



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

AKEL FERREIRA KANAAN

**ANÁLISE DA SECAGEM DE CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FIXO
COM ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

Bagé
2014

AKEL FERREIRA KANAAN

**ANÁLISE DA SECAGEM DE CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FIXO
COM ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

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

Orientador: André Ricardo Felkl de Almeida

Co-orientador: João Carlos Pinto Oliveira

Bagé
2014

AKEL FERREIRA KANAAN

**ANÁLISE DA SECAGEM DE CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FIXO
COM ESCOAMENTO DE AR PARALELO**

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

Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Dissertação defendida e aprovada em: 03 de setembro de 2014.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA

Prof.^a. Dr.^a. Gabriela Silveira da Rosa
UNIPAMPA

Prof. Dr. César Augusto da Rosa
FURG

Dedico esta dissertação aos meus amados pais,
Akel Nemer Kanaan Neto e Deisi Machado
Ferreira e a minha irmã Kelin Ferreira Kanaan
por todo apoio e amor recebido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, esta energia que rege o universo, a qual sempre guiou meus passos para o melhor. Agradeço pela minha vida, minha família e amigos.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida por toda confiança, carinho e atenção confiados a mim ao longo de toda essa jornada. Aprendi muito com o senhor e sempre vou levá-lo como um exemplo de pessoa e profissional a ser seguido.

As duas mulheres mais importantes na minha vida, minha mãe Deisi Machado Ferreira e minha irmã Kelin Ferreira Kanaan. Sou grato por todo amor imensurável que recebo de vocês, por todo o carinho, dedicação, educação e força de vontade. Vocês sempre serão o meu maior motivo de luta e motivação para seguir em frente.

Ao meu pai Akel Nemer Kanaan Neto e ao meu irmão Luis Francisco Kanaan pelo carinho e amor recebido e por me proporcionarem momentos de distração tão importantes para mim.

A minha avó Zani Machado por todos os momentos de alegria, pelos muitos ensinamentos que recebi, pelo amor e amizade. Por todo o apoio, compreensão e paciência nas horas de dificuldade que compartilhei com você. Ao espírito de meu avô materno, Dario Ferreira, que sempre foi motivo pessoal de inspiração nessa jornada.

A minha prima Renata Carvalho por todo o grande amor recebido.

A Profa. Dra. Luciana Machado Rodrigues por ter sempre em encorajado e acreditado em meu potencial na vida acadêmica.

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

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Aline Arim, Vanessa Rosseto, Camila Flores, Janice Botelho, Lucas Carvalho, Artur Moura e Ana Paula Roquete pelo grande apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

Ao meu amigo Bruno Amaral por todas as caronas e conversas filosóficas durante todo o período letivo deste curso de mestrado.

As minhas maiores amigas Camila Dariva e Marilice Bretanha pela grande amizade, amor incondicional, troca de idéias, risadas, lágrimas, abraços, conflitos, conquistas e anseios trocados. Sem a força de vocês duas eu jamais teria conseguido. Vocês são maravilhosas. Agradeço ao destino por ter me agraciado com a presença de vocês em minha vida.

A CAPES pelo apoio financeiro.

“Il faut bien que je supporte deux ou trois chenilles si je veux connaître les papillons.” –
Antonie de Saint-Exupéry

“Knowing yourself is the beginning of all wisdom.” – Aristóteles

“A Deus não importa o que você foi, mas o que será a partir deste momento.” – Oscar Wilde

RESUMO

A crescente necessidade da utilização de espécies forrageiras de estação fria na região sul do país vem determinando uma grande demanda por sementes de qualidade. Entre as leguminosas se destaca o cornichão (*Lotus corniculatus* L.), que é uma leguminosa forrageira oriundo da Europa e da região mediterrânea. Esta leguminosa forrageira tem na versatilidade a sua maior vantagem, visto que apresenta produção de forragem na primavera, no verão e no outono, possui resistência à seca e ao encharcamento temporário do solo e apresenta boa persistência da massa verde. Além disso, as sementes deste tipo de espécie podem ser misturadas com espécies de inverno, o que aumenta o rendimento da matéria seca, dá uma melhor distribuição da forragem ao longo do ano e agrega uma melhora na qualidade das pastagens. Apesar dessas vantagens, as sementes de cornichão comercializadas possuem ainda uma baixa qualidade. Esse fato é decorrente de um sistema de fiscalização ineficiente, associado à dificuldade de produção e beneficiamento do produto. Outro problema que o produtor de sementes desta espécie enfrenta é a dormência tegumentar, isto é, o revestimento da semente (tegumento) é impermeável e não permite que a água necessária para a germinação chegue ao interior da semente. Na literatura, diversos trabalhos têm relatado que cada vez mais há um aumento na demanda de sementes forrageiras em função do melhoramento do campo nativo e das pastagens cultivadas. Diante de um mercado tão promissor, a obtenção de sementes de melhor qualidade ainda apresenta dificuldades que vão desde a fase de produção no campo, onde as sementes são colhidas precocemente em relação ao ponto de maturidade fisiológica devido ao processo de perda natural, até seu beneficiamento, onde o processo de secagem apresenta-se como uma etapa limitante que necessita de uma atenção muito especial para evitar perdas fisiológicas no produto final. De um modo geral, a secagem é definida como a remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material através da transferência de calor e de massa. A secagem tem em sua essência a finalidade de assegurar a conservação de um produto por meio da redução do seu teor de água. No caso de materiais orgânicos, como é o caso de sementes, a redução no teor de água deve ser efetuada até o ponto em que a concentração de açúcares, ácidos, sais e outros componentes, sejam suficientemente elevados para reduzir a atividade de água e inibir, portanto, o desenvolvimento de micro-organismos. Na tecnologia de produção de sementes de alta qualidade a secagem é tida com uma das etapas de maior importância, pois permite a redução do teor de água em níveis adequados para o

armazenamento e comercialização (12 a 15 % de umidade), preserva as sementes de alterações físicas e químicas induzidas pelo excesso de umidade, torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento e possibilita colheitas próximas da maturação fisiológica. 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. De acordo com o que foi exposto, o presente trabalho de mestrado teve como objetivo realizar um estudo sobre o processo de secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em um secador de leito fixo com fluxo de ar paralelo. Para alcançar tal objetivo, este trabalho foi dividido nas seguintes etapas: caracterização física e fisiológica das sementes, análise do processo de reumidificação das sementes, estudo das isotermas de dessecamento das sementes reumidificadas e avaliação dos efeitos da variação da temperatura, da velocidade do ar e da altura da bandeja sobre a cinética de secagem e qualidade fisiológica do produto final. Os dados experimentais mostraram que os resultados obtidos para a umidade em base úmida das sementes secas ficaram na faixa de 5 % para as secagens realizadas a 60 °C e em aproximadamente 8 % para as secagens realizadas a 40 °C. No que se refere à germinação, os valores encontrados estão na ordem de 44 a 59 % para as secagens realizadas neste estudo. Dentre as secagens, a que obteve o maior valor de germinação, com valor de 59 %, foi a realizada na condição de $T = 40$ °C, $v = 1,0$ m/s e $h = 1,0$ cm.

Palavras-chave: Secagem; Cornichão; Leito fixo; Isotermas; Forrageira.

