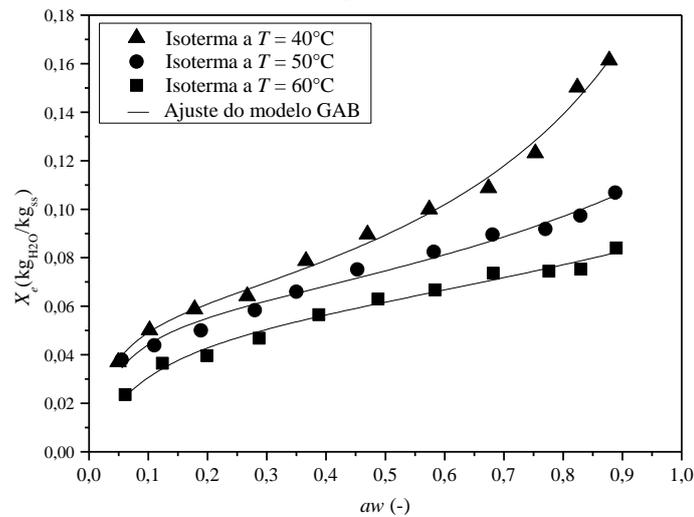
Além disso, o modelo de GAB permite um bom ajuste dos dados de sorção de produtos até a atividade de água de 0,90, sendo Ct e K constantes de adsorção relacionados com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as camadas subsequentes, num dado sítio de sorção (PARK, et al., 2007). Os valores destas constantes podem ser um indicativo sobre qual tipo de isotermas o material analisado corresponde, segundo a classificação Brunauer et al., (1938), onde valores $K < 1$ e $Ct > 2$, podem ser consideradas isotermas do tipo II (PAGLARINI et al., 2013).

O modelo de GAB fornece também os valores de monocamada de água (Xm), que indicam a relação com que as reações químicas ocorrem determinando a velocidade de deterioração biológica, através das áreas expostas da matriz sólida. Os valores de umidade da monocamada (Xm) do presente trabalho encontram-se coerentes com estudos de Al-Muhtaseb et al., (2004) e Mclaughlin e Magee (1998), que também relataram a diminuição dos valores da monocamada com o aumento da temperatura. Esses autores afirmam essa tendência devido a variação do estado de agitação e atração entre as moléculas de água com a variação da temperatura. Esse parâmetro é de fundamental importância, uma vez que o valor da umidade de monocamada determina o teor de umidade que é adsorvida dos alimentos, permitindo ao material de estudo uma maior estabilidade.

O modelo de GAB também foi o modelo mais eficiente em estudos semelhantes para isotermas obtido por Almeida et al., (1999) e por Silva et al., (2002) ao determinarem a umidade de equilíbrio do gergelim e da polpa de manga, respectivamente, em temperaturas semelhantes ao presente estudo.

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas experimentais de isotermas de dessorção das sementes de cevadilha vacariana nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.

Figura 4.2 – Isotermas de dessorção da semente de cevadilha, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.



Fonte: Autor, 2015.

Através da Figura 4.2, observa-se que para uma mesma atividade de água (a_w), o aumento da temperatura promove uma redução do teor de umidade de equilíbrio (X_e), seguindo a tendência da maioria dos produtos agrícolas. Este comportamento é geralmente atribuído a uma redução no número de sítios ativos, devido a mudanças químicas e físicas provocada pela variação da temperatura. Constata-se também que o aumento da a_w promove um aumento da X_e para cada temperatura, logo, a taxa de dessorção é mais alta no início do processo e diminui continuamente à medida que se aproxima da X_e (PALMEIRA et al., 2004).

Além disso, nota-se que as curvas obtidas para as temperaturas de estudo apresentam um formato sigmoidal, curvas características do tipo II segundo a classificação de Brunauer et al., (1938). Essa classificação informa que esse tipo de isotermas é característica para produtos agrícolas, formato esse também obtido por Kannan (2014), Hamm (2013) e Almeida et al., (1999) para estudos em temperaturas similares com sementes forrageiras de cornichão, azevém e sementes de gergelim, respectivamente.

4.3 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Cevadilha *Vacariana in natura*

O estudo da cinética de secagem das sementes cevadilha *vacariana* tem como interesse mostrar o comportamento dessa forrageira perante a submissão de um tratamento de secagem em condições mais tecnológicas que suas habituais condições de tratamento, para assim avaliar a resposta obtida com a secagem artificial.

A Tabela 4.3 apresenta as condições operacionais estabelecidas como a temperatura do ar de entrada no secador, ou seja, a temperatura de bulbo seco (T_{BS}), a temperatura no qual o

vapor de água está em equilíbrio com a água líquida, o qual refere-se, a temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) para cada ensaio do planejamento experimental fatorial. Com os valores obtidos da T_{BS} e T_{BU} , foi possível caracterizar o ar de secagem quanto ao conteúdo de umidade absoluta (UA). A partir dos resultados encontrados para UA , juntamente com a temperatura do ar de secagem (T_{sec}) foi obtido a umidade relativa do ar de secagem (UR), onde seus valores divididos por 100 correspondem aos valores de atividade de água (a_w). Posteriormente, com os valores dos parâmetros do modelo escolhido para representação das curvas de isotermas (modelo de GAB) e a a_w em cada temperatura de secagem, obteve-se os valores da umidade de equilíbrio do material para cada ensaio estudado.

Tabela 4.3 – Dados do ar de secagem para cada ensaio, obtidos a partir da carta psicométrica.

Ensaio	T_{BS} (°C)	T_{BU} (°C)	UA (kg _{H2O} /kg _{arseco})	T_{sec} (°C)	UR (%)	X_e (kg _{H2O} /kg _{ss})
(1)	26,7	23,2	0,0165	40	35,43	0,0757
(2)	27,7	23,2	0,0161	60	12,79	0,0350
(3)	27,2	21,9	0,0143	40	30,91	0,0716
(4)	27,8	22,2	0,0145	60	11,59	0,0330
(5)	27,2	23,0	0,0160	40	34,35	0,0747
(6)	27,3	22,2	0,0147	60	11,76	0,0335
(7)	26,4	21,5	0,0141	40	30,41	0,0712
(8)	28,2	23,0	0,0155	60	12,39	0,0344
(9)	28,5	22,4	0,0145	50	19,77	0,0540
(10)	28,1	23,7	0,0166	50	21,20	0,0560
(11)	28,8	24,2	0,0170	50	21,22	0,0564

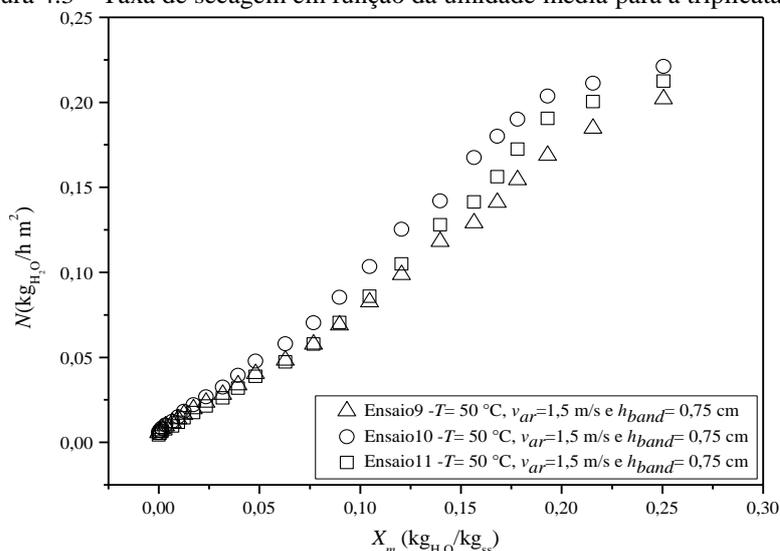
Fonte: Autor, 2015.

Segundo Park et al., (2007) a umidade absoluta (UA) pode ser considerada como a relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco no mesmo volume de mistura e a umidade relativa (UR) uma relação entre a fração molar do vapor de água na mistura e a fração de vapor de água numa mistura saturada à mesma pressão e temperatura. Logo, a Tabela 4.3 mostra-se coerente uma vez que com o aumento da temperatura, menor a umidade relativa (UR) encontrada. Deste modo, com a elevação da temperatura, mais eficaz foi a retirada de umidade presente na semente de cevadilha vacariana. O valor obtido pela umidade relativa é proporcional ao valor de umidade de equilíbrio (X_e) encontrado, sendo a umidade de equilíbrio a umidade limite que um material pode ser seco para uma determinada condição de temperatura e umidade do ar. Logo, quanto maior for a temperatura do processo menor será a

umidade relativa e, conseqüentemente, maior será a força motriz do processo e menor será a umidade de equilíbrio da semente de cevadilha vacariana.

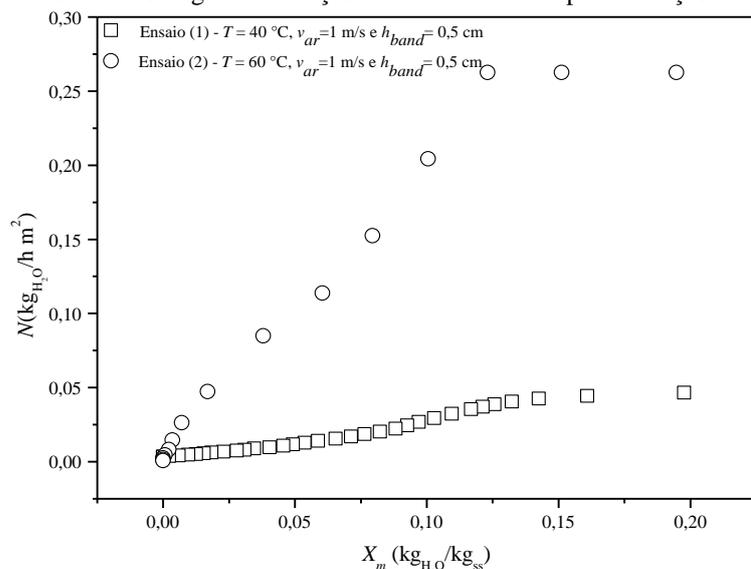
A partir dos valores da umidade de equilíbrio (X_e) foram desenvolvidas as curvas da taxa de secagem (N) em função da umidade média (X_m), conforme mostram as Figura 4.3 a 4.6, que foram dispostas a partir dos resultados obtidos na triplicata e na variação de apenas uma das três variáveis estudadas (temperatura de secagem, velocidade do ar e altura da bandeja), mantendo assim os outros níveis constantes, tendo como intuito analisar o processo separadamente.

Figura 4.3 – Taxa de secagem em função da umidade média para a triplicata central.



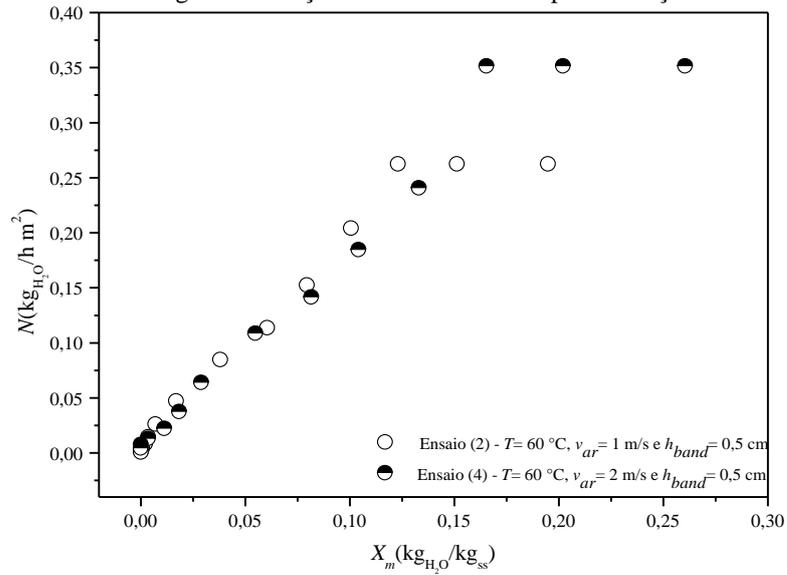
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.4 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da temperatura.



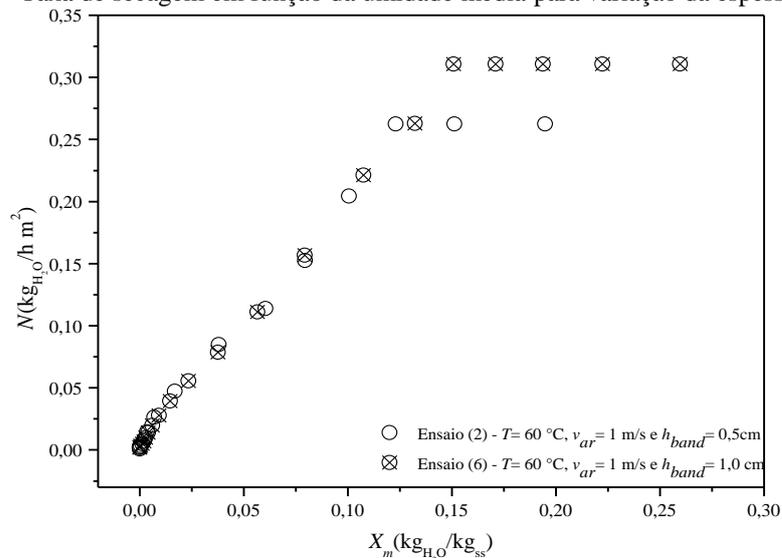
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.5 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da velocidade do ar.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.6 – Taxa de secagem em função da umidade média para variação da espessura de sólidos.



Fonte: Autor, 2015.

Observa-se nas Figuras 4.3 a 4.6 que as taxas de secagem das sementes de cevadilha vacariana apresentaram um comportamento típico de secagem para produtos agrícolas, ou seja, um decaimento da umidade em função do tempo (GEANKOPLIS, 1998). No entanto o período de taxa constante foi constatado apenas nos ensaios com temperatura de 60 °C e em pouco tempo de processo, para os demais ensaios constatou-se apenas o período de taxa decrescente, sendo este o período que controla praticamente toda a operação.