ABSTRACT

The growing necessity for the use of cool-season forage species in the southern region of the country has indicated a high demand for quality seeds. Among the legumes, the birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) is a forage legume which is originated in Europe and in the Mediterranean region. This versatility in the forage legume has its biggest advantage, since it presents forage production in the spring, summer and autumn, is resistant to drought and temporary waterlogging and shows good persistence of green mass. Furthermore, seeds of such kind can be mixed with winter species, which increases the yield of dry matter, gives a better distribution of the material throughout the year and adds an improvement in the quality of pastures. Despite these advantages, the seeds of birdsfoot marketed still have a poor quality. This fact is a result of an inefficient system of monitoring and difficulties associated to production and processing of the product. Another problem is that the seed producer of this species is facing cutaneous numbness, that is, the seed coat (tegument) is impermeable and does not allow the water, necessary for germination to reach the interior of the seed. In the literature, several studies have reported that there is an increasing demand for an increase in forage seed due to the improvement of native grassland and cultivated pastures. Faced with such a promising market, obtaining better quality seed still presents difficulties ranging from the production phase of the field, where the seeds are harvested early in relation to physiological maturation due to the natural loss process until its processing where the drying process is presented as a limiting step that requires particular attention to avoid losses in physiological final product. In general, drying is defined as the removal voluntary or not, full or partial, of a liquid or gaseous phase of any material by the transfer of heat and mass. Drying has its essence in order to ensure the preservation of a product through reduction of water content. In the case of organic materials, such as seeds, reduction in water content must be performed to the extent that the concentration of sugars, acids, salts and other components are sufficiently high to reduce the water activity and inhibit, therefore, the growth of microorganisms. In the production of high quality seeds the drying technology is seen with one of the most important steps, since it allows reducing the water content suitable for storage and marketing levels (12 to 15% moisture), preserves the seeds from physical changing and chemical induced excess moisture, makes it possible to maintain the initial quality during storage and enables the next harvest physiological maturity. However, the drying process, whatever it may be, should occur in a controlled and uniform manner in order to avoid high

temperature and humidity gradients within the material that could result in loss of quality of the final product. Towards to it, this paper aimed to conduct a study on the drying of seeds of birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) in a fixed bed dryer with parallel air flow. To accomplish this goal, this study was divided into the following steps: physical and physiological seed characterization, analysis of rewetting seed process, study of desorption isotherms of the rewetted seeds and evaluation the effects of temperature, air velocity and the height of the tray on the drying kinetics and physiological quality of the final product. The experimental data showed that the results for the dry seeds of U_{BU} were in the range of 5 % to drying carried out at 60 ° C and about 8% to drying carried out at 40 ° C. With regard to seed germination, the values are found in a range of 44 to 59% for the drying carried out in this study. The drying condition whom presented the highest germination value about 59 % was performed on $T = 40$ ° C, $v = 1,0$ m/s and $h = 1,0$ cm.

Keywords: Drying; Birdsfoot trefoil; Fixed bed; Isotherms; Forage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Produção mensal de matéria seca por hectare em campo natural no Rio Grande do Sul	5
Figura 2.2 – Períodos de utilização sob pastejo das principais forrageiras de clima temperado em uso no sul do Brasil	6
Figura 2.3 – Fotografia ilustrativa das sementes (a) e da plântula do cornichão (b).....	7
Figura 2.4 – Esquema ilustrativo do processo de secagem	11
Figura 2.5 – Representação da transferência de calor e de massa.....	12
Figura 2.6 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo	13
Figura 2.7 – Curva da taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade	13
Figura 2.8 – Histerese das isotermas de sorção	18
Figura 2.9 – Classificação das isotermas por Brunauer et al., (1938).....	20
Figura 3.1 – Sementes de cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	22
Figura 3.2 – Fluxograma organizacional dos experimentos.....	23
Figura 3.3 – Fotografia ilustrativa das partes superior e lateral do equipamento do ângulo de repouso	24
Figura 3.4 – Fotografia do equipamento utilizado para a determinação da densidade real	26
Figura 3.5 – Disposição das sementes de cornichão na caixa gerbox	27
Figura 3.6 – Estufa germinadora.	27
Figura 3.7 – Amostra de sementes no interior do banho termostaticado	27
Figura 3.8 – Esquema do recipiente empregado para a realização das isotermas	28
Figura 3.9 – Secador de bandeja com escoamento de ar paralelo de ar, (1) anemômetro, (2) balança, (3) painel de controle, (4) resistências elétricas e (5) soprador centrífugo	30
Figura 3.10 – Fotografia do interior do túnel de secagem.....	30
Figura 4.1 – Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas das sementes de cornichão	34
Figura 4.2 – Umidade em base úmida em função do tempo	35
Figura 4.3 – Isoterma de dessorção das sementes de cornichão ajustadas pelo modelo de Peleg.....	38
Figura 4.4 (a - d) – Taxa de secagem em função da umidade média	39

Figura 4.5 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo da Lei de Fick.....	42
Figura 4.6 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Page.....	42
Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Henderson.....	43
Figura 4.8 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Midilli.....	43
Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para a resposta umidade final	48
Figura 4.10 – Diagrama de Pareto para a resposta de germinação no ponto de vigor	49
Figura A1 – Resultados obtidos para ρ_{real} através da picnometria gasosa.....	64

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.....	29
Tabela 3.2 – Condições experimentais do planejamento experimental fatorial 2 ³ usado para avaliar as variáveis envolvidas no processo de secagem.....	32
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão	33
Tabela 4.2 – Análise do teste de germinação	36
Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros calculados a partir dos ajustes dos modelos de GAB, BET, Oswin, Peleg, e Henderson	37
Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste e difusividade efetiva para cada condição de secagem analisada pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, de Henderson e de Midilli	45
Tabela 4.5 – Umidades final, absoluta e relativa e germinação total das sementes secas.....	47

LISTA DE SIGLAS

AOAC – Association of Official Analytical Chemists

BET – Brunauer, Emmett e Teller

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GAB – Guggenheim-Anderson-de Boer

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MSU – Michigan State University

RS – Rio Grande do Sul

SEAPA – Secretaria da Agricultura do Estado

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

A	altura da bandeja	[L]
$a, b, c, n, k_2, k_3,$ n_1, n_2, C_{BET}	constantes	[-]
a_w	atividade da água	[-]
B, C	parâmetros de funções da temperatura do ar	[θ]
d	diâmetro equivalente	[L]
D	altura da base até o bocal	[L]
D_{cir}	diâmetro da circunferência	[L]
D_{ef}	difusividade efetiva	[L ² T ⁻¹]
D_L	coeficiente de difusão no líquido	[L ² T ⁻¹]
d_m	diâmetro médio	[L]
d_p	diâmetro de partícula	[L]
ds	diâmetro médio de sauter	[L]
e_0	espessura de sólidos na bandeja	[L]
F	distância do centro até o limite da pirâmide	[L]
G	germinação	[%]
H	área superficial exposta ao secador	[L ²]
h	horas	[θ]
k	constante de secagem	[T ⁻¹]
K, Ct	constante associada à entalpia	[-]
k_1, k_0	coeficientes de secagem	[T ⁻¹]
L	diâmetro médio maior	[L]
L_o	comprimento inicial	[L]
L_s	massa de sólido seco	[M]
m	massa total de sólido úmido	[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]
N	taxa de secagem	[MT ⁻¹ L ⁻²]
n	número de observações experimentais	[-]
N_c	taxa de secagem constante	[MT ⁻¹ L ⁻²]
θ	ângulo de repouso	[°]
P	constante de valor 1,6075	[-]
P_p	erro relativo	[%]
p, r, f	metade do valor do diâmetro do elipsóide	[L]
P_v	pressão de vapor da água pura	[ML ⁻¹ T ⁻²]
P_w	pressão parcial	[ML ⁻¹ T ⁻²]
Q	hipotenusa do ângulo	[L]
\sin	seno do ângulo	[°]
ss	sólido seco	[M]
t	tempo	[T]
T	temperatura do ar	[θ]
t_1	tempo inicial	[T]
t_2	tempo final	[T]