Para a taxa decrescente é observado nas Figuras 4.3 a 4.6 que todas as condições experimentais analisadas tiveram quedas no índice da taxa representadas pelos mecanismos da

capilaridade e da difusão. A queda nos índices da taxa de secagem para o período decrescente pode ser explicada por dois fatores. O primeiro é que nessa etapa a taxa de transferência de massa é reduzida gradativamente por conta da diminuição da quantidade de água na superfície do sólido. Já o segundo refere-se à migração de umidade do interior para a superfície do sólido, que é efetuada, no caso das sementes de cevadilha vacariana, pelos mecanismos de transferência de massa da capilaridade e da difusão (GEANKOPLIS, 1998; PARK et al., 2007; FOUST et al., 1982).

Observa-se pela Figura 4.3 que as curvas desenvolvidas em triplicata obtiveram comportamentos bem semelhantes e mesmo com um valor inicial da taxa de secagem relativamente alto, aproximadamente $0,20 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$, tem-se a presença de apenas um período existente na secagem da cevadilha vacarina, o período de taxa decrescente. A partir do ocorrido pode-se afirmar que para essa temperatura a resistência ao transporte de umidade não estabelece força suficiente para apresentar o período de taxa constante, logo a transferência interna de umidade é o mecanismo controlador durante o processo de secagem. Por analogia, o mesmo fato deve ser observado para temperaturas inferiores.

Na Figura 4.4, ao analisar o comportamento das curvas em relação à mudança de temperatura, foi constatado que a modificação no valor de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ causou um aumento na taxa de secagem que se modificou de aproximadamente $0,05 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$ para $0,26 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$, sendo possível observar com esse aumento de temperatura a presença do período de taxa constante no início do processo. Tal fato pode ser explicado pelos fenômenos de transferência envolvidos no processo. Uma vez que a secagem para o período de taxa constante está relacionada com a transferência convectiva de calor e de massa na superfície do material sólido, é esperado que a elevação na temperatura cause um aumento na força motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema, realizando uma evaporação da massa de água sem interferência direta do sólido.

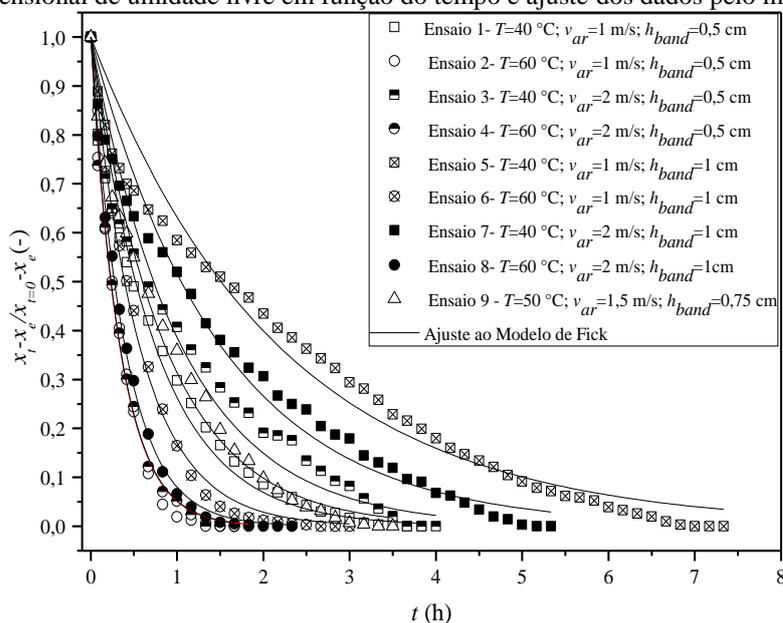
Para a Figura 4.5, ao verificar o comportamento das curvas da taxa de secagem em função da umidade média em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi verificado que a modificação no valor de $1,0 \text{ m/s}$ para $2,0 \text{ m/s}$ causou também um aumento na taxa de secagem para o período constante, uma vez que para velocidade do ar a $1,0 \text{ m/s}$ a taxa de secagem transcorreu a $0,26 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$ enquanto que para velocidade do ar a $2,0 \text{ m/s}$ a taxa de secagem foi de $0,35 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$, no início do processo. Este comportamento também é explicado pelo processo convectivo na superfície do material sólido para o período

de taxa constante, onde o aumento na velocidade do ar de secagem causa um aumento na força motriz de secagem.

Por fim, na Figura 4.6, ao observar o comportamento das curvas em relação à mudança na altura da bandeja, é constatado que a modificação no valor de 0,005 m para 0,01 m causou um aumento na taxa de secagem para o período de taxa constante, sendo que os valores iniciais encontrados para taxa de secagem foram de $0,26 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$ e $0,31 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$ para valores da altura da massa de sólidos de 0,005 m e 0,01 m, respectivamente. Tal evidência ocorre devido o aumento na altura da massa de sólidos proporcionar uma maior quantidade de massa na bandeja, disponibilizando assim uma quantidade maior de água livre para o processo evaporativo. Comportamentos semelhantes aos demonstrados pelas Figuras 4.3 a 4.6 foram observados para os demais ensaios de secagem abordados neste estudo.

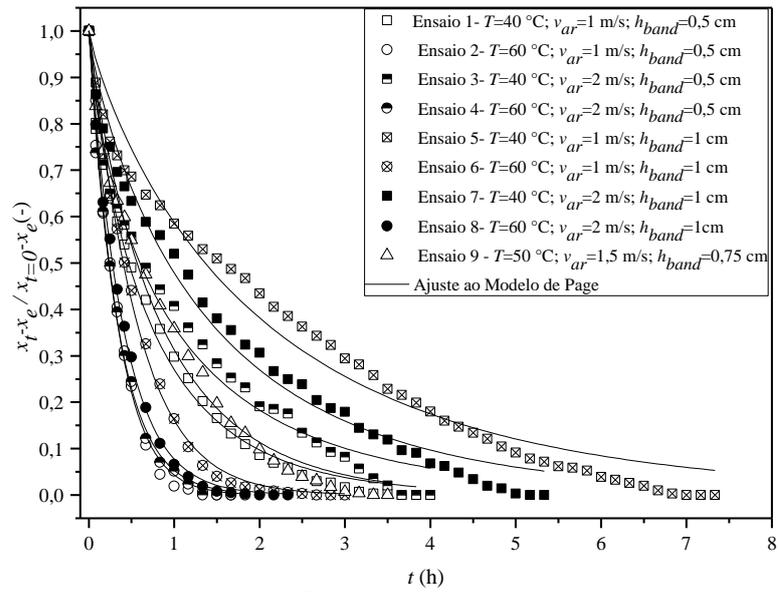
Nas Figuras 4.7 a 4.13 são apresentadas as curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo juntamente com os ajustes ao modelo da Lei de Fick e modelos empíricos e semi-empíricos de Page, Henderson e Pabis, Dois Termos, de Verna, Logarítmico e Midilli, para as sementes de cevadilha vacariana secas.

Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo da Lei de Fick.



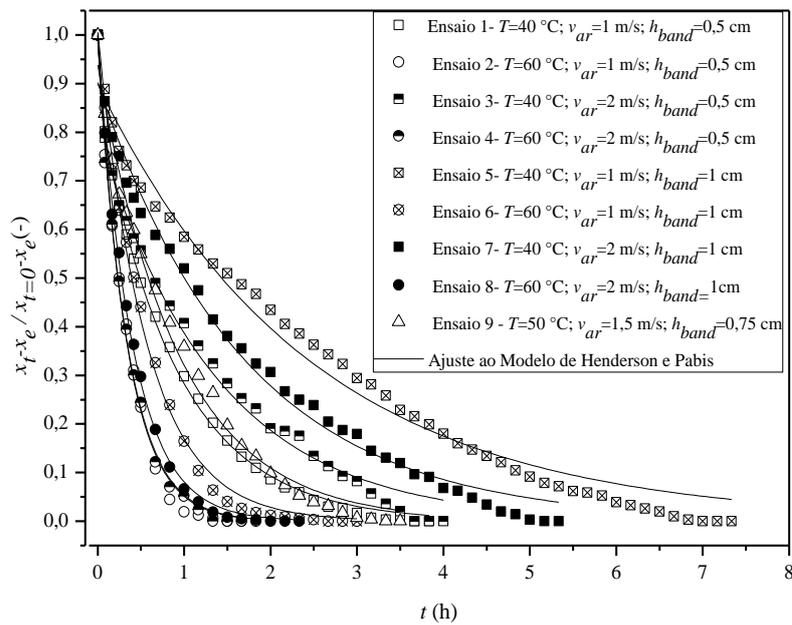
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.8 – Adimensional de unidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Page.



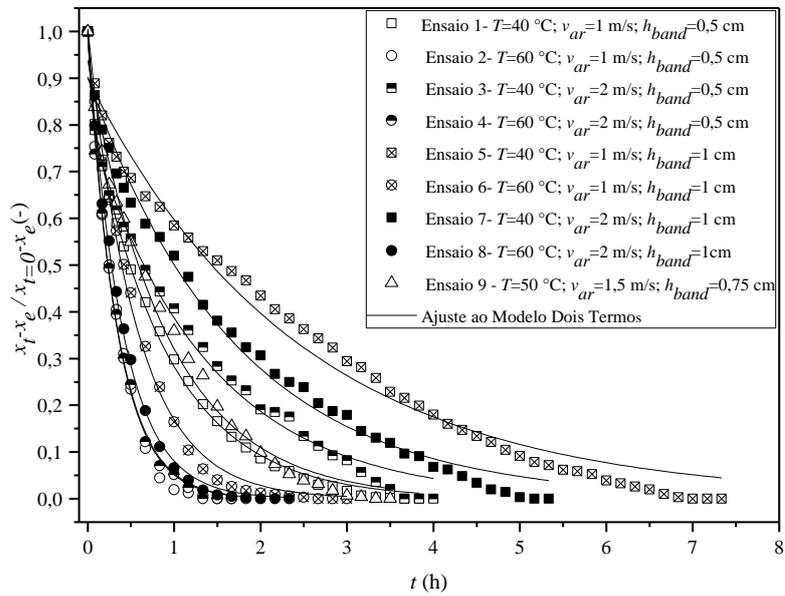
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.9 – Adimensional de unidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Henderson e Pabis.



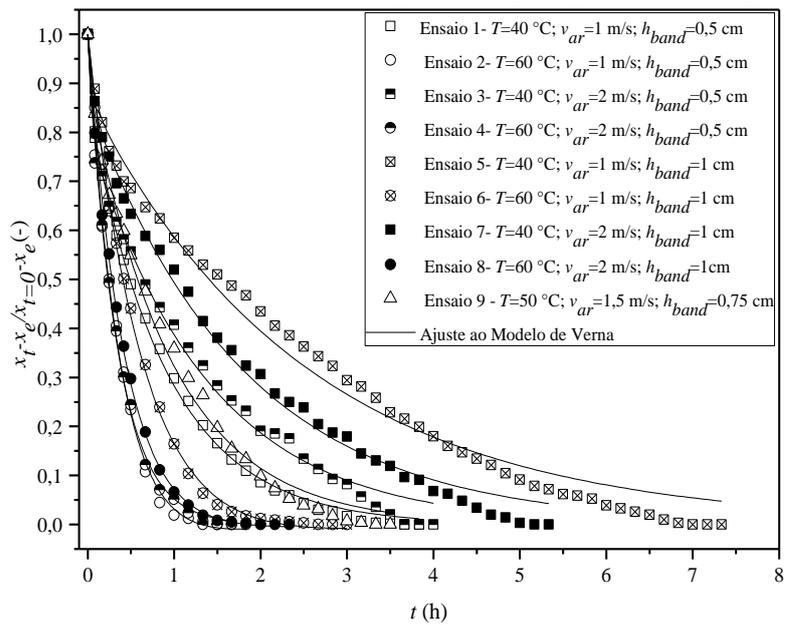
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.10 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Dois Termos.



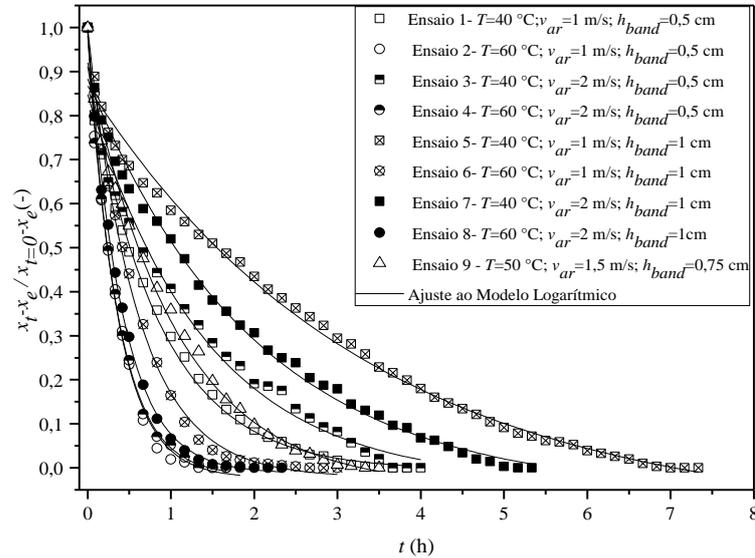
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.11 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo de Verna.



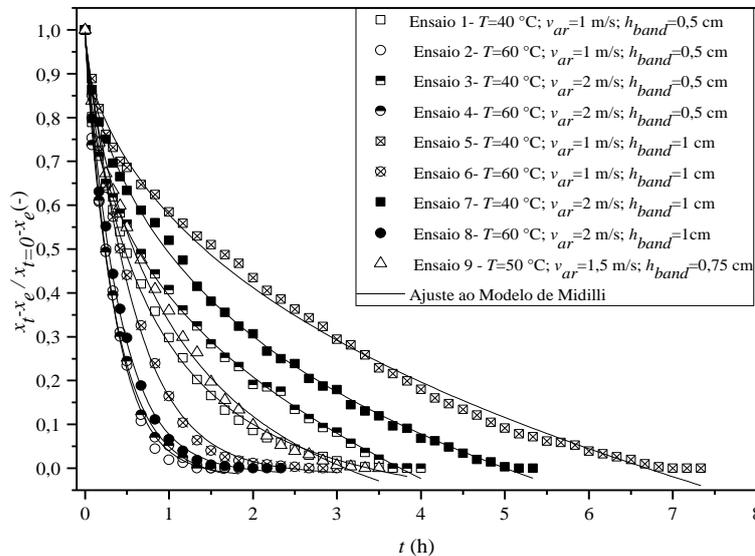
Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.12 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Logarítmico.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.13 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste dos dados pelo modelo Midilli.



Fonte: Autor, 2015.

Nas curvas das Figuras 4.7 a 4.13 é observado que dentre as secagens, a que teve maior temperatura (60 °C), maior velocidade do ar (2,0 m/s) e menor altura de bandeja (0,5 cm), referente ao ensaio 4, foi a que apresentou o menor tempo de secagem, com o equilíbrio mássico alcançado em aproximadamente 100 minutos de processo. Já a amostra seca na menor temperatura (40 °C), menor velocidade do ar (1,0 m/s) e maior altura de bandeja

(1,0 cm) referente ao ensaio 5, foi a que apresentou o maior tempo de secagem, com o equilíbrio mássico sendo atingido em aproximadamente 320 minutos de processo. O ponto central, equivalente a média dos níveis avaliados, alcançou o equilíbrio mássico em aproximadamente 230 minutos.

Um aspecto importante também observado nas Figuras 4.7 a 4.13, foram as modificações que ocorreram no comportamento das curvas do adimensional de umidade em função do tempo de processo com as alterações nas variáveis temperatura, velocidade do ar e altura de bandeja, uma vez que a modificação destas variáveis estabeleceram diferentes resultados para a taxa de secagem, conforme foi relatado pelas Figuras de 4.3 a 4.6.

Para a temperatura e a velocidade do ar de secagem, é observado que o aumento dessas variáveis promoveu uma diminuição do tempo de secagem. Já o aumento da altura de bandeja o processo inverte, ou seja, ocorre um aumento do tempo de secagem. Tal ocorrido pode ser explicado pela física do processo. Uma vez, que a secagem é uma operação que envolve a transferência simultânea de calor e de massa, é esperado que modificações na temperatura do ar, na velocidade do ar e altura de bandeja ocasionem mudanças nos valores das parcelas condutiva e convectiva dos balanços dos fenômenos de transferência para o regime não permanente da secagem.

No caso da parcela condutiva, o aumento no valor da temperatura do ar promove uma diminuição na umidade relativa do ar de secagem. Esse fato ocasiona um aumento na diferença de concentração de umidade existente entre o ar de secagem e o material sólido, aumentando assim a força motriz do processo de transferência de massa e uma diminuição no tempo de secagem. Para a parcela convectiva, as mudanças que ocorrem quando a temperatura e a velocidade do ar são alterados podem ser explicadas com base na lei de Newton do resfriamento [$\dot{q}'' = h_{conv}(T_{\infty} - T_S)$]. O aumento na temperatura do ar promove um aumento na diferença de temperatura existente entre o ar de secagem (T_{∞}) e o material sólido (T_S), aumentando assim a taxa de transferência de calor por convecção (\dot{q}''). Já o aumento na velocidade do ar promove uma elevação no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), ocasionando um aumento na transferência de calor por convecção (\dot{q}''). Esse aumento na taxa de transferência de calor por convecção promove um aumento na força motriz do processo e conseqüentemente uma diminuição no tempo de secagem. Para a altura da bandeja, o aumento da massa de sólidos provoca uma resistência maior ao processo

de secagem, o que dificulta as transferências de calor e de massa do sistema, provocando assim um aumento no tempo de secagem.

Os parâmetros dos ajustes referente as curvas das Figuras 4.7 a 4.13 e os valores de difusividade efetiva (D_{ef}), P_p , R^2 e X^2 para cada ensaio de secagem ajustadas pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, Henderson e Pabis, Dois Termos, Verna, de Logarítmico e de Midilli são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste e difusividades efetiva para cada condição de secagem analisada pelo modelo da Lei de Fick, Page, Henderson e Pabis, Dois Termos, Verna, Logarítmico e Midilli.

Ajuste dos Dados ao Modelo da Lei de Fick						
Ensaio	k (h^{-1})	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m^2/h)	
(1)	1,3356	0,984	$1,05 \times 10^{-01}$	18,81	$3,38 \times 10^{-06}$	
(2)	2,9726	0,995	$4,91 \times 10^{-01}$	20,95	$7,53 \times 10^{-06}$	
(3)	0,9513	0,945	$4,46 \times 10^{-02}$	15,68	$2,41 \times 10^{-06}$	
(4)	2,9497	0,997	$2,13 \times 10^{-02}$	8,85	$7,47 \times 10^{-06}$	
(5)	0,4590	0,965	$1,92 \times 10^{-02}$	15,05	$4,65 \times 10^{-06}$	
(6)	1,7696	0,997	$6,61 \times 10^{-01}$	25,28	$1,79 \times 10^{-05}$	
(7)	0,6620	0,972	$2,36 \times 10^{-02}$	11,96	$6,71 \times 10^{-06}$	
(8)	2,5214	0,998	$3,66 \times 10^{-01}$	27,51	$2,55 \times 10^{-05}$	
(9)	1,1587	0,986	$3,13 \times 10^{-02}$	9,94	$6,61 \times 10^{-06}$	
Ajuste dos Dados ao Modelo de Page						
Ensaio	k_l (h^{-1})	n	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m^2/h)
(1)	1,3078	0,8342	0,994	$8,82 \times 10^{-02}$	16,52	$3,31 \times 10^{-06}$
(2)	3,1386	1,0561	0,995	$2,73 \times 10^{-01}$	16,66	$7,95 \times 10^{-06}$
(3)	1,0154	0,7424	0,980	$1,07 \times 10^{-01}$	13,60	$2,57 \times 10^{-06}$
(4)	2,9270	0,9921	0,996	$2,86 \times 10^{-02}$	9,67	$7,42 \times 10^{-06}$
(5)	0,5318	0,8568	0,972	$5,67 \times 10^{-02}$	21,62	$5,39 \times 10^{-06}$
(6)	1,8251	1,0641	0,998	$2,37 \times 10^{-01}$	16,49	$1,85 \times 10^{-05}$
(7)	0,7362	0,8320	0,984	$8,94 \times 10^{-02}$	15,42	$7,46 \times 10^{-06}$
(8)	2,5548	1,0158	0,998	$3,22 \times 10^{-01}$	24,27	$2,59 \times 10^{-05}$
(9)	1,1618	0,9037	0,989	$1,08 \times 10^{-01}$	14,37	$6,62 \times 10^{-06}$
Ajuste dos Dados ao Modelo Henderson e Pabis						
Ensaio	k_l (h^{-1})	a_l	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m^2/h)
(1)	1,1930	0,9141	0,993	$4,53 \times 10^{-01}$	17,10	$2,82 \times 10^{-06}$
(2)	2,9711	0,9995	0,995	$1,13 \times 10^{-01}$	20,99	$7,53 \times 10^{-06}$
(3)	0,7890	0,8604	0,978	$1,09 \times 10^{-02}$	9,30	$1,84 \times 10^{-06}$
(4)	2,9067	0,9868	0,997	$3,01 \times 10^{-02}$	9,95	$7,37 \times 10^{-06}$
(5)	0,4092	0,8991	0,982	$6,20 \times 10^{-02}$	17,60	$4,15 \times 10^{-06}$
(6)	1,7814	1,0058	0,997	$4,72 \times 10^{-01}$	24,63	$1,80 \times 10^{-05}$
(7)	0,5882	0,9021	0,988	$4,21 \times 10^{-02}$	10,81	$5,96 \times 10^{-06}$
(8)	2,5104	0,9960	0,998	$8,09 \times 10^{-02}$	28,13	$2,54 \times 10^{-05}$
(9)	1,0738	0,9379	0,990	$6,88 \times 10^{-02}$	11,72	$6,12 \times 10^{-06}$

Continuação da Tabela 4.4

Ajuste dos Dados ao Modelo Dois Termos								
Ensaio	a_l	k_o (h ⁻¹)	b_l	k_l (h ⁻¹)	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	0,8610	1,112	0,1391	26,184	0,994	8,81x10 ⁻⁰²	15,83	2,82x10 ⁻⁰⁶
(2)	0,4998	2,971	0,4998	2,970	0,995	6,30x10 ⁻⁰²	9,66	7,53x10 ⁻⁰⁶
(3)	0,8018	0,728	0,1985	22,175	0,993	5,86x10 ⁻⁰²	8,41	1,84x10 ⁻⁰⁶
(4)	0,4934	2,906	0,4934	2,906	0,996	3,87x10 ⁻⁰²	9,95	7,37x10 ⁻⁰⁶
(5)	0,4496	0,409	0,4496	0,409	0,981	4,02x10 ⁻⁰²	14,65	4,15x10 ⁻⁰⁶
(6)	0,5029	1,781	0,5029	1,781	0,996	7,54x10 ⁻⁰¹	17,93	1,80x10 ⁻⁰⁵
(7)	0,4511	0,588	0,4511	0,588	0,987	4,52x10 ⁻⁰²	10,81	5,96x10 ⁻⁰⁶
(8)	0,4980	0,498	0,4980	0,498	0,998	5,09x10 ⁻⁰²	13,52	2,54x10 ⁻⁰⁵
(9)	0,4689	1,073	0,4689	1,073	0,990	7,75x10 ⁻⁰²	11,72	6,12x10 ⁻⁰⁶
Ajuste dos Dados ao Modelo de Verna								
Ensaio	a	k_o (h ⁻¹)	k_l (h ⁻¹)	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)	
(1)	0,1390	26,1907	1,1129	0,998	4,30x10 ⁻⁰¹	13,71	2,82x10 ⁻⁰⁶	
(2)	12,0578	2,0619	1,9961	0,997	4,62x10 ⁻⁰²	6,45	5,22x10 ⁻⁰⁶	
(3)	0,8017	0,7284	22,1359	0,992	1,19x10 ⁻⁰²	8,41	1,84x10 ⁻⁰⁶	
(4)	23,2598	2,9455	2,9453	0,996	2,66x10 ⁻⁰²	8,85	7,47x10 ⁻⁰⁶	
(5)	0,8723	0,3966	16,2482	0,985	7,71x10 ⁻⁰²	18,45	4,02x10 ⁻⁰⁶	
(6)	20,4709	1,2353	1,2133	0,999	5,00x10 ⁻⁰²	7,30	1,25x10 ⁻⁰⁵	
(7)	0,8673	0,5638	17,5814	0,993	5,87x10 ⁻⁰²	11,05	5,71x10 ⁻⁰⁶	
(8)	1,1041	2,3123	1,0353	0,999	1,03x10 ⁻⁰²	9,97	2,34x10 ⁻⁰⁵	
(9)	0,0926	38,4695	1,0340	0,993	1,01x10 ⁻⁰¹	12,98	5,35x10 ⁻⁰⁶	
Ajuste dos Dados ao Modelo Logarítmico								
Ensaio	a	c	k_l (h ⁻¹)	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)	
(1)	0,9168	-0,0059	1,1677	0,993	9,26x10 ⁻⁰²	17,03	2,96x10 ⁻⁰⁶	
(2)	1,0145	-0,0229	2,7911	0,996	2,50x10 ⁻⁰¹	15,24	7,07x10 ⁻⁰⁶	
(3)	0,8815	-0,0335	0,7086	0,979	9,95x10 ⁻⁰³	7,91	1,79x10 ⁻⁰⁶	
(4)	0,9979	-0,0174	2,7675	0,997	9,40x10 ⁻⁰³	6,23	7,01x10 ⁻⁰⁶	
(5)	0,9863	-0,1189	0,3002	0,990	4,21x10 ⁻⁰³	5,19	3,04x10 ⁻⁰⁶	
(6)	1,0178	-0,0216	1,6702	0,998	8,37x10 ⁻⁰²	12,27	1,69x10 ⁻⁰⁵	
(7)	0,9408	-0,0578	0,4971	0,990	6,29x10 ⁻⁰³	5,71	5,04x10 ⁻⁰⁶	
(8)	1,0033	-0,0125	2,4195	0,999	2,45x10 ⁻⁰²	14,23	2,45x10 ⁻⁰⁵	
(9)	0,9643	-0,0443	0,9378	0,993	1,02x10 ⁻⁰³	5,54	5,35x10 ⁻⁰⁶	
Ajuste dos Dados ao Modelo de Midilli								
Ensaio	a	b	k_l (h ⁻¹)	n	R^2	X^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	0,9824	-0,0135	0,6654	0,7775	0,998	9,28x10 ⁻⁰²	10,50	1,69x10 ⁻⁰⁶
(2)	0,9824	-0,0086	3,0294	1,0564	0,996	2,65x10 ⁻⁰²	7,72	7,68x10 ⁻⁰⁶
(3)	0,9959	-0,0538	0,7995	0,5212	0,999	3,80x10 ⁻⁰³	3,12	2,03x10 ⁻⁰⁶
(4)	0,9889	-0,0139	2,7455	0,9657	0,997	1,47x10 ⁻⁰²	6,31	6,96x10 ⁻⁰⁶
(5)	0,9780	-0,0328	0,4699	0,6085	0,995	1,87x10 ⁻⁰²	9,24	4,77x10 ⁻⁰⁶
(6)	0,9793	-0,0042	1,7646	1,0761	0,998	8,95x10 ⁻⁰²	9,61	1,79x10 ⁻⁰⁵
(7)	0,9895	-0,0332	0,6355	0,6405	0,998	2,84x10 ⁻⁰³	3,56	6,44x10 ⁻⁰⁶
(8)	0,9904	-0,0051	2,4838	1,0095	0,999	1,56x10 ⁻⁰²	9,43	2,51x10 ⁻⁰⁵
(9)	0,9791	-0,0267	0,9984	0,8008	0,996	3,62x10 ⁻⁰²	8,95	5,70x10 ⁻⁰⁶

Fonte: Autor, 2015.