Ton	tonelada	[M]
UA	umidade absoluta	[MM ⁻¹]
U_{BU}	umidade base úmida	[MM ⁻¹]
U_i	umidade inicial	[MM ⁻¹]
UR	umidade relativa	[-]
U_{secas}	umidade das sementes	[MM ⁻¹]
v	velocidade do ar	[MT ⁻¹]
$V_{elipsoide}$	volume do elipsoide	[L ⁻³]
X	umidade	[MM ⁻¹]
x_l	espessura	[L]
X_1	umidade no tempo t_1	[MM ⁻¹]
X_2	umidade final no t_2	[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_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 do Cornichão no Brasil	4
2.2 Características do Cornichão	6
2.3 Análise da Qualidade da Semente	7
2.4 Importância da Secagem de Sementes.....	9
2.5 Secagem.....	10
2.5.1 Fundamentos da Secagem	10
2.5.2 Cinética de Secagem.....	14
2.5.3 Isotermas de Sorção.....	17
3 Materiais e Métodos	22
3.1 Sementes e Síntese Organizacional dos Experimentos	22
3.2 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.) .	23
3.3 Estudo do Processo de Reumidificação das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	27
3.4 Isotermas de Dessorção	28
3.5 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes em Secador de Leito Fixo com Fluxo de Ar Paralelo.....	30
4 Resultados e Discussão	33
4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.) .	33
4.2 Estudo do Processo de Reumidificação e de Germinação.....	34
4.3 Isotermas de Dessorção das Sementes Reumidificadas	37
4.4 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes Reumidificadas em Secador de Leito Fixo com Fluxo de Ar Paralelo	38
5 Conclusões	50
6 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	52
Referências Bibliográficas	53
Apêndice A	64

1 INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul a pecuária é uma das principais e tradicionais atividades econômicas com a produção alicerçada no campo nativo e aproximadamente 61% da sua cobertura vegetal é composta por pastagens nativas as quais apresentam um crescimento vegetativo em condições de clima quente. Porém, as estações de clima frio são as mais predominantes no estado e isto faz com que ocorra uma diminuição na produção de pastagens (MOTA et al., 1981). Para contornar este quadro, e suprir o vazio forrageiro, torna-se necessária à implementação de forrageiras adaptadas ao clima frio. Dentre as forrageiras mais adaptáveis aos períodos de clima frio tem-se o cornichão (*Lotus corniculatus* L.), uma leguminosa forrageira hiberna utilizada em ampla escala no Rio Grande do Sul.

De acordo com Diaz et al., (2005), o *Lotus corniculatus* L. é a espécie com maior importância agrônoma da América do Sul a qual se destaca pela sua boa capacidade colonizadora, sua permissão para ser empregada em consórcio com demais leguminosas e pela sua tolerância à acidez e à baixa fertilidade do solo (MELO e BARROS, 2003).

Curtis e McKersie (1984) informam que, apesar de suas qualidades, há alguns fatores negativos que influenciam o estabelecimento e persistência no cultivo do cornichão. Tais fatores podem ser atribuídos a sua suscetibilidade a agentes patogênicos causadores de doenças nas raízes e coroas (VIANDS et al., 1994), ao seu lento crescimento inicial e à baixa qualidade da semente (ETTLIN e LAVERACK, 1996). No que se refere à qualidade das sementes, o fator limitante se deve a baixa germinação. De modo geral os valores encontrados para o cornichão (*Lotus corniculatus* L.) são de aproximadamente 60 %, valor considerado baixo e que está vinculado ao processo de beneficiamento que tem como etapa limitante a secagem.

O termo secagem pode ser definido com a remoção de líquido de um sólido por evaporação. Sendo assim, o material úmido que entra em contato com o ar insaturado sofre uma transferência simultânea de calor e de massa promovendo uma diminuição do conteúdo de umidade do material e a umidificação do ar (HAGHI e AMANIFARD, 2008). Dois estágios definem o processo total de secagem, o aquecimento do material e a evaporação de umidade até alcançar a umidade de equilíbrio (STRUMILLO e KUDRA, 1986; KEEY et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2006; FOUST et al., 2008; SILVA et al., 2012).

Não existe um único equipamento que possa ser recomendado para a secagem de materiais orgânicos, porém os secadores mais indicados para a secagem de sementes são aqueles que reduzem os impactos mecânicos e térmicos que afetam a qualidade fisiológica.

Secadores de leito fixo são os mais utilizados na agricultura e na engenharia química pois operam com uma fina camada de material (FUMAGALLI, 2007). Produtos como grãos, sementes e carvão são comumente secos desta forma (FARIA e ROCHA, 2000).

Segundo Ferrari Filho (2011) as principais vantagens da secagem são a possibilidade de antecipação da colheita e redução da perda no campo ocasionada por condições e alterações climáticas e/ou pela ação de pragas e insetos. Ainda segundo este autor, a colheita antecipada também possibilita aos produtores obterem melhores preços pelos produtos quando a comercialização ocorrer em épocas de entressafra, permitindo uma oferta de produtos de melhor qualidade, no caso de grãos pelas características organolépticas e nutricionais e, no caso das sementes, pela alta porcentagem de germinação e vigor.

Goneli (2008) cita que a vida útil de produtos da agroindústria está diretamente relacionada com os processos de secagem e de armazenamento. Isso torna de suma importância o conhecimento da relação entre a umidade do material e a umidade relativa do ar (SAMAPUNDO et al., 2007). Neste contexto, a literatura (SAMANIEGO-ESGUERRA et al., 1991; MOREY et al., 1995; CHEN e JAYAS, 1998) afirma que os valores de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos dependem da espécie, da variedade, do teor de umidade inicial e principalmente da temperatura e umidade relativa do ambiente em que se encontram.

Para Figueirêdo e Queiroz (2007) o estudo da umidade relativa de materiais pode ser feito mediante a avaliação de isotermas de sorção. Segundo Karathanos et al., (1996) as isotermas de sorção correspondem a uma relação física entre a umidade do material e a umidade relativa correspondente a uma dada temperatura. De acordo com Park et al., (2008), uma isoterma de sorção pode ser de adsorção ou de dessorção. Tem-se a isoterma de adsorção quando um material seco é colocado em várias atmosferas com diferentes umidades relativas, em que se observa o aumento de peso devido ao ganho de água (PEZZUTI e CRAPISTE, 1996). A isoterma de dessorção é quando o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso devido à saída de água. A isoterma de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção, a um determinado valor de umidade relativa.

As isotermas de equilíbrio podem ser determinadas através do método gravimétrico e do método higrométrico. No método higrométrico, a umidade do material é mantida constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio. Já no método gravimétrico, a temperatura do ar e a umidade relativa são mantidas constantes até que a umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio. O método estático apresenta vantagens de se obter condições termodinâmicas constantes com maior facilidade devido ao ar permanecer de forma

estagnada. Assim, este método permite o uso de soluções ácidas ou soluções salinas saturadas (MORTOLA et al., 2003).

Apesar de o cornichão (*Lotus corniculatus* L.) ser uma forrageira bem difundida no mercado, a literatura ainda não fornece informações técnicas sobre suas propriedades físicas e fisiológicas, isoterma de dessecção e cinética de secagem. Estudos sobre esses parâmetros são necessários para otimizar o processo de beneficiamento deste material com o intuito de permitir a obtenção de um produto com melhor qualidade, menor custo e que satisfaça as exigências dos consumidores. Devido a isto, este trabalho teve como objetivo principal de realizar a análise da secagem de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fixo com escoamento de ar paralelo. Para alcançar este objetivo foram efetuadas as seguintes etapas:

1. caracterização física e fisiológica das sementes;
2. estudo do processo de reumidificação das sementes;
3. análise das isotermas de dessecção para as temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem;
4. secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em secador de leito fixo com escoamento de ar paralelo, e
5. estudo da influência do processo de secagem na germinação e na umidade final das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados os temas que foram abordados para a construção do embasamento literário desta dissertação.

2.1 Panorama do Cornichão no Brasil

As espécies leguminosas com potencial forrageiro vêm sendo utilizadas em diversas regiões pecuárias do Brasil, tanto em cultivo monofítico como consorciadas com gramíneas, visando maior produção de forragem e aumento no teor protéico da pastagem (ALMEIDA et al., 1979).

O Brasil ainda importa grande parte das sementes tropicais utilizadas na formação de suas pastagens (PIANA, 1986; SILVA et al., 2011) e, em razão da perspectiva de aumento do consumo interno de sementes de espécies forrageiras, em especial de cornichão, torna-se necessário um aumento na produção e uma melhor disponibilidade no mercado.

O mercado de sementes de espécies forrageiras no Rio Grande do Sul se apresenta de maneira desorganizada, funcionando de forma extra-institucional, ignorando as Normas e Padrões de Produção de Sementes para o Estado do Rio Grande do Sul.

O sistema de produção de sementes, de acordo com Domingues (2000), pode ser dividido em sistema formal e sistema informal. Pela definição, o sistema informal de produção de sementes se dá quando as atividades de produção ocorrem sem nenhum tipo de certificação e sem reconhecimento oficial. Já o sistema formal é aquele em que a produção de sementes segue as normas e regulamentos oficiais e é responsável pela produção e comercialização de sementes certificadas e controladas. No Rio Grande do Sul, o sistema de produção informal decorre da existência de um mercado na informalidade de sementes de trevo branco (*Trifolium repens* L.), cornichão (*Lotus corniculatus* L.) e lotus anual (*Lotus subbiflorus* L.).

Segundo Roso (2000) a principal fonte de alimentação para a pecuária de corte no Sul do Brasil é o campo nativo, que é composto basicamente por espécies de elevado crescimento estival. Nas estações frias ocorre a paralisação do crescimento e queda na qualidade da forragem da pastagem nativa. Isto faz com que ocorra uma defasagem alimentar para o rebanho bovino, constituindo uma das principais causas dos baixos índices produtivos da bovinocultura de corte. O uso de pastagens cultivadas de inverno é uma alternativa para rotação com as culturas de verão, pois o Estado do Rio Grande do Sul apresenta uma área de

aproximadamente 8,5 milhões de hectares na produção de cereais e leguminosas (IBGE, 2014).

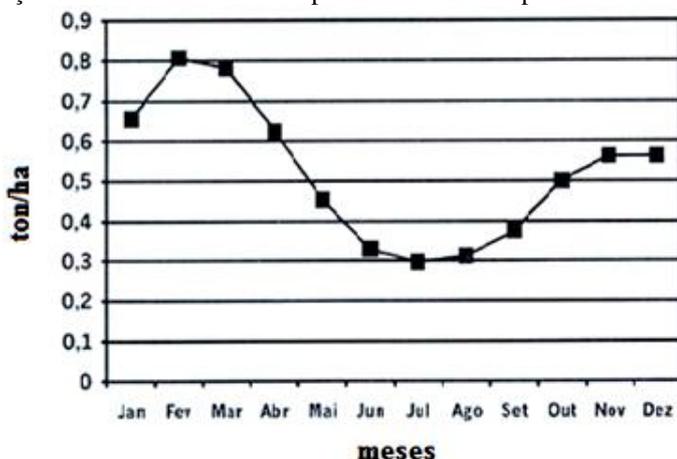
Segundo a EMBRAPA (2000) as leguminosas com maior potencial de utilização na Região Sul do Brasil são o trevo branco, o cornichão e o lotus anual. Dentre estas leguminosas forrageiras o cornichão apresenta vantagens na produção de matéria verde, decorrente de sua resistência à seca e ao encharcamento temporário do solo (CARAMBULA, 1977).

O cornichão é um dos principais bancos de proteína para o gado no período de entressafra, pois 24 % de sua composição é constituída de proteína bruta e taninos condensados (LÓPEZ et al., 1996). Esta parcela de taninos é capaz promover um aumento na produção de leite em ovelhas e causar uma melhora natural no controle de parasitas gastrointestinais (WANG et al., 1996). Entretanto, um dos problemas que o produtor de sementes desta espécie enfrenta é o estabelecimento lento, devido à dormência tegumentar (CASTRO e CARVALHO, 1992).

Esta gramínea possui excelente qualidade nutricional e elevada aceitabilidade. Ela é indicada para consórcio com outras espécies, sendo elas leguminosas ou até mesmo outras gramíneas. Por ser uma planta com boa capacidade de perfilhamento, grande produção de biomassa verde é ainda utilizada como planta de cobertura do solo (DERPSCH e CALEGARI, 1985).

As áreas destinadas à produção de sementes de cornichão normalmente são de pastagens utilizadas até determinada época, sendo posteriormente diferidas e adubadas para colheita de sementes. A Figura 2.1 mostra a produção mensal de matéria seca por hectare em campo natural no Rio Grande do Sul.

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



Fonte: Salomoni et al., 1994.

Na Figura 2.1 é possível observar que ocorre a carência de oferta forrageira do campo nativo nos meses de maio a setembro. Para Carvalho et al., (2010) o cornichão pode ser considerado como uma alternativa para este período crítico devido ao fato de se desenvolver e oferecer pastejo nesses meses, conforme demonstra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Períodos de utilização sob pastejo das principais forrageiras de clima temperado em uso no sul do Brasil.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aveia-preta												
Azevém												
Trevo-branco												
Trevo-vermelho												
Cornichão												

Legenda: período normal de utilização.
 variações de utilização conforme região, cultivares e condições climáticas.

Fonte: Carvalho et al., 2010.

Para Aguinaga (2009), na região da campanha parte das terras produtivas é arrendada para a produção de grãos no verão. Em troca os arrendatários implementam pastagens em consorciação com espécies do tipo aveia, azevém e cornichão para a utilização nos períodos baixa temperatura.

2.2 Características do Cornichão

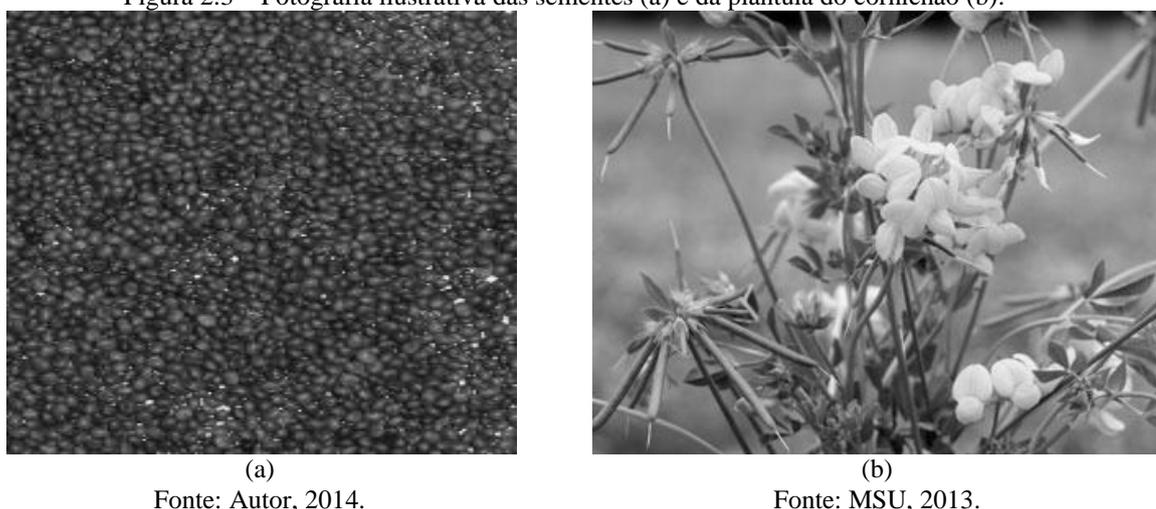
O cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é uma leguminosa forrageira perene hiberno-primaveril, de origem européia e mediterrânea, porém distribuída em todas as partes do mundo, com exceção de regiões muito frias e de áreas muito tropicais (BEUSELINCK, 1999). Morfologicamente, apresenta variações quanto ao tamanho, à forma e à coloração das folhas. O hábito de crescimento, geralmente, é ereto, embora possa ser prostrado ou ascendente tornando-o sensível ao pisoteio e ao pastejo (SEANEY e HENSON, 1970).