É observado pela Tabela 4.4, que todos os modelos analisados apresentaram um bom ajuste para o coeficiente de determinação (R^2), uma vez que todos os valores apresentaram-se acima de 0,945, valor esse encontrado pelo modelo da lei de Fick (Ensaio 3). No entanto segundo Madamba et al., (1996), uma boa representação do fenômeno em estudo deve apresentar o R^2 acima de 0,98. Fazendo esta constatação apenas os modelos Dois Termos, Verna e Midilli apresentaram tal evidência. O autor ainda referencia que apenas a utilização do coeficiente de determinação (R^2) como o único critério de avaliação para a seleção dos modelos não lineares não constitui um bom parâmetro para representação do fenômeno de secagem. Então, para o refino do estudo foi levado em consideração o erro médio relativo (P_p) abaixo de 10 % e o chi-quadrado (X^2) menor que 10^{-2} . Para tal fato, constata-se que apenas o modelo de Midilli apresentou-se dentro da faixa estipulada com valores de R^2 acima de 0,995, P_p entre 10,50 e 3,12 % e X^2 entre $9,28 \times 10^{-02}$ e $2,84 \times 10^{-03}$.

O modelo de Midilli foi o que obteve o melhor ajuste dos dados experimentais da secagem de cevadilha vacariana corroborando os resultados verificados por Corrêa et al., (2007) e Menges e Ertekin (2006) para a modelagem da secagem do feijão vermelho e maçãs douradas, respectivamente. Os resultados encontrados no presente estudo são semelhantes aos de Meisami-Asl et al., (2009), que trabalhando com secagem de maçã fatiada nas temperaturas de 40 a 80 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s, verificaram que o modelo de Midilli se ajustou satisfatoriamente aos dados de secagem. Kanann (2014), estudando a modelagem matemática em camada fina de sementes de cornichão nas mesmas condições do presente estudo, também observou a equação de Midilli como o melhor modelo para representação dos dados experimentais de secagem.

Ainda analisando os resultados obtidos pela Tabela 4.4, observa-se que a magnitude da constante de secagem (k_1) para o modelo de Midilli, pode ser considerada como a representação dos efeitos das condições externas de secagem, o qual a elevação da temperatura e da velocidade do ar resultam em valores mais elevado de k .

Resultado semelhante foi encontrado por Menges e Ertekin (2006), Akpınar et al.; (2003) e Santos et al.; (2010) ao estudarem a secagem de maçã dourada, pimentão e banana da variedade terra, respectivamente. Segundo Babalis e Belessiotis (2004), a constante de secagem (k_1) pode ser utilizada como aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada à difusividade efetiva de umidade no processo de secagem. O autor ainda relata que os demais coeficientes do modelo de Midilli, (a , n e b) não apresentaram uma

tendência clara em função das variáveis estudadas na operação de secagem, assim como no presente estudo.

Tanto o modelo de Midilli, quanto para os outros modelos analisados os valores encontrados para difusividade efetiva (D_{ef}) ficaram dentro dos valores esperados, uma vez que o fornecimento mais elevado de energia pelo sistema acarretou um aumento da evaporação da água e menor resistência interna de secagem, logo maior velocidade de migração da água do interior para a superfície da semente. Além disso, Madamba (2003), relata que os valores da difusividade efetiva para materiais orgânicos devem estar entre 10^{-5} a 10^{-7} m²/h. No presente trabalho, os valores de difusividade efetiva encontrados estão dentro desta faixa apresentada pelo autor.

Para a difusividade efetiva, observa-se pela Tabela 4.4 que a mudança de temperatura no valor de 40 °C para 60 °C provocou um aumento no D_{ef} do processo. Isto pode ser explicado devido a elevação da temperatura causar um aumento na força motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema. Ao analisar os valores das difusividades efetiva em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi visto que a modificação no valor de 1,0 m/s para 2,0 m/s também provocou um aumento no D_{ef} devido essa elevação na velocidade do ar aumentar a força motriz de secagem. Por fim, ao observar os valores da difusividade efetiva em relação à mudança na altura de bandeja, foi observado que a modificação no valor de 0,5 cm para 1,0 cm também causou um aumento no D_{ef} devido ao aumento da altura da bandeja proporcionar uma maior massa de material, fazendo com que tenha uma maior quantidade de água livre para o processo evaporativo.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores da umidade inicial ($U_{inicial}$) e final (U_{secas}) das sementes em base úmida (U_{BU}), vigor referente a contagem do 10° dia, germinação (G) referente a contagem das plântulas no 21° dia e a germinação total (G_{total}) referente a soma das plântulas que se desenvolveram nos testes de vigor e germinação.

Tabela 4.5 – Respostas dos ensaios de secagem da semente de cevadilha vacariana.

Ensaio	$U_{inicial}$ (%)*	U_{secas} (%)*	vigor (%) – 10° dia	G (%) – 21° dia	G_{total} (%)*
<i>In natura</i>	27,63±0,37	12,94±0,02	9; 9; 5	35; 35; 44	45,67± 2,89
(1)	29,17±0,11	9,14±1,35	13; 14; 12	48; 42; 45	58,00±2,65
(2)	28,18±0,17	4,49±0,19	4; 4; 6	20; 24; 25	27,67±3,51
(3)	28,98±0,24	8,54±1,40	12; 10; 8	42; 43; 49	54,67±2,08
(4)	28,26±0,35	3,92±0,05	3; 3; 4	24; 12; 23	23,00±6,93
(5)	28,59±0,23	9,95±0,14	20; 13; 15	39; 28; 35	50,00±9,00
(6)	28,30±0,12	4,36±0,19	8; 10; 8	32; 28; 32	39,33±1,15
(7)	29,16±0,24	9,37±0,46	10; 6; 6;	55; 37; 39	51,33±21,2
(8)	28,08±0,32	3,90±0,16	4; 5; 6	17; 28; 21	27,00±6,00
(9)	28,08±0,12	5,36±0,37	6; 9; 9	30; 36; 32	40,67±4,51
(10)	28,15±0,46	6,69±1,07	12; 8; 10	48; 42; 36	52,00±7,21
(11)	27,93±1,07	5,11±0,06	10; 8; 14	40; 45; 37	51,67±1,53

*Triplicata ± desvio padrão

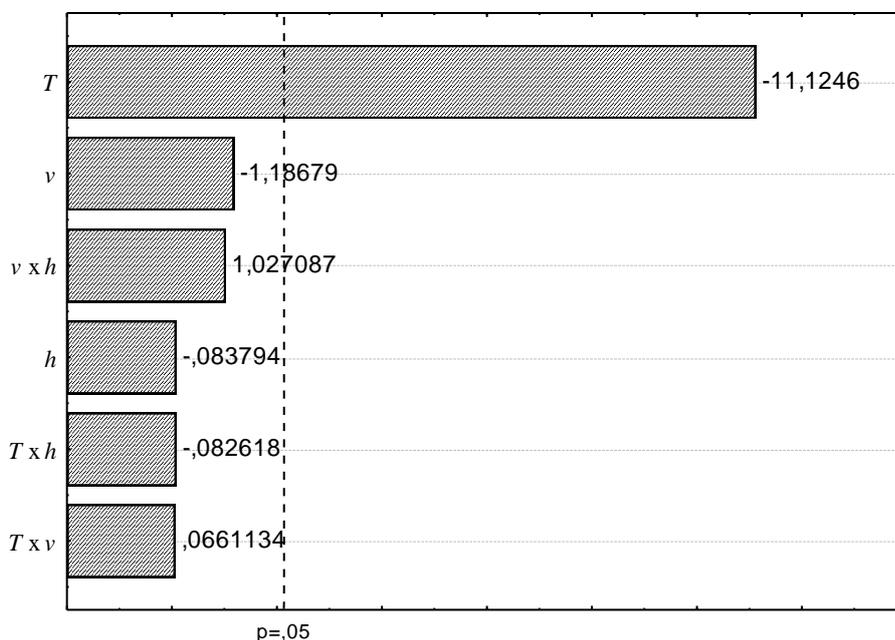
Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Tabela 4.5 que a passagem da temperatura de 40 °C (ensaios 1, 3, 5 e 7) para 60 °C (ensaios 2, 4, 6 e 8) causou uma diminuição no valor da umidade final em base úmida das sementes de cevadilha vacariana. Uma vez que a umidade inicial era de aproximadamente 28 % para todos os ensaios, e pós-secagem a umidade ficou na faixa de 9 e 4 % para os ensaios com a temperaturas de 40 e 60 °C, respectivamente. Na teoria da secagem, a retirada de umidade ocorre por conta da busca pelo equilíbrio termodinâmico entre o ar circundante e o material sólido (FUMAGALLI, 2007), logo as modificações na temperatura do ar de secagem causaram mudanças na umidade relativa do sistema (atividade de água), logo é esperado que em temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água é menor, o valor da umidade final da semente seja inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas.

Ainda pela Tabela 4.5 verifica-se que os valores encontrados para germinação estão na ordem de 23 a 58 % para sementes secas artificialmente, as sementes secas naturalmente a germinação foi de 45,67 %. Dentre as secagens artificiais, a amostra que obteve o maior valor médio de germinação, com valor de 58 %, foi a realizada pelo ensaio 1 ($T = 40$ °C, $v = 1,0$ m/s e $h = 0,5$ cm). Esse valor encontrado pelo ensaio 1 é superior ao analisado pelo mesmo lote de semente seca naturalmente e muito próximo do mínimo estabelecido pelos padrões exigidos comercialmente (SEAPA – Secretaria da Agricultura do Estado) (KANNAN, 2014), indicando que os ensaios secagens realizados no presente estudo em temperaturas mais baixas não alteraram a qualidade fisiológica das sementes.

Para compreender melhor a discussão referente a umidade final e germinação das sementes de cevadilha vacariana, são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 os diagramas de pareto referentes ao planejando experimental fatorial 2^3 com tréplica na ponto central. Nesse diagrama, a magnitude da influência dos efeitos principais e suas interações sobre a resposta umidade final em base úmida e germinação são apresentadas 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 4.14 – Diagrama de pareto para estudo da resposta umidade final.

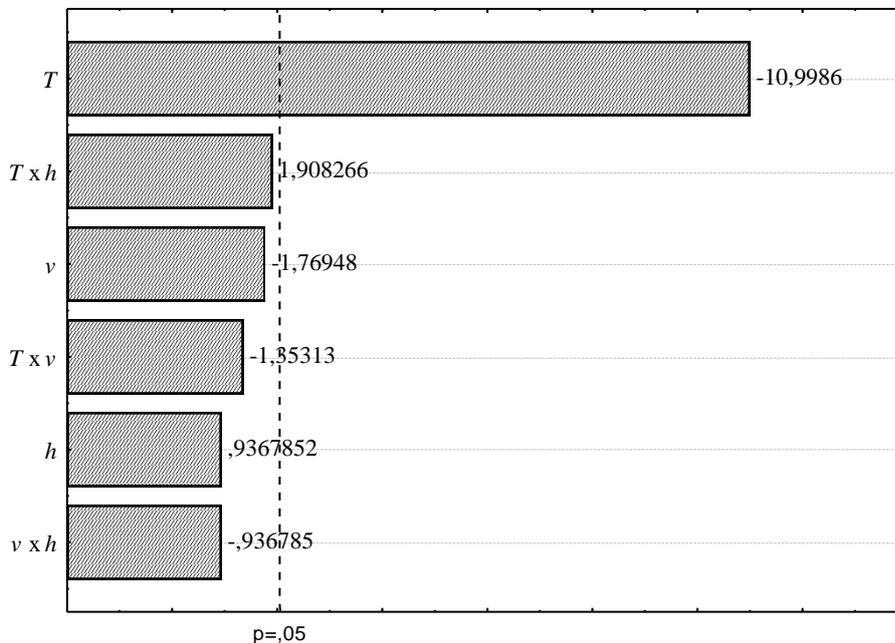


Fonte: Autor, 2015

A partir da Figura 4.14, para a resposta umidade final em base úmida, observa-se que a variável temperatura de secagem (T) foi o fator com significância ao nível de confiança a 95 % que influenciou a resposta U_{secas} das sementes de cevadilha vacariana. Para este variável, o sinal negativo indica que o aumento na temperatura promoveu uma diminuição no valor da resposta umidade final. Este resultado condiz com as explicações efetuadas na Tabela 4.5, onde foi constatado que modificações na temperatura do ar de secagem de 40 para 60 °C causaram mudanças na umidade final da semente. É observado que para temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água da semente de cevadilha é menor, o valor da umidade do produto final deve ser inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas.

A Figuras 4.15 refere-se a análise estatística da influência dos efeitos principais e suas interações sobre a resposta germinação das semente de cevadilha vacariana.

Figura 4.15 – Diagrama de pareto para estudo da resposta germinação.