A grande variabilidade dos genótipos dessa espécie deve-se à ampla base genética e à sua forma tetraplóide, embora também seja encontrado na forma diplóide a exemplo de alguns genótipos rizomatosos originários do Marrocos (STEINER e GARCIA de LOS SANTOS, 2001), como também a hibridações interespecíficas (GRANT, 1999).

O cornichão São Gabriel, como também é assim conhecido, apresenta folhas pinadas compostas de três folíolos apicais digitados e dois basais distanciados, assemelhando-se a estípulas. Possui folíolos sem nervuras visíveis ou com somente a principal aparente. Com

inflorescência em umbelas de 4 a 6 flores amarelas, possui vagem linear, cilíndrica, deiscente e bivalva com falsos septos transversais entre as sementes. Tem uma raiz pivotante, o que confere tolerância a estiagens. A sua altura pode variar entre 50 e 80 cm quando não pastejada (EMBRAPA, 2000). As Figuras 2.3 (a) e (b) mostram fotografias ilustrativas das sementes e da plântula do cornichão, respectivamente.

Figura 2.3 – Fotografia ilustrativa das sementes (a) e da plântula do cornichão (b).



Embora o cornichão seja muito utilizado em áreas drenadas, ele consegue se adaptar em solos de coxilha. Não tolera sombreamento e sua vegetação se dá entre as estações da primavera e verão. Os tipos de solo que são mais propícios para seu desenvolvimento são os arenosos e argilosos com uma faixa tolerável de *pH* de 4,8 até 6,0 (RUSSELLE et al., 1991).

Um dos fatores limitantes da implantação de pastagens de cornichão é o problema da germinação das sementes que está na faixa de 60 a 70%, o que induz a problemas na germinação e utilização rápida da pastagem. Isto ocorre por causa da má qualidade das sementes, fato que está vinculado ao processo de beneficiamento aonde se tem como etapa limitante a secagem. Conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009), as sementes de cornichão devem apresentar um padrão mínimo de 65 % de germinação.

2.3 Análise da Qualidade da Semente

Segundo Souza (1980), o Brasil é um dos países que mais apresenta uma variação na qualidade de espécies de forrageiras existentes no comércio. Isto se dá devido a ocorrência de mercados que não seguem os padrões recomendados pelas Normas e Padrões de Produção de

Sementes, pela carência de demanda por sementes de alta qualidade, a inexistência de sementes padrões e a pouca tecnologia para a produção. Sendo assim, o comércio se caracteriza por sementes de baixa pureza física e varietal, baixa viabilidade e alta contaminação por sementes de plantas invasoras. Desta maneira, as decisões quanto à distribuição e à implantação de lavoura são dificultadas, pois há um aumento nos custos de produção.

Marcos Filho et al., (1987) afirmam que para se obter um bom rendimento em cultivos, é indispensável o uso de sementes de alta qualidade e dentro dos padrões estabelecidos pelo mercado. Esta reflete um conjunto de características que determinam a capacidade de apresentar desempenho adequado quando expostas a diferentes condições ambientais, sendo que o desempenho pós-semeadura pode refletir sobre a produção final.

De acordo com Borba e Andrade (1993), a qualidade de um lote de sementes é determinada pelo somatório das características físicas, fisiológicas, genéticas e sanitárias. As características físicas são aquelas relacionadas aos danos mecânicos e fissuras no tegumento. As propriedades fisiológicas são as englobam as funções vitais de uma semente, as quais são definidas pela sua germinação e vigor. A qualidade genética do lote está diretamente relacionada com a pureza varietal, que pode afetar a produtividade da lavoura. Por fim, as características sanitárias são aquelas que são ligadas à infecção das sementes por quaisquer microorganismos patogênicos nocivos à saúde da planta (FELIPE, 1999).

Para Popinigis (1977), o nível da qualidade fisiológica da semente é avaliado através de dois parâmetros fundamentais, a viabilidade e o vigor. A viabilidade é medida pelo teste de germinação e determina a máxima germinação da semente em condições extremamente favoráveis. Já o vigor, está relacionado à atributos mais sutis da qualidade fisiológica, como o potencial de armazenamento e de produzir plântulas normais em condições adversas, não revelados pelo teste de germinação.

Segundo Marcos Filho e Toledo (1977), são recomendados testes padrão de germinação e vigor para a regulamentação de sementes para o comércio interno. O teste de germinação é o mais conhecido para determinar a qualidade de sementes. Nele é avaliada a capacidade que uma semente tem de germinar em condições de luminosidade, temperatura e umidade ideais. O teste de vigor é um teste de germinação com metodologia modificada, sendo aplicado algum tipo de “estresse” semelhante ao que possa limitar a emergência e fixação da plântula no campo.

Para a realização do teste de germinação, 100 sementes puras por amostra devem ser semeadas sobre folhas de papel filtro em caixas plásticas e colocadas para germinar em

estufas germinadoras a uma temperatura de 20 a 30 °C. As contagens devem ser realizadas, no caso das sementes de cornichão, no quarto e décimo segundo dias após a semeadura, segundo os critérios estabelecidos nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

O grau de umidade da semente é um fator que exerce grande influência em vários aspectos da produção, principalmente na determinação do período de colheita. Sementes colhidas com alta umidade podem sofrer danos mecânicos os quais afetam a qualidade física e fisiológica, enquanto que sementes colhidas com baixa umidade podem ter sofrido deterioração no campo ocasionando uma perda de qualidade fisiológica por permanecer mais tempo sujeito às condições adversas de ambiente. Isto é, a alta umidade facilita a proliferação de fungos, diminuindo assim, o índice de germinação e vigor (DA SILVA et al., 2011).

Para Martinelli (1985), 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 onde inicialmente é prejudicado o vigor, diminuindo a capacidade de armazenamento e, posteriormente, a germinação, até a completa deterioração. A velocidade de deterioração é diretamente proporcional ao grau de umidade, ou seja, quanto mais alto o grau de umidade das sementes maior será sua velocidade de deterioração. Quanto menor o tempo entre a colheita e o processo de secagem menor o risco de deterioração das sementes.

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

2.4 Importância da Secagem de Sementes

Afonso Júnior e Corrêa (1999) salientam que a produção de grãos ou sementes com elevada qualidade requer uma colheita antecipada a fim de minimizar as perdas ocasionadas pelo campo devido ao ataque de insetos e micro-organismos. Desta forma a secagem constitui uma das operações de suma importância entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal devido ao teor de umidade elevado por ocasião da colheita.

Embora todas as operações de beneficiamento de sementes sejam importantes na definição da qualidade, existem aquelas que são limitantes, como é o caso do processo de

secagem. Por meio desta, é possível promover a redução do grau de umidade das sementes e de todo material que forma a massa colhida (ROBERTS, 1981).

A secagem pode ser considerada como uma das operações unitárias mais importantes e utilizadas numa ampla variedade de aplicações industriais, tais como indústrias de alimentos, química, farmacêutica, entre outras (BROOKER et al., 1992). Autores como Eichelberger et al., (2003) e Carambula (1984) informam que uma secagem realizada de maneira inadequada e imprópria é a maior causa de deterioração de grãos dentro de sua sequência de beneficiamento que é constituída por colheita, secagem, armazenamento, manipulação e transporte.

Segundo Baudet et al., (1999), a secagem é um processo fundamental da tecnologia para a produção de sementes de alta qualidade. Permite a redução do teor de água em níveis adequados para o armazenamento, preserva as sementes de alterações físicas e químicas, induzidas pelo excesso de umidade, e torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento, possibilitando colheitas próximas da maturação fisiológica. Confere uma maior conservação do produto, estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo, proteção contra degradação enzimática e oxidativa, redução do seu peso, economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano (PARK et al., 2001).