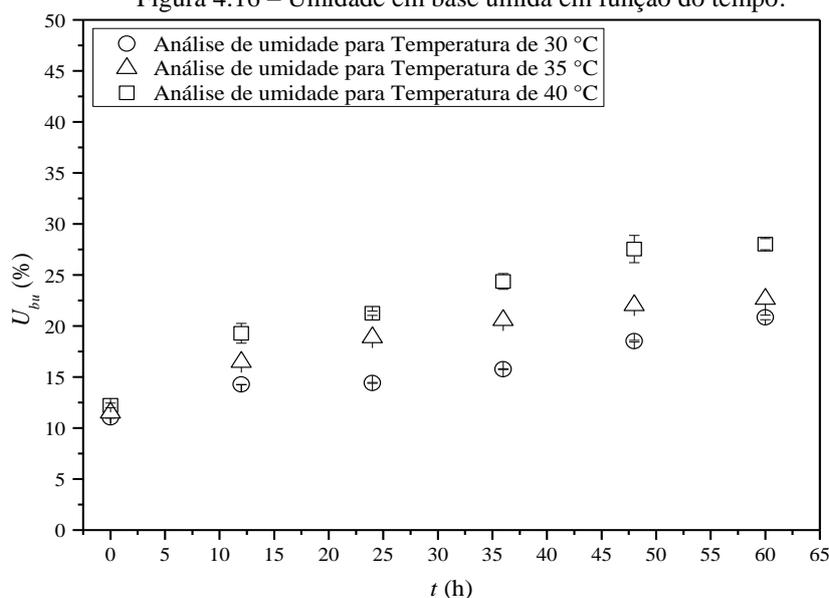
Fonte: Autor, 2015

Pela Figura 4.15, observa-se que o fator, que teve uma magnitude do efeito com significado estatístico para $p=0,05$, também foi a temperatura do ar de secagem. Para essa análise também foi constatado uma magnitude de efeito negativo, resultante do aumento da temperatura do ar de secagem de 40 para 60 °C, ou seja, a passagem de 40 para 60 °C promoveu uma diminuição na resposta germinação dos ensaios estudados.

4.4 Avaliação do Processo de Reumidificação das Sementes de Cevadilha Vacariana

Na Figura 4.16 são apresentados os dados de umidade das sementes de cevadilha vacariana em base úmida em função do tempo de exposição na atmosfera saturada d'água para as temperaturas de 30, 35 e 40 °C.

Figura 4.16 – Umidade em base úmida em função do tempo.



Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Figura 4.16 que o processo de reumidificação foi eficiente, visto que permitiu elevar o teor de umidade das sementes que apresentavam-se inicialmente com aproximadamente 10 % em base úmida para valores compreendidos entre 22 a 28 %, para 60 horas de exposição das sementes em ambiente saturado de água para as três temperaturas de estudo. Verifica-se também que o processo de reumidificação realizado na temperatura de 40 °C foi o mais efetivo, uma vez possibilitou colocar as sementes com teores de umidade compreendidos na faixa entre 20 a 28 % (*BU*).

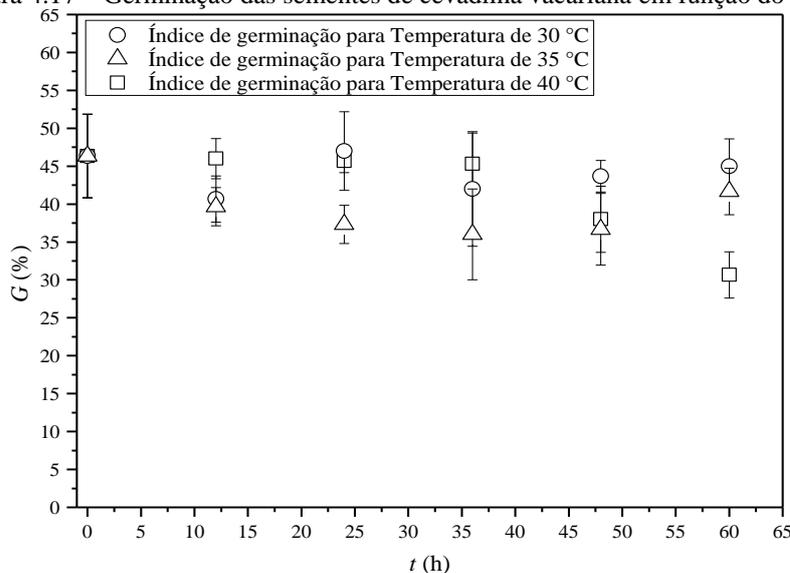
Ao comparar os valores obtidos pela Figura 4.16, observa-se que Hamm (2013) e Kannan (2014) chegaram a teores de umidade muito próximos para sementes forrageiras que foram submetidas ao processo de reumidificação nas mesmas condições do presente estudo. Hamm (2013) encontrou teor umidade de 26 e 27 % em base úmida para 48 e 60 horas de exposição respectivamente, na temperatura de 35 °C para sementes de azevém. Kannan (2014) obteve 27 % de umidade em 48 horas de exposição das sementes de cornichão, resultados observados para temperatura de 40 °C.

Assim como observado por Hamm (2013), nas sementes de azevém, a partir de 60 horas as sementes de cevadilha vacariana começaram a apresentar sinais de deterioração, verificando-se a presença de fungos. Tal evidência pode ter ocorrido porque o processo de reumidificação pode também ser considerado como um tratamento de envelhecimento das sementes (BRACCINI et al., 1999). Portanto, é necessário que o processo de reumidificação não seja aplicado por longos períodos devido ao efeito combinado tempo-temperatura-

umidade reduzir a capacidade germinativa da semente e/ou induzir a dormência. Logo, no presente trabalho, a cada 12 horas de procedimento, com intuito de verificar o ganho de umidade e a germinação, avaliavam-se o estudo de umidade e o processo germinativo das sementes para assim escolher a melhor condição para dar sequência ao estudo.

Na Figura 4.17 são apresentados os valores da germinação das sementes em função do tempo, antes da reumidificação e das sementes reumidificadas nas diferentes condições experimentais estudadas.

Figura 4.17 – Germinação das sementes de cevadilha vacariana em função do tempo.



Fonte: Autor, 2015.

Pela Figura 4.17 observa-se que as sementes não reumidificadas, ou seja, aquelas referentes ao tempo zero hora tiveram seus resultados próximos a 46 % de germinação. Em comparação com as temperaturas de estudo, a temperatura de 30 °C teve oscilações de valores que ficaram compreendidos entre 40 e 47 %, no entanto obteve teor de umidade muito abaixo do esperado, como visto pela Figura 4.16.

Para temperatura de 35 °C as germinações tiveram um decréscimo com o tempo, ocorrendo um aumento apenas para 60 h de processo, o qual a germinação chegou a 46 %. No entanto, o tempo de 60 horas manteve as sementes muito expostas ao ambiente saturado dando os primeiros sinais de deterioração da matéria-prima.

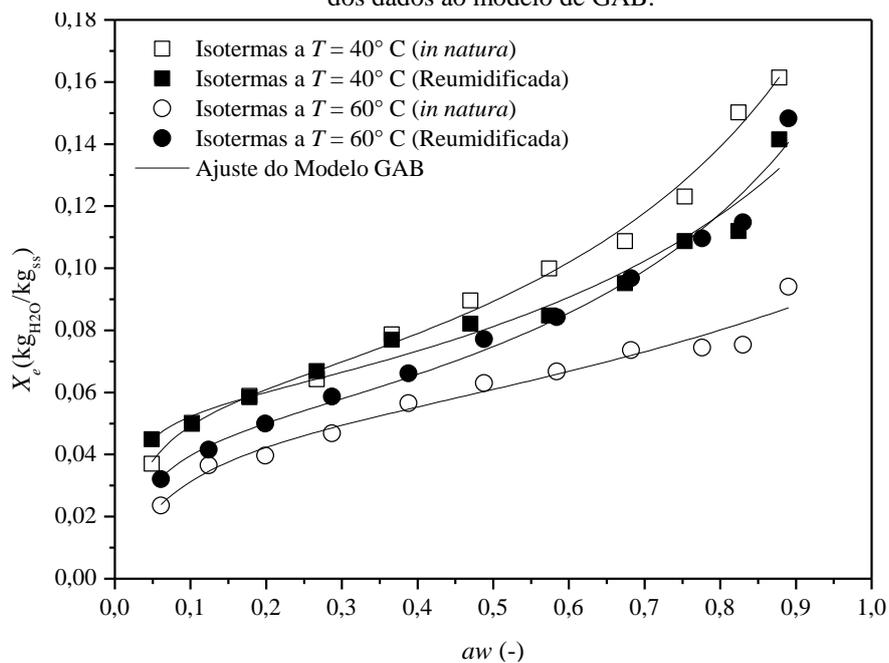
Já a temperatura de 40 °C apresentou o melhor índice de germinação no período de 36 horas de estudo, chegando a aproximadamente 46 %. No período de 36 horas foi exatamente o tempo necessário para a semente atingir o teor de umidade próximo dos observados para as sementes pós-limpeza (Tabela 4.1).

Logo, os resultados obtidos e apresentados pela Figura 4.16 juntamente com os da Figura 4.17, permitiram definir o processo de reumidificação mais adequado para as sementes de cevadilha vacariana, o qual foi o ensaio realizado nas condições de 40 °C e 36 horas de exposição da matéria-prima em ambiente fechado e saturado de água. Nessa condição foi constatado um bom teor de umidade em base úmida, além de manter os valores encontrados para germinação das sementes não reumidificadas.

4.5 Isotermas de Dessorção das Sementes de Cevadilha Vacariana Reumidificada

Na Figura 4.18 são apresentadas as curvas experimentais das isotermas de dessorção das sementes de cevadilha vacariana *in natura* e reumidificadas nas temperaturas de 40 e 60 °C, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.

Figura 4.18 – Isotermas das sementes de cevadilha vacariana *in natura* e reumidificada, com ajuste dos dados ao modelo de GAB.



Fonte: Autor, 2015.

Pela Figura 4.18 é possível visualizar nas curvas das isotermas na temperatura de 40 °C, à medida que a atividade de água (a_w) diminui, observa-se que para uma mesma a_w as sementes *in natura* apresentam um maior valor de umidade de equilíbrio (X_e) até a_w de aproximadamente 0,4. Posteriormente tem-se valores menores de X_e para uma mesma atividade de água em comparação com as isotermas das sementes reumidificadas. As isotermas a 60 °C mostram que todos os pontos referente a curva da isoterma da semente *in natura*

apresentam menores valores de umidade de equilíbrio para uma mesma atividade de água em relação a curva da isoterma das sementes reumidificada.

Os maiores valores de X_e encontrados para as curvas das isotermas das sementes reumidificadas, referentes as temperaturas de 40 e 60 °C, podem ter sido ocasionados devido a exposição das sementes em ambiente fechado e saturado de água ter acarretado uma mudança estrutural da matriz sólida, ocorrendo uma maior absorção de água pela estrutura porosa da semente, ligando-se as células do eixo embrionário.

A Tabela 4.6 apresenta os valores dos parâmetros a partir do ajuste dos dados ao modelo GAB. São mostrados também, os coeficientes de determinação (R^2), chi-quadrado (X^2) e erro médio relativo (P_p) para cada temperatura estudada nas diferentes condições.

Tabela 4.6 – Valores dos parâmetros a partir do ajuste dos dados ao modelo de GAB.

Modelo	Parâmetros	Valor a $T = 40^\circ\text{C}$		Valor a $T = 60^\circ\text{C}$	
		<i>In natura</i>	Reumidificada	<i>In natura</i>	Reumidificada
GAB	X_m	0,060±0,002	0,055±0,004	0,051±0,004	0,049±0,002
	Ct	42,822±10,523	106,80±71,16	25,729±3,60	35,765±14,21
	K	0,727±0,019	0,664±0,038	0,388±0,061	0,722±0,0290
	R^2	0,992	0,961	0,982	0,982
	X^2	$8,96 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-2}$	$1,30 \times 10^{-2}$
	P_p (%)	2,260	9,84	3,77	3,11

Fonte: Autor, 2015

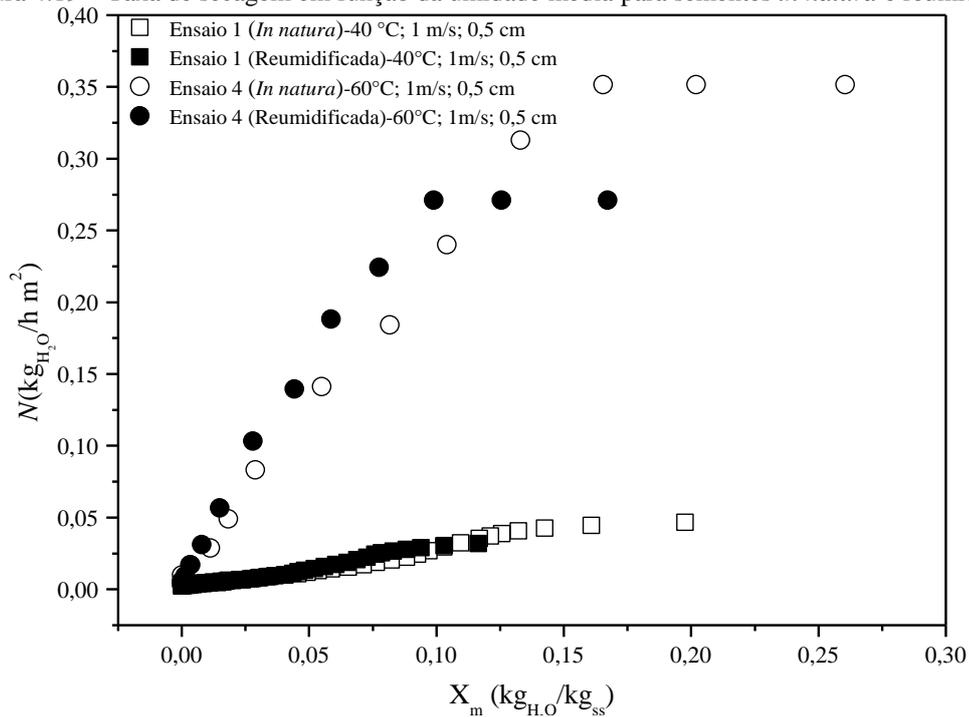
Pela Tabela 4.6 é possível verificar que os valores dos parâmetros estatísticos encontrados para o modelo de GAB representam satisfatoriamente as isotermas de desorção das sementes de cevadilha vacariana *in natura* e reumidificada, uma vez que todos os ajustes obtiveram valores do coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,961, erro médio relativo (P_p) abaixo 10% e chi-quadrado (X^2) menor que $1,10 \times 10^{-1}$.

Relata-se também pela Tabela 4.6 que para a umidade de monocamada (X_m) a 40 °C as sementes *in natura* apresentaram um valor de 0,060 e as sementes reumidificadas um valor de 0,055. A mesma comparação pode ser feita para temperatura de 60 °C que apresentou valores de 0,051 e 0,049 para sementes *in natura* e reumidificadas, respectivamente. A partir desses resultados constata-se que a X_m das sementes reumidificadas é menor devido à água presente nesse material reumidificado encontrar-se mais difundido na parte interna do sólido.

4.6 Análise do Processo de Secagem das Sementes de Cevadilha Vacariana Reumidificada

Na Figura 4.19 são apresentadas as curvas da taxa de secagem (N) em função da umidade média (X_m) para sementes *in natura* e reumidificadas. Esses ensaios são referentes a melhor e pior condição obtida pelos ensaios de secagem do planejamento experimental fatorial.

Figura 4.19 – Taxa de secagem em função da umidade média para sementes *in natura* e reumidificada.



Fonte: Autor, 2015.

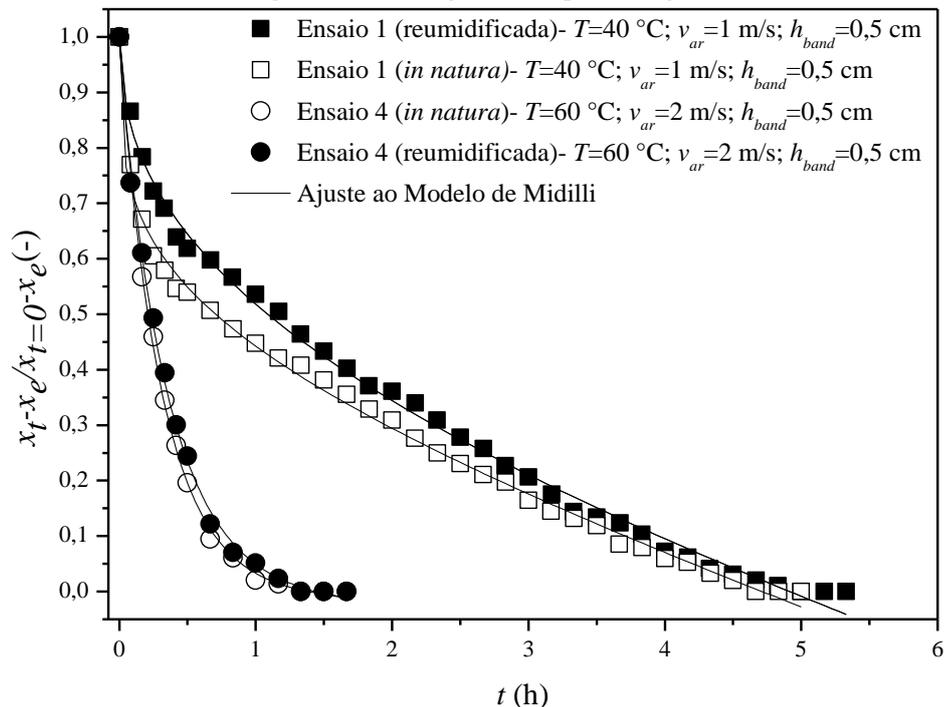
Observa-se pela Figura 4.19 que as curvas a 40 °C não apresentaram diferença significativa em função da taxa de secagem. Para a semente *in natura* taxa de secagem inicial foi de aproximadamente $0,05 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h.m}^2$ e a semente reumidificada apresentou um valor inicial de aproximadamente $0,04 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h.m}^2$. Para temperatura de 60 °C, nota-se que a taxa de secagem para o período constante foi maior para semente *in natura*. A semente *in natura* apresentou inicialmente uma taxa de aproximadamente $0,35 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h.m}^2$ e para semente reumidificada a taxa inicial foi de aproximadamente $0,28 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h.m}^2$.

Os resultados apresentados pela taxa de secagem comprovaram os valores obtidos pela Figura 4.18, uma vez que a diferença entre as curvas obtidas pelas isotermas das sementes reumidificada e *in natura* para a temperatura de 40 °C foi menos expressivo do que a 60 °C.

Os menores valores obtidos pela umidade de equilíbrio nas isotermas das sementes *in natura* resultaram em maiores valores para a taxa de secagem (N), comprovando a maior facilidade de retirada de água das sementes *in natura*.

Na Figura 4.20 são apresentadas as curvas do adimensional de água livre em função do tempo com os ajustes dos dados ao modelo de Midilli, para as sementes de cevadilha vacariana secas *in natura* e as sementes que passaram pelo processo reumidificação e posteriormente secagem.

Figura 4.20 – Adimensional de água livre em função do tempo, com ajuste dos dados ao modelo de Midilli..



Fonte: Autor, 2015.

Nas curvas mostradas pela Figura 4.20, observa-se que o tempo obtido para alcançar o equilíbrio mássico é praticamente o mesmo para as sementes reumidificadas e sementes *in natura* na mesma condição de ensaio. O ensaio 1 referente a menor temperatura e menor velocidade do ar, o sistema entrou em equilíbrio mássico em aproximadamente 320 minutos de processo para semente *in natura*, enquanto que a semente reumidifica alcançou o equilíbrio mássico em aproximadamente 330 minutos. Para o ensaio 4 relacionado a maior temperatura e maior velocidade do ar, o equilíbrio mássico foi alcançado, em ambos os casos estudados (reumidificada e *in natura*), em 100 minutos de processo.

Os parâmetros de ajustes dos dados ao modelo de Midilli referente às curvas da Figura 4.20, com os valores de difusividade efetivas (D_{ef}), erro médio relativo (P_p), chi-quadrado (X^2) e coeficiente de determinação (R^2), são apresentados pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste dos dados pelo modelo de Midilli com suas respectivas difusividade efetiva e análises estatísticas.

Parâmetros	<i>In natura</i> 40 °C	Reumidificada 40 °C	<i>In natura</i> 60 °C	Reumidificada 60 °C
a	0,9824	1,0008	0,9889	0,9931
b	-0,0135	-0,0659	-0,0139	-0,0101
k_1 (h ⁻¹)	0,6654	0,5384	2,7455	3,1614
n	0,7775	0,4644	0,9657	0,9881
R^2	0,998	0,996	0,997	0,998
X^2	9,28x10 ⁻⁰²	7,09x10 ⁻⁰³	1,47x10 ⁻⁰²	5,05x10 ⁻⁰²
P_p (%)	10,50	4,32	6,31	7,79
D_{ef} (m ² /h)	1,69x10 ⁻⁰⁶	1,36x10 ⁻⁰⁶	6,96x10 ⁻⁰⁶	8,02x10 ⁻⁰⁶

Fonte: Autor, 2015.

É observado na Tabela 4.7, que o ajuste dos dados pelo modelo de Midilli apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação (R^2) com valores acima de 0,996, erro médio relativo (P_p) abaixo de 10,50 % e o chi-quadrado (X^2) menor que 10⁻².

Em uma análise da Tabela 4.7 para a difusividade efetiva para a mesma temperatura, observa-se que para a temperatura 40 °C a velocidade de migração de umidade das sementes *in natura* foi a mais eficiente com valor de 1,69x10⁻⁰⁶ m²/h. Já para temperatura de 60 °C a D_{ef} foi maior para as sementes reumidificadas com o valor de 8,02x10⁻⁰⁶ m²/h.

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores referentes a umidade inicial e final em base úmida, vigor, germinação (G) e a germinação total (G_{total}) referente a soma das contagens do 10° dia (vigor) e 21° dia (germinação) das sementes de cevadilha vacariana reumidificada e *in natura*.

Tabela 4.8 – Respostas da umidade final, vigor e germinação das sementes de cevadilha vacariana reumidificada e *in natura*.

Ensaio	$U_{inicial}$ (%)*	U_{secas} (%)*	vigor (%) – 10° dia	G (%) – 21° dia	G_{total} (%)*
(1) <i>In natura</i>	29,17±0,11	9,14±1,35	13; 14; 12	48; 42; 45	58,00±2,65
(1) reumidificada	25,46±0,24	9,30±0,20	78; 60; 70	11; 24; 10	84,33±4,51
(4) <i>In natura</i>	28,26±0,35	3,92±0,05	3; 3; 4	24; 12; 23	23,00±6,93
(4) reumidificada	32,34±1,72	6,34±0,07	60; 62; 55	24; 19; 26	82,00±1,73

*Triplícata ± desvio padrão

Fonte: Autor, 2015.

A Tabela 4.8 mostra que respostas obtidas para umidade final das sementes de cevadilha vacariana reumidificadas e secas a 60 °C apresentam um valor mais elevado que o encontrado para as sementes de cevadilha vacariana *In natura* secas a 60 °C, fato que pode estar indicando que as sementes reumidificadas possuem ligações mais fortes da molécula da água com o eixo embrionário da semente. Esse resultado obtido para a temperatura de 60 °C corrobora com o observado nas análises das isotermas de dessorção da semente de cevadilha vacariana reumidificada e *In natura* (Figura 4.18), onde se verificou que para 60 °C havia uma maior facilidade de retirada de água das sementes *in natura*. Na temperatura de 40 °C as sementes *in natura* apresentaram valor de umidade final de 9,14 %, valor esse próximo aos das sementes reumidificadas que apresentaram um valor de 9,30 % em base úmida.

Ainda pela Tabela 4.8, verifica-se que os valores encontrados para vigor das sementes *in natura* estão na ordem de 14 a 3,5 % para os ensaios 1 e 4, respectivamente. Com a submissão das sementes ao processo de reumidificação e posteriormente a realização da operação secagem os valores de vigor das sementes passaram para 69,33 % no ensaio 1 e 59 % para o ensaio 4. É observado que o processo de reumidificação seguido de secagem é importante para quebra de dormência e aceleração do processo, uma vez que ambos os resultados encontrados tanto para melhor quanto para pior condição de secagem das sementes reumidificadas superam o valor encontrado para melhor condição de secagem da semente *in natura* (Ensaio 1), que obteve 58 % das sementes germinadas.

Essa aumento de germinação das sementes também foi observado por Flores et al., (2013) no estudo de reumidificação e secagem de sementes de azevém, que apresentou valores de germinação próximos a 70 %. O autor relata que a reumidificação pode estar ligada as etapas que devem ser vencidas na germinação das sementes. A presença da atmosfera fechada e saturada de água pode prover a quebra da dormência das sementes e propiciar o início do primeiro desenvolvimento.

Assim, a submissão das sementes ao processo de reumidificação pode ter acelerado o fenômeno biológico das sementes, retomando o crescimento do embrião, com subsequente rompimento do tegumento, o que pode ter propiciado G_{total} de 84,33 % para o ensaio 4 e de 82 % para o ensaio 1, referente as sementes que passaram pelo processo saturação de água em condições pré-estabelecidas e posteriormente fornecimento de calor para a secagem.

5 CONCLUSÕES

Nesta sessão são abordadas as conclusões do presente estudo com relação aos objetivos propostos para este trabalho.

Na caracterização das sementes de cevadilha vacariana (*Bromus auteticus* T.) encontrou-se um valor de umidade em base úmida para semente recém-colhidas de 34,74 %, para sementes pós-limpeza de 27,63 %, secagem natural de 12,94 % e de germinação das sementes seca *in natura* 45,67 %. Os valores para massa específica real foram de 1415,01 kg/m³, para massa específica *bulk* de 375,71 kg/m³, para porosidade do leito estático de 0,741, para diâmetro de Sauter de 1,710 mm e para esfericidade de 0,607.

Para estudo da caracterização físico-química, foi observado que todos os modelos analisados obtiveram bons ajustes dos seus dados, com elevados R^2 e baixos valores de X^2 e P_p . No entanto o modelo matemático que melhor descreveu o comportamento dos dados nas temperaturas de estudo foi modelo de GAB. As curvas experimentais de isoterma de dessecção das sementes de cevadilha vacariana apresentaram formato sigmoidal referentes ao tipo II da classificação de Brunauer et al., (1938).

Quanto às curvas da cinética de secagem das sementes de cevadilha vacariana concluiu-se que as mesmas tiveram um comportamento típico de secagem, no entanto o período de taxa constante foi observado apenas para temperatura de 60 °C. Na avaliação das curvas do adimensional de umidade em função do tempo concluiu-se que o aumento na temperatura e na velocidade do ar de secagem acarretam um aumento na força motriz de secagem, conseqüentemente diminuem o tempo do processo. Para análise da altura da bandeja, observa-se o processo inverso, ou seja, o aumento da massa de sólidos dificulta o processo de transferência de massa, e conseqüentemente há um aumento no tempo de secagem.

Para o ajuste dos dados aos modelos propostos observou-se que apenas o modelo de Midilli foi satisfatório para os ensaios de secagem, com coeficiente de determinação acima de 0,995, erro médio relativo entre 10,50 e 3,12 % e chi-quadrado entre $9,28 \times 10^{-2}$ e $2,84 \times 10^{-3}$. Para a difusividade efetiva dos os modelos analisados constatou-se que o aumento no nível das variáveis estudadas, proporcionaram um aumento no D_{ef} de todo o processo de secagem.

Em relação à análise de umidade final, concluiu-se que temperatura foi a variável mais influente nas sementes de *Bromus auleticus*. Em relação a germinação das sementes, constatou-se através dos testes fisiológicos que as sementes secas tiveram boa representação para a temperatura de 40 °C e baixos valores de germinação para as temperaturas de 60 °C.

Para o estudo da reumidificação observa-se que o mesmo foi eficiente para as sementes, visto que permitiu elevar os níveis de umidade. A partir dos resultados foi definido que o processo de reumidificação mais adequado para o estudo das sementes de cevadilha vacariana deve ser desenvolvido em temperaturas de 40 °C por um período de 36 h.

Em um estudo comparativo entre as sementes *in natura* e reumidificada foi observado que as sementes *in natura* tanto para a temperatura de 40 °C como para de 60 °C apresentaram uma maior facilidade de retirada de umidade. O modelo de GAB representou satisfatoriamente as isotermas das sementes reumidificadas.