O teor de umidade exerce influência direta sobre a qualidade das sementes, pois sementes com elevados valores de umidade se deterioram mais facilmente, inviabilizando seu armazenamento. Sementes colhidas da lavoura apresentam teores de umidade inicial de 40 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). Desta forma, o estudo da retirada de umidade da semente torna-se fundamental.

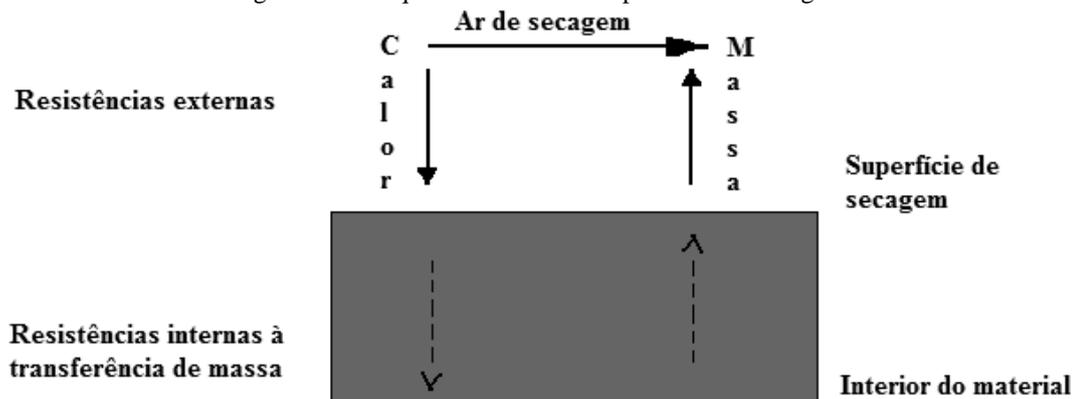
2.5 Secagem

2.5.1 Fundamentos da Secagem

De acordo com a literatura a secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas em diversos processos usados em indústrias agrícolas, alimentícias, de celulose, cerâmicas, farmacêuticas, químicas, entre outras. Pela definição, a secagem é um processo de remoção de umidade de um sólido por meio da evaporação (McCORMICK, 1983). Quando o calor necessário para evaporar a água de um sólido é fornecido, ocorrem

então transferências simultâneas de calor e de massa. Devido à complexidade deste fenômeno, é uma das operações mais difíceis de serem compreendidas perante a deficiência na descrição matemática desses processos simultâneos de transferência de calor e de massa (GEANKOPLIS, 1998). Um esquema ilustrativo do processo de secagem é demonstrado pela Figura 2.4.

Figura 2.4 – Esquema ilustrativo do processo de secagem.



Fonte: Tobinaga e Pinto, 1992.

Conforme ilustrado na Figura 2.4, o fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido promove a evaporação da água do material e simultaneamente o transporte do ar de secagem arrasta o vapor formado. A retirada do vapor de água formado na superfície do material é analisada do ponto de vista de movimento do fluido. Dois fenômenos ocorrem em paralelo quando um sólido úmido é submetido à secagem, a transferência de calor e a transferência de massa (PARK et al., 2007). A transferência de energia, sob 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, umidade, entre o sólido e o meio. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, da sua temperatura e do conteúdo de umidade.

Nos processos de secagem, o material úmido entra em contato com ar não saturado fazendo com que haja uma diminuição de seu conteúdo de umidade e conseqüentemente a umidificação do ar. Assim dois estágios simultâneos definem o processo de secagem, o aquecimento do material até atingir a temperatura do ar de secagem e a evaporação de umidade, até atingir a umidade de equilíbrio (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

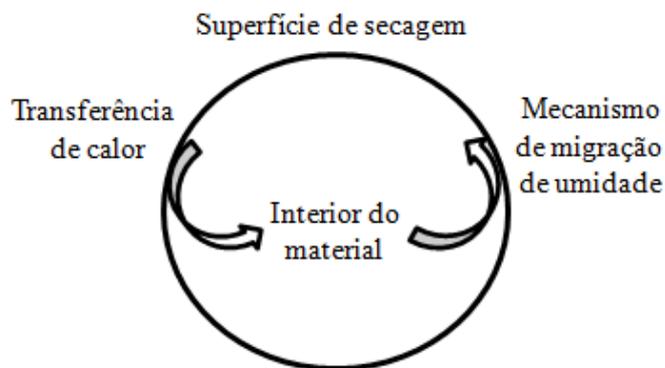
De acordo com Foust et al., (2008), o menor teor de umidade que um material pode atingir é a umidade de equilíbrio. Esta umidade é definida como o equilíbrio entre as pressões

de vapor da água no material e no meio, portanto, o teor de umidade depende da temperatura e da umidade relativa do ar (FUMAGALLI, 2007).

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 os quais indicam o grau de dificuldade de secagem nos materiais. Estes mecanismos são os responsáveis pelo transporte de água do interior do sólido até a superfície do mesmo.

A Figura 2.5 mostra uma representação da transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem.

Figura 2.5 – Representação da transferência de calor e de massa.

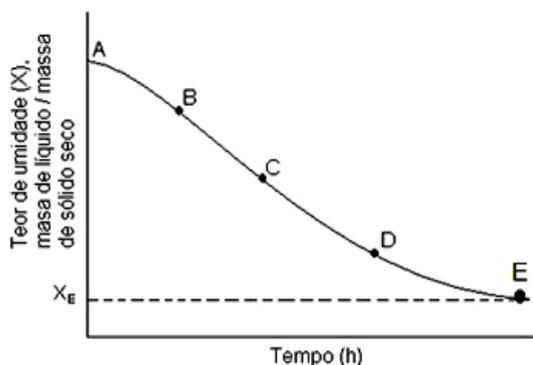


Fonte: Autor, 2014.

Os mecanismos de migração de umidade mais importantes são a difusão líquida, a difusão de vapor e o escoamento de líquido e de vapor. A difusão líquida ocorre devido à existência do gradiente de concentração (BRUIN e LUYBEN, 1980). A difusão de vapor ocorre devido ao 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, de concentração, da alta temperatura e a capilaridade (GEANKOPLIS,1998; MARTINS, 2002).

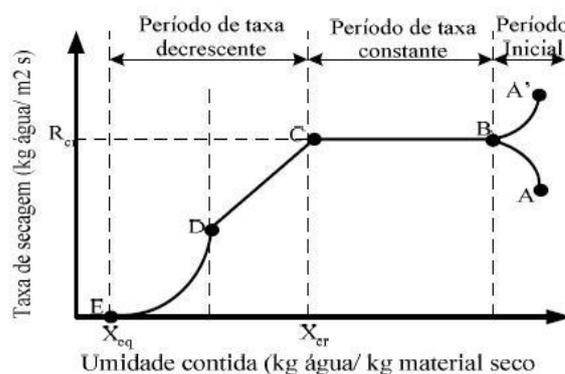
Segundo Park et al., (2007) a transferência simultânea de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida em três períodos característicos. De acordo com McCormick (1983), a secagem pode ser dividida em período de taxa constante e período de taxa decrescente, conforme as Figuras 2.6 e 2.7.

Figura 2.6 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo.



Fonte: Foust et al., 1982.

Figura 2.7 – Curva de taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade.



Fonte: Geankoplis, 1998.

A Figura 2.6 representa a umidade livre em função do tempo de secagem e é obtida pela variação de massa do produto durante a secagem, sob certa condição. A Figura 2.7 representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade livre do produto pelo tempo, dX/dt) em função da sua umidade média, sendo mais descritiva para o processo de secagem.

Para Cavariani (1996) a taxa de secagem está relacionada com a movimentação da água do interior para a superfície do sólido, da temperatura, da umidade relativa do fluxo forçado de ar e do método de secagem. No caso da secagem de sementes, a taxa de secagem é influenciada também pelo genótipo, estágio de maturação, teor de água, permeabilidade da camada protetora e composição física da semente.