No comparativo da cinética de secagem, conclui-se que as sementes reumidificadas apresentaram maior dificuldade da retirada de água, obtendo menores valores da taxa de secagem. O modelo de Midilli apresentou boa representação dos dados de secagem para sementes de cevadilha vacariana reumidificadas.

Por fim, concluir-se que o processo reumidificação pode ser apresentado como um estudo pré-germinativo, uma vez que permitiu elevar tanto o vigor quanto a germinação das sementes de cevadilha vacariana. A partir do estudo de reumidificação seguido de secagem a pior condição, referente ao ensaio 4, passou de 23 % para 82 % de sementes germinadas, e a melhor condição, referente ao ensaio 1, passou de 58 % para 84,33 % de sementes germinadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que para as próximas etapas do trabalho sobre este tema sejam abordados os seguintes itens:

- analisar os ensaios de secagens das sementes de cevadilha vacariana reumidifica nas outras condições de secagens, nos quais foram estudadas as sementes cevadilha vacariana *in natura*;

- estudar a secagem das sementes cevadilha vacariana em diferentes condições de temperaturas e velocidades do ar de secagem;

- realizar o estudo das isotermas de sorção em outros níveis de temperaturas;

- desenvolver estudos semelhantes aos que foram efetuados neste trabalho utilizando outros tipos de secadores;

- aperfeiçoar o processo de germinação pela quebra de dormência;

- aplicar outros métodos para determinar a qualidade da semente;

- verificar outras condições de estudo para o processo de reumidificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, 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*, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AMGARTEN, D. R. *Determinação do volume específico de poros de sílicas cromatográficas por dessorção de líquidos em excesso*. Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Estadual de Campinas (Mestrado), p.10-28, 2006.

AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering*, v.61, p.297-307, 2004.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. *A química do processamento têxtil*. ed.: Química Nova, v.19, p.320-330, 1996.

ALMEIDA, F. DE A. C.; FONSECA, K. S.; GOUVEIA, J. P. G. Secagem natural de gergelim e determinação da umidade de equilíbrio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.3, p.343-348, 1999.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v.59, n.1, p.99-104, 2003.

AOAC, Association of Official Analytical Chemists. *Official methods of analysis*. 16th ed. Washington D.C.: AOAC, v.2, 1997.

ARNOSTI JR., S. *Desenvolvimento de um Secador Transportador do Tipo Esteira com Escoamentos Cruzados e Caracterização de Sementes de Gramíneas*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (Doutorado), p.232, 1997.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.3, p.449-58, 2004.

BEHLING, H.; PILLAR, V. D.; BAUERMANN, S. G. Late quaternary grassland (Campos), gallery forest, fire and climate dynamics, studied by pollen, charcoal and multivariate analysis of the São Francisco de Assis core in Western Rio Grande do Sul (Southern Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, v.133, p.235-248, 2005.

BERRETTA, E. J. Ecophysiology and management response of the subtropical grasslands of Southern America. p.939-946. *Proceedings...19th INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS*. São Pedro, São Paulo, p.11-21. 2001.

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*. Ed.: Unicamp, p.245-266, 1992.

BOLDRINI, I. I.; LONGHI-WAGNER, H. M., BOECHAT, S. C. *Morfologia e Taxonomia de Gramíneas sul-rio-grandenses*. Porto Alegre, p.95, 2005.

BRACCINI, A. L.; REIS, M. S.; SEDIYAMA, C. S.; SCAPIM, C. A.; BRACCINI, M. C. L. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja após o processo de hidratação-desidratação e envelhecimento acelerado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.34, n.6, p.1053-1066, 1999.

BROD, F. P. R.; ALONSO, L. F. T.; PARK, K. J. *Secagem de Produtos Agrícolas*. Rio de Janeiro, 1999.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oil seeds. *An VI books published by Van Nostran Dreinhold*, New York, p.450, 1992.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layer. *Journal of American Chemistry Society*. v.60, p.309-312, 1938.

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*, v.29, n.2, p.28-37, 2007.

CARVALHO, N. M. Vigor de sementes. In: CÍCERO, S. M.; MARCOS FILHO, J.; SILVA, W. R. *Atualização em produção de sementes*. Campinas: Fundação Cargill, p.207-223, 1986.

CAVARIANI, C. *Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar*. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade de São Paulo (Doutorado) São Paulo, p.4-68 1996.

CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de Alimentos. *Embrapa Cerrados – Documentos 276*, Planaltina-DF, p.9-34, 2010.

CEZAR, I. M.; QUEIROZ, H. P.; THIAGO, L. R. L. de S.; CASSALES, F. L. G.; COSTA, F. P. Sistema de Produção de Gado de Corte no Brasil: Uma Descrição com Ênfase no Regime Alimentar e no Abate. *Embrapa Gado de Corte – Documentos, n° 151*, Campo Grande, p.10-24, 2005.

CORRÊA, L. A. de. Características Agronômicas das Principais Plantas Forrageiras Tropicais. *Embrapa Pecuária Sudeste – Comunicado Técnico 35*, São Carlos, p.1-5, 2002.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.

COSTA, A. B. S. *Secagem Convectiva de Folhas de Hortelã: Análise Baseada no ajuste de Correlações Empíricas, Superfícies de Respostas e Redes Urbanas*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (Mestrado). p.4-20, 2013.

CREMASCO, M. A. *Operações unitárias em sistemas particulados*. São Paulo: Ed.: Blucher, 2012.

CYPRIANO, M. P.; HORTA, L. F.; REIS, G.; PERES, M. S. *Variedades de Pastagens: Área Técnica – Econômica* (Banco Original), 2012. Home Page disponível em: (www.bancooriginal.com.br), acesso em 18/11/2014.

DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G.; MASON, R. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, v.55, n.2, p.139-146, 2002

DERESZ, F. Produção de Leite de Vacas mestiças Holandesas x Zebu, em pastagens de capim-elefante com diferentes cargas. *Reunião anual da sociedade Brasileira de zootecnia*, 17. Anais... Lavras-MG, p.232, 1992.

DOMINGUES, O. C. E. *Sistema informal de sementes: causas, conseqüências e alternativas*. Pelotas: Ed.: Universitária/UFPEL, p.207, 2000.

DUADIN, J. D. Calculdês cinétiques de séchage par Lair chaudières produits biologiques solides. *Sciences des Aliments*, v.1, n.3, p.1-36, 1983.

DUARTE, E. F.; CARNEIRO, I. F.; SILVA, DA N. F.; GUIMARÃES, N. N. R. Características físicas e germinação de sementes de *Dyckia goehringii* Gross & Rauh (BROMELIACEAE) sob diferentes temperaturas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.40, n.4, p.422-429, 2010.

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

FARIA, de V. P.; PEDREIRA, C. G. S.; SANTOS, F. A. P. Evolução do uso de pastagens para bovinos. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 13*, Piracicaba, 1996. Anais... Piracicaba: FEALQ, p.1-14, 1997.

FELIPE, C. A. S. *Influência das Variáveis de Processo na Qualidade de Sementes de Soja Submetidas à Secagem em Leito Deslizante e Escoamentos Concorrentes*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (Mestrado), 1999.

FERRARI FILHO, E. *Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento*. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade federal do Rio Grande do Sul (Mestrado), p.50, 2011.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; ANTÔNIO MARQUES PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.47, p.855-862, 2012.

FLORES, C. G.; HAMM, J. B. S.; ALMEIDA, A. R. F. de.; OLIVEIRA, J. C. P. Estudo do processo de reumidificação de sementes de azevém (*Lolium multiflorum* L.). **Anais... XXV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE 2013**. Passo Fundo, 2013.

FREITAS, A. K. *Perfil de ácidos graxos da vegetação e da carne bovina produzida no bioma pampa*. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (doutorado), p.1-19, 2010.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FUMAGALLI, F.; Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de *Brachiária brizantha*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (Doutorado), p.3-73, 2007.

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

GARCIA, J. Variedades forrajeras. In: Jornada de Forrajeras, 1988, Colonia del Sacramento. Anais... Colonia del Sacramento: *Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger"/Estación Experimental La Estanzuela*, p.1-3, 1988.

GARCIA, R.; PEREIRA, O. G.; ALTUVE, E. M.; ALVARENGA, E. M. Efeito do potencial hídrico na germinação de sementes de três gramíneas forrageiras tropicais. In: *XXXIII REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA*, 2. Fortaleza, 1996. Anais...Fortaleza: SBZ, p.160-162. 1996.

GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3ª Edição, México, CECSA, 1998.

GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Caracterização e isoterma de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.4, n.2, p.157-165, 2002.

HAMM, JANICE BOTELHO SOUZA. *Análise da secagem de Azevém (Lolium Multiflorum) em leito fixo com escoamento de ar paralelo*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa (Mestrado), p.1-51, 2013.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Estatísticas sobre Unidades de Conservação nos Biomas Brasileiros, 2004. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em 20/06/2015.

JUNIOR, A. 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*, v.3, n° 3, p.349-353, 1999.

KANNAN, AKEL FERREIRA. *Análise da secagem de Cornichão (Lotus corniculatus L.) em Leito Fixo com Escoamento de ar Paralelo*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa (Mestrado), p.1-49, 2014.

KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isoterma de dessecamento de cogumelo fresca e desidratado osmoticamente. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, n.28, p.828-834, 2005.

LIMA, de A. A.; ESCALANTE, A. V.; CESCINETTO, A. O.; DACAL, E. M. DE R. S.; VALLE do E. R.; COSTA, F. P.; FIGLIOLINI, dos H. J.; BANDINI, O. Boas Práticas Agropecuárias – Bovinos de corte. *Embrapa Gado de Corte*, Campo Grande – MS, p.15-16, 2006.

LUCCA. O. A Importância da sanidade na produção de sementes de alta qualidade. *Revista Brasileira de Sementes*. Brasília, v.7, n.1, p.113-23, 1985.

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*, n.3, v.9, p.29-37, 1987.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. *Drying technology*, v.21, p.1759-1780, 2003.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, n.1, v.29, p.75-97, 1996.

MAIA, M. S. *Secagem de sementes de azevém anual (Lolium multiflorum Lam.) com ar ambiente forçado*. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas (Doutorado), p.108, 1995.

MAIA, M. S.; SILVA, G. M.; PESKE, S. T.; MORAES, C. O. C.; MEDEIROS, R. B. Produção de sementes de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius) em função da cronologia de desenvolvimento dos perfilhos reprodutivos. *Revista Brasileira de Sementes*, Pelotas, n.3, v.28, p.13-20, 2006.

MAIXNER, A. R. *Gramíneas forrageiras perenes tropicais em sistemas de produção de leite a pasto no noroeste do Rio Grande do Sul*. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria (Mestrado), p.15-65, 2006.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Biblioteca Nacional de Agricultura (BINAGRI), nº 1, 2009.

MARCOS FILHO, J.; TOLEDO, F. F. “*Manual de Sementes: Tecnologia da Produção*” Ed.: CERES, São Paulo, SP, p.224, 1977.

MARCOS FILHO, J.; CÍCERO, S. M.; SILVA, W. R. Avaliação da qualidade das sementes. *Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz*, Piracicaba, p.230, 1987.

MARTINS, P. C. *Secagem de cebola (Allium cepa L.) em camada delgada: Estudo da cinética e das características do produto desidratado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, (Mestrado), p.6-55, 2002.

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*, n.3, v.11, p.301-306, 2007.

Mc CORMICK, P. Y. *Solids Drying Fundamentals*. PERRY, R. H. and CHILTON, C. H. *Chemical Engineer's Handbook*. Editora McGraw-Hill, 5ª edição p.4-20, 1983.

- McLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. The determination of sorption isotherm and isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*, v.13, n.35, p.267-280, 1998.
- MEISAMI-ASL, E.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A.; TABATABAEEFAR, A. Mathematical modeling of moisture content of apple slices (Var. Golab) during drying. *Pakistan Journal of Nutrition*, v.8, n.6, p.804-809, 2009.
- MENGES, H. O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, v.77, n.1, p.119-125, 2006.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A New model for single layer drying. *Drying Technology*, v.20, n.07, p.1503-1513, 2002.
- MINERVA FOODS. Mercado Brasileiro, 2014. Home Page disponível em: (http://ri.minervafoods.com/minerva2012/web/default_pt.asp?idioma=0&conta=28&v=1), acesso em 16/11/2014.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, p.513-518, 2005.
- MORAES, A. *Produtividade animal e dinâmica de uma pastagem de pangola (Digitária decumbens stent). Azevém (Lolium multiflorum Lam) e trevo branco (Trifolium repens L.), submetidas a diferentes pressões de pastejo*. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Doutorado), p. 200, 1991.
- MORAES, C. O.; OLIVEIRA, J. C. P. Avaliação preliminar de genótipos d *Bromus auleticus* Trinius. Embrapa/CNPO – *Circular Técnica 5*. Bagé-RS, p.20, 1990.
- MORAES, C. O. C.; OLIVEIRA, J. C. P.; PAIM, N. Comparação de *Bromus auleticus* Trinius com espécies perenes de inverno. Embrapa CPPSul, Bagé p.9-20, 2000.
- 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.
- MORTOLA, V. B.; MEILI, L.; PINTO, L. A. A. Determinação das isotermas de equilíbrio para cebola, gelatina e farinha de pescado: análise dos modelos de GAB, BET e Henderson. *Revista Veter*, 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*, n.53, p.75-81, 2002.
- NERY, M. C.; NERY, F. C.; SILVA, D, R, G.; SOARES, F. P. Produção de Sementes Forrageiras. *Boletim Técnico*, 88. Universidade Federal de Lavras, MG, p.1-47, 2012.
- OLIVEIRA, E. G. de. *Secagem de spirulina platensis: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande (Mestrado), p.5-18, 2006.