Segundo Biagi et al., (1992), os segmentos A-B e A'-B, demonstrados na Figura 2.7, representam os períodos em que o material entra em regime operacional, onde a taxa de evaporação é crescente devido à elevação (A-B) ou diminuição (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 2.6 e 2.7) 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 e a taxa de secagem apresenta-se como uma reta. A água evaporada é a água livre e a secagem ocorre sem uma influência direta no sólido, sendo assim, a secagem se dá como se fosse a evaporação de uma massa de líquido. 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. Segundo Foust et al., (1982) esse mecanismo de deslocamento do líquido varia de maneira acentuada com a própria estrutura do sólido.

O ponto C, em ambas as Figuras 2.6 e 2.7, é caracterizado pelo período onde a taxa constante chega ao fim. Este ponto é denominado de X_c , umidade crítica, o qual indica que a migração interna de água para a superfície não mais supri a condição de equivalência com a taxa evaporativa. A taxa evaporativa diminui e ocorre o aumento da temperatura do sólido (FOUST et al., 1982; CHIRIFE, 1983). A umidade crítica depende de vários fatores, tais como a profundidade do leito ou a espessura da amostra, a taxa de secagem e a porosidade do material ou do leito. O teor de umidade crítica depende da facilidade com que a umidade se desloca do interior do sólido até a superfície, dependendo, portanto, da estrutura porosa do sólido (SILVA, 2008).

No trecho C-E (Figura 2.7), 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 2.7.

A complexidade dos fenômenos de secagem faz com que haja inúmeras teorias e equações empíricas a fim de predizer a cinética de secagem.

2.5.2 Cinética de Secagem

O estudo da cinética de secagem é de suma importância para a modelagem dos fenômenos de transferência de calor e de massa, pois é indispensável 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, conforme ilustração mostrada na Figura 2.7.

A taxa de secagem expressa o conteúdo de umidade retirado em função do tempo de secagem e está relacionada com a movimentação da água do interior para superfície do

produto (CAVARIANI, 1996). A Equação 2.1 representa a equação da taxa de secagem em coordenadas cartesianas na direção do eixo z , sentido horizontal:

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

onde 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 2.1, pode ser reordenada e integrada com respeito ao intervalo de tempo para secar desde X_0 a $t_1 = 0$ até X_1 a $t_2 = t$, conforme a Equação 2.2:

$$\int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{L_S}{H} \int_{X_0}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad (2.2)$$

na qual 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 2.2, para o período de taxa constante, é expressa na Equação 2.3.

$$t = \frac{L_S}{HN_c} (X_0 - X_1) \quad (2.3)$$

Segundo Park (2007) há duas teorias que podem explicar o comportamento da secagem no período decrescente, a teoria difusional e a teoria capilar.

De acordo com Foust et al., (1982) em um sólido relativamente homogêneo, como por exemplo os sólidos orgânicos fibrosos, as substâncias gelatinosas e as tortas porosas, 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 informa 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 2.4:

$$\frac{dX}{dt} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

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

Pela segunda Lei de Fick, a taxa decrescente de secagem é função do tempo de secagem, espessura da massa sólida e da difusividade. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água tem de ser removida do material (OLIVEIRA et al., 2006).

A integração da equação 2.4 requer que as condições de contorno sejam conhecidas e que as características da D_{ef} sejam especificadas. Nos casos mais simples, D_{ef} pode ser considerada constante, onde, considerando a secagem 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 na placa, a solução obtida é dada pela Equação 2.5:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left[- (2n + 1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{e_0^2} t \right] \quad (2.5)$$

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

Para elevados tempos de secagem, o único termo da série da Equação 2.5 que tem significância no seu valor numérico é o primeiro, sendo assim, a expressão pode ser simplificada para a Equação 2.6 (GEANKOPLIS, 1998).

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{e_0} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (2.6)$$

Devido à interferência do efeito de resistência interna do material, a teoria difusional não se faz adequada em alguns casos para representar o comportamento da taxa de secagem. Para contornar essa situação, alguns modelos empíricos e/ou semi-empíricos devem ser adotados. Os modelos empíricos de Thompson (1968), semi-empíricos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson (1968) e Midilli (2002) são alguns desses exemplos.

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. Portanto, eles não oferecem uma visão apurada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (MARTINAZZO et al., 2007).

De acordo com Syarief et al., (1984) 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).

Segundo Júnior et al., (1999) o método de Lewis sugere que, durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a mudança da umidade é proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do material, quando em condições de equilíbrio com o ar de secagem, conforme a Equação 2.7.

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (2.7)$$

Conforme Oliveira et al., (2006) quando há uma elevada interferência da resistência interna do material no processo de secagem, o modelo de Page (1949), representado pela Equação 2.8, pode ser aplicado:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \exp(-kt^n) \quad (2.8)$$

onde n é um parâmetro de ajuste do modelo.

De acordo com Carlesso et al., (2007) o modelo de Henderson (1961) contribui para mostrar que os coeficientes genéricos de secagem não são constantes 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 (1961) é descrito pela Equação 2.9:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k \cdot t) + b_1 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.9)$$

sendo a_1 , b_1 e c_1 constantes dos modelos e k , k_0 e k_1 coeficientes de secagem, s^{-1} .

Thompson et al., (1968) desenvolveu um modelo totalmente empírico de simulação para secagem de grãos em camada estacionária, sugerindo a Equação 2.10 para o processo de secagem em camada fina:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = C \cdot \ln(\exp^{-kt^n}) + B_1 \cdot [\ln(\exp^{-kt^n})]^2 \quad (2.10)$$

na qual os parâmetros C e B_1 são funções da temperatura do ar.

Conforme Martinazzo et al., (2007), o modelo de Midilli é representado pela Equação 2.11,

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (2.11)$$

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

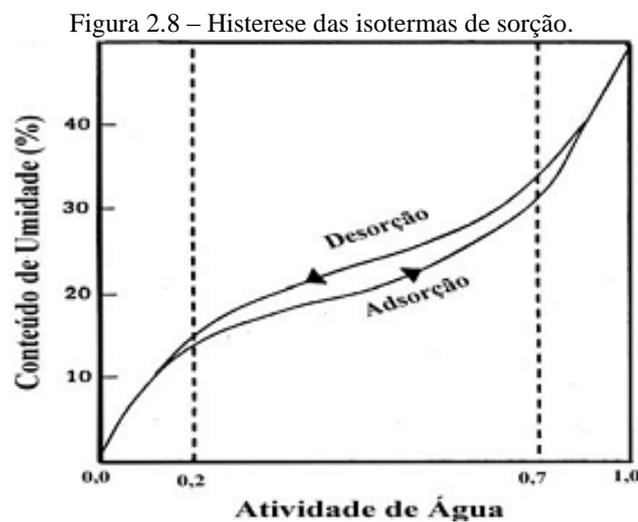
2.5.3 Isotermas de Sorção

Para Goneli (2008) a vida útil de muitos produtos pode ser determinada através do processo de secagem e armazenamento. Nesses processos o conhecimento da relação entre a umidade do material e a umidade relativa do ar é de suma importância, pois está diretamente relacionada com o equilíbrio termodinâmico entre o sistema composto pelo material sólido e o ar. Diversos autores, tais como Samaniego-Esguerra et al., (1991), Morey et al., (1995), Chen e Jayas (1998), afirmam que os valores de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos

dependem da espécie, da variedade, do teor de umidade inicial e principalmente da temperatura e umidade relativa do ambiente em que se encontram. O estudo da atividade de água pode ser feito mediante a avaliação de isotermas (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982).

Pela definição, as isotermas de equilíbrio são uma relação entre a umidade do material e a atividade da água (a_w) correspondente em uma determinada temperatura (KARATHANOS et al., 1996; KUROZAWA et al., 2005). Elas são importantes na análise e controle de vários processos na indústria, tais como na preservação, na secagem e na definição de embalagens.