OLIVEIRA, J. C. P.; MORAES, C. O. C. Distribuição da Produção e qualidade de forragem de *Bromus auleticus* Trinius. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.28, n.3, p.391-398, 1993.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

PAGLARINI, C. de S.; da SILVA F. S.; PORTO, A. G.; Piasson, D.; dos SANTOS, P. Histerese das isotermas de sorção da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) variedade manteiga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.3, p.299-305, 2013.

PALMEIRA, J.; SILVA, E.; CARDOSO, F.; DO NASCIMENTO, J.; DA SILVA, M. Isotermas de dessorção em frutos de cajá (*Spondia lútea* L.). *Revista Brasileira de Almacenamiento*, v.29, n° 2, p.76-81, 2004.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. Campinas-SP, p.17-84, 2007.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Considerações termodinâmicas das isotermas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.10, n.1, p.83-94, 2008.

PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M. D.; ROTA, G. R. M. *Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos*. 3ª edição. Pelotas, Editora Rua Pelotas, p.573, 2012.

POPINIGIS, F. *Fisiologia da semente*. Brasília, 1985. 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*. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, (Pós-Doutorado), 2010.

PORPINO, K. K. P. *Biossorção de ferro (II) por casca de caranguejo ucidés cordatus*. Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba (Mestrado), p.20-40, 2009.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. Modelos Matemáticos de Simulação de Secagem de Grãos. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, p.59, 1985.

ROBERTS, E.H. *Loss of viability and crop yields*. In:ROBERTS, E.H. (Ed.). *Viability of seeds*. London:Chapman and Hall, p.307-320, 1974.

ROCHA, L. C. B. de L. *O nutritivo cardápio do rebanho* - Globo Rural. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT239040-18289,00.html>>. Acesso em: 24 de novembro de 2014.

SALOMONI, E.; LEAL, J. J. B.; COLLARES, J. P. *Acasalamento de outono/inverno: porque e quando utilizar*. Bagé EMBRPA-CPPSUL, 1994.

SANTOS, dos P.; SILVA, F. S. da.; PORTO, A G.; SILVA, F. T .C. da.; FURTADO, G de F. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana da

variedade terra (*musa sapientum*, linneo). *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v.4, n.2, p.218-234, 2010.

SANTOS, F. A. P.; MARTINEZ, J. C.; VOLTOLINI, T. V.; NUSSIO, C. M. B. Associação de plantas forrageiras de clima temperado e tropical em sistemas de produção animam de regiões subtropicais. *20º Simpósio sobre Manejo da pastagem...Anais*, São Paulo- SP, p.215-246, 2003.

SANTOS, A. B. dos. *Morfogênese de gramíneas nativas do Rio Grande do Sul (Brasil) submetidas a pastoreio rotativo*. Programa de Pós-Graduação em Agrobiologia, Universidade Federal de Santa Maria (Mestrado), p.14-15, 2012.

SCHWANKE, R, O. *Determinação da difusividade de hidrocarbonetos aromáticos em zeólitas y por métodos cromatográficos*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina (Mestrado), 2003.

SILVA, A. S. *Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Mestrado), 2008.

SILVA, C. K. F. da.; *Aplicação da Análise Inversa ao Modelo Difusional de Transferência de Massa*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba (Mestrado), p.5-39, 2007.

SILVA, G. M. da. *Efeito de densidade de semeadura e época de colheita sobre o rendimento e a qualidade de sementes de cevadilha vacariana (Bromus auleticus Trinius)*. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas (Mestrado), p.36, 2001.

SILVA, G. M. da.; MORAES, C. O. C. *Cevadilha Vacaraiana (Bromus auleticus TRINIUS): Histórico, Utilização e Perspectivas*. Embrapa Pecuária Sul – Bagé, p.6-7, 2009.

SILVA, G. M. da.; MAIA, M. B.; MAIA, M. S. *Qualidade de Sementes Forrageiras de Clima Temperado*. Embrapa Pecuária Sul – Bagé, p.15, 2011.

SILVA, G. M. da.; MAIA, M. B.; MAIA, M. S. Influência do peso da semente sobre a germinação e o vigor de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius). *Revista Brasileira de Agrociência*, v.13, p.123-126, 2007.

SILVA, G. M. da.; CARDOZA, T. M.; MAIA, M. de S.; SILVA, M. S. da.; MORAES, C. O. C. Dormência de sementes em diferentes genótipos de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius) In: *LOS RECURSOS fitogeneticos del genero Bromus en el Cono Sur*. Montevideo: PROCISUR (Diálogo, 56), p.69-72, 2001.

SILVA M. M.; GOUVEIA J. P. G.; ALMEIDA F. DE A. C. Dessorção e calor Isostérico em polpa de manga. *Revista Brasileira Agrícola e Ambiental*, v.6, n.1, p.123-127, 2002.

SILVEIRA, L. R. M.; OLIVEIRA J. C. P.; MORAES, C. O. C.; MARQUES, D. G. Análise da diversidade genética em acessos de *Bromus auleticus* TRINIUS. *Revista Ciência Rural*, v.27, n.3, p.381-385, 1997.

SILVEIRA, V. C. P.; VARGAS, A. F. da C.; OLIVEIRA, J. O. R.; GOMES, K. E.; MOTTA, A. F. Qualidade da pastagem nativa obtida por diferentes métodos de amostragem e em diferentes solos na Apa do Ibirapuitã, Brasil. *Revista Ciência Rural*, v.5, n.3, p.582-588, 2005.

SILVEIRA, V. C. P.; GONZAGA, S. S.; OLIVEIRA, J. C. P.; GOMES, K. E. Sistema de Criação para a Terminação de Bovinos de Corte na Região Sudoeste do Rio Grande do Sul. Embrapa Pecuária Sul, Bagé – RS, *Sistemas de Produção 1 – versão eletrônica*, 2008.

SOARES, G. C.; DALL'AGNOL, M.; MORAES, C. O. Caracterização da produção de forragem de uma população de cevadilha vacariana (*Bromus auleticus* Trinius). In: *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, p. 37, 2000, Viçosa, MG. Anais...Disponível em: ([HTTP://www.sbz.org.br/anais2000/forragem/704.pdf](http://www.sbz.org.br/anais2000/forragem/704.pdf)). Acesso em: 31 de dezembro de 2014.

SOUZA, de F. H. D. As Sementes de Espécies Forrageiras Tropicais no Brasil. Embrapa Gado de corte – *Circular Técnica*, nº 4, Campo Grande – MS, p.1-20, 1980.

SOUZA, de F. H. D. Produção de sementes de Gramíneas Forrageiras Tropicais. Embrapa Pecuária Sudeste – *Documentos*, Nº 30, São Carlos – SP, p.5-9, 2001.

TAMANINI, R. H. V. S. *Pastejo e época de colheita na qualidade fisiológica de sementes de cevadilha vacariana (Bromus auleticus Trinius)*. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas (Mestrado), p.44, 2002.

TEODORO, A. L.; OLIVEIRA, M. V. M.; LONGO, M. L.; RUFINO JUNIOR, J.; VARGAS JUNIOR, F. M.; LUZ, D. F. Influência do revestimento de sementes e tratamento com inseticida no desenvolvimento e características nutricionais da *Brachiaria brizantha* cv. *Revista Agrarian*, v.4, n.13, p.213-221, 2011.

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*. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, v.1, cap.6, 1992.

TOLEDO, de F. F.; MARCOS FILHO, J. *Manual de Sementes: tecnologia da produção*. São Paulo: Ceres, p.224, 1977.

TONISSI, de R. H.; GOES, de B.; SILVA, da L. H. X.; SOUZA, de K. A. *Alimentos e alimentação animal*. Ed.:UFGD, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS, p. 9-76, 2013.

TRAVERSO, J. E. Colecta, conservacion y utilizacion de los recursos de interes forrajero nativo y naturalizado. In: *LOS RECURSOS fitogeneticos del genero Bromus en el Cono Sur. Montevideo: PROCISUR (Diálogo, 56)*, p.7-18, 2001.

VALENTIM, J. F.; MOREIRA P. Produtividade de Forragem de Gramíneas e Leguminosas em Pastagens Puras e Consorciadas no Acre. Embrapa Acre – *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 33, p.9-29, 2001.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on Rice drying models. *Transactions of the ASAE*, v.28, p.296-301, 1985.

VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. *Testes de vigor em sementes*. Jaboticabal: FUNEP, p.164, 1994.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. *International Journal of Food Engineering*, v.8, n.1, p.1-19, 2012.

VILLELA, F. A. *Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho*. Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de São Paulo (Doutorado), p.104, 1991.

ZONTA, J. B.; J. B.; ARAUJO, E. F.; ARAUJO R. F.; DIAS, L. A. dos S. Diferentes tipos de secagem: efeitos na qualidade fisiológica de sementes de pinhão manso. *Revista Brasileira de Sementes*, v.33, n.4 p.721-731, 2011.

YANAKA, F. Y. *Caracterização Molecular e Isoenzimática de Acesso de Bromus auleticus TRINIUS (EX-NEES)*. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Porto Alegre (Mestrado), p.72-79, 2002.

GLOSSÁRIO

Autogamia - As plantas autógamas são aquelas que realizam preferencialmente autofecundação (acima de 95%). A autofecundação ocorre quando o pólen (gameta masculino) fertiliza um óvulo (gameta feminino) da mesma planta. Disponível em: <<http://www.bespa.agrarias.ufpr.br/paginas/livro/capitulo%204.pdf>>. Acesso: 20/06/2015.

Cotilédones - são as primeiras estruturas que surgem dos embriões das espermatófitas, irrompendo durante a germinação das sementes. Dois grupos de angiospermas, especialmente, recebem seus nomes de acordo com o número de cotilédones que cada embrião de uma determinada semente apresenta (monocotilédones e dicotiledôneas). Disponível em: <http://www.klickeducacao.com.br/bcoresp/bcoresp_mostra/0,6674,POR-853-1797,00.html>. Acesso: 20/06/2015.

Fecundação Cruzada - consiste quando a fecundação dos gametas é originária de indivíduos diferentes, porém de mesma espécie, ocorrendo a troca de pólen para a fecundação. Disponível em: < <http://www.significados.com.br/fecundacao/> >. Acesso: 06/06/2015.

Plantas Herbáceas - são plantas com caule não lenhoso ou semi-lenhoso de porte variado, podendo adquirir a altura e os efeitos de um arbusto, são conhecidas como plantas que não geram madeira, também chamadas de ervas. Disponível em: < <http://biodiversidade-somincor.pt/web/index.php/pt/grupos/8-lista-de-grupos/15-herbaceas> >. Acesso: 06/06/2015.

Rotação de Culturas - consiste em alternar, anualmente, espécies vegetais, numa mesma área agrícola. As espécies escolhidas devem ter, ao mesmo tempo, propósitos comercial e de recuperação do solo. Disponível em: < <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/rotacao.htm> >. Acesso: 06/06/2015.

Solos Hidromórficos - são solos desenvolvidos em condições de excesso d'água, ou seja, sob influência de lençol freático. Nada mais é do que solos sujeitos a encharcamento temporário ou permanente. Disponível em: <http://agricultura.isa.utl.pt/agribase_temp/solos/soloshid.ht>. Acesso: 06/06/2015.

Valor Cultural - determina a qualidade de uma semente, em função do poder de germinação e do grau de pureza. Disponível em: < <http://www.coanconsultoria.com.br/images/Artigos/Escolha%20das%20Semenrtes%20na%20Forma%C3%A7%C3%A3o%20de%20Pastagens.pdf> >. Acesso: 20/06/2015.

APÊNDICE A

Figura A1 – Resultados obtidos para a ρ_{real} através da picnômetria gasosa

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapyc 1200e V4.01
Analysis Report
Thu Oct 17 16:05:04 2013
User ID: UNIPAMPA
Sample Parameters
Sample ID: CEVADILHA
Weight: 1.5777 g
Analysis Parameters
Cell Size - Small
V Added - Small: 12.6799 cc
V Cell: 19.0307 cc
Analysis Temperature: 19.5 C
Target Pressure: 19.0 psig
Type of gas used: DryHelium
Equilibration Time: Auto
Flow Purge: 3.0 min.
Maximum Runs: 10
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0050 %
Analysis Results
Deviation Achieved: 0.2491 %
Average Volume: 1.1176 cc
Volume Std. Dev.: 0.0033 cc
Average Density: 1.4117 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0042 g/cc
Coefficient of Variation: 0.2997 %

Run Data

RUN VOLUME (cc) DENSITY (g/cc)

1	1.1034	1.4299
2	1.1243	1.4033
3	1.1135	1.4168
4	1.1234	1.4044
5	1.1160	1.4137
6	1.1178	1.4115
7	1.1194	1.4094
8	1.1134	1.4170
9	1.1177	1.4115
10	1.1216	1.4066

Página 1 de 1

APÊNDICE B

Publicação de Trabalho até o Presente Momento

L. C. de OLIVEIRA; R. P. de FREITAS; J. C. P. OLIVEIRA; A. R. F de ALMEIDA. ANÁLISE DA SECAGEM DE CEVADILHA VACARIANA (*BROMUS AULETICUS* T.) EM LEITO FIXO COM ESCOAMENTO DE AR PARALELO. **XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos, 2015.**

OLIVEIRA, L. C. de; FLORES, C. G.; OLIVEIRA, J. C. P.; ALMEIDA, A. R. F. ESTUDO DAS ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE SEMENTES DE CEVADILHA VACARIANA (*Bromus auleticus* TRINIUS), p. 6106-6113. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014** [= **Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2**]. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 2359-1757.

OLIVEIRA, L. C. de; ALMEIDA, A. R. F. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E FISIOLÓGICAS DE SEMENTES DA ESPÉCIE *Bromus auleticus* TRINIUS. In: VI Simpósio de Energia e Meio Ambiente. Bagé, 2014.

OLIVEIRA, L. C. de. CARACTERIZAÇÃO FÍSICAS E FISIOLÓGICA DE CEVADILHA VACARIANA (*Bromus auleticus* TRINIUS). In: **Anais do V Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. Bagé, 2013.** ISSN 2317-3203.