Para Park et al., (2007) uma isoterma de sorção pode ser de adsorção ou de dessorção. Tem-se a isoterma de adsorção quando um material mais seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a atividade de água e medindo o aumento de peso devido ao ganho de água. Já a isoterma de dessorção é aquela em que o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso, devido à saída de água. A isoterma de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção, a um determinado valor de atividade de água. As curvas de adsorção e dessorção não coincidem, e esta diferença entre as isotermas é conhecida como o fenômeno de histerese, conforme apresentado na Figura 2.8. Este fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase.



As três regiões mostradas na Figura 2.8 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) (LABUZA, 1968).

No equilíbrio, a atividade de água (a_w) está relacionada com a umidade relativa (UR) do ambiente através da Equação 2.12,

$$a_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{UR}{100} \quad (2.12)$$

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 2.13,

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_{as}}{m_{as}} \quad (2.13)$$

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

Conforme Mortola et al., (2003), as isotermas de equilíbrio podem ser determinadas através dos métodos gravimétrico e higrométrico. No método higrométrico, a umidade do material é mantida constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio. Já no método gravimétrico, a temperatura do ar e a atividade de água são mantidas constantes até que a umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio. A circulação do ar pode estar ativa ou estagnada.

Segundo Moreira (2000) o método estático possui as vantagens de se obter condições termodinâmicas constantes com maior facilidade e permitir o uso de soluções ácidas ou soluções salinas saturadas.

De acordo com Park et al., (2008), existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas em análise de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios mais utilizados são os de segundo grau. Os modelos de isoterma mais utilizados são os modelos de Henderson, GAB, Peleg, BET e Oswin.

Segundo Moraes et al., (2008) o modelo Henderson é um dos modelos empíricos mais usados para a predição de isotermas, conforme a Equação 2.14:

$$X_e = \left[1 - \frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{1/b} \quad (2.14)$$

onde a e b são constantes.

Para Mulet et al., (2002), o modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) é um dos modelos mais empregados para ajustar os resultados dos dados de produtos alimentícios. Através deste modelo também é possível obter valores da umidade e do calor de sorção da monocamada. O modelo GAB é expresso pela Equação 2.15:

$$X_e = \frac{X_m \cdot Ct \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (2.15)$$

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 da monocamada e multicamada, respectivamente.

O modelo de Peleg é um modelo totalmente empírico que possui quatro parâmetros (ALCÂNTARA et al., 2009). Esse modelo é expresso pela Equação 2.16:

$$X_e = k_2 \cdot a_w^{n_1} + k_3 \cdot a_w^{n_2} \quad (2.16)$$

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 2.17:

$$X_e = \left[\frac{(X_m \cdot c \cdot e^{b/T} \cdot a_w) \cdot [1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (e^{b/T} - 1) \cdot a_w - e^{b/T} \cdot a_w^{n+1}]} \right] \quad (2.17)$$

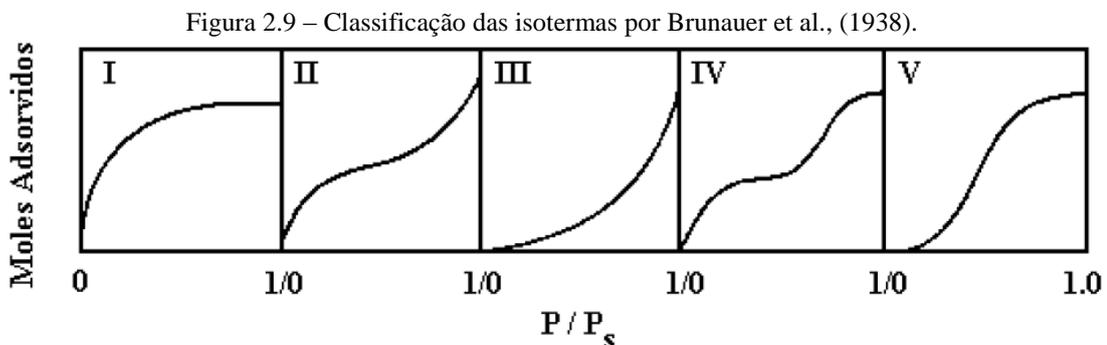
onde este modelo apresenta um ajuste satisfatório para valores de atividade de água que fiquem na faixa entre 0,05 e 0,45.

O modelo de Oswin, segundo Gomes et al., (2002), é totalmente empírico e se baseia na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Apresenta vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB devido à presença de somente duas constantes de fácil linearização. Ele é definido através da Equação 2.18.

$$X_e = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (2.18)$$

onde a e b são constantes do modelo.

Segundo Porpino (2009), existem diversos tipos de isotermas, porém, a maioria destas isotermas pode ser agrupada em seis classes diferentes seguindo a classificação proposta por Brunauer et al., (1938). Estas são enquadradas nos tipos de I a V. Na Figura 2.9 é apresentado um esboço destes tipos de isotermas.



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 adsorbentes mesoporosos. Isotermas deste tipo exibem uma proeminente região na qual a pressão relativa varia pouco e o volume adsorvido aumenta bruscamente (AMGARTEN, 2006).

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.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados na parte experimental e a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta dissertação.

3.1 Sementes e síntese organizacional dos experimentos

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), mostradas na fotografia ilustrativa da Figura 3.1, fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Pecuária Sul na cidade de Bagé/RS. Todos os experimentos foram realizados a partir de um mesmo lote de sementes com o intuito de garantir um material com as mesmas características físicas e fisiológicas iniciais.

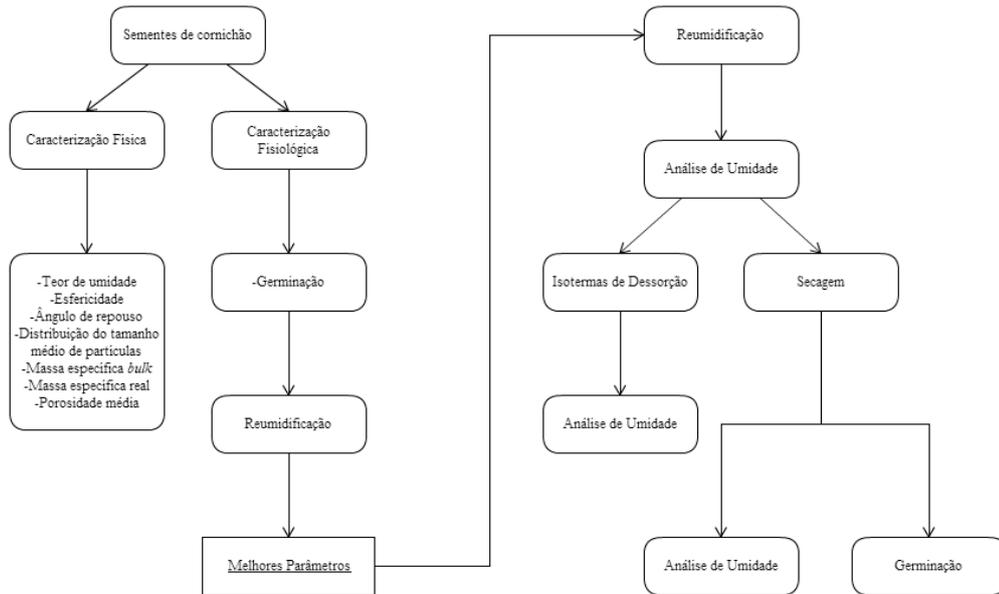
Figura 3.1 – Sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).



Fonte: Autor, 2014.

Na Figura 3.2 é apresentado um fluxograma organizacional dos experimentos realizados no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 3.2 – Fluxograma organizacional dos experimentos



Fonte: Autor, 2014.

3.2 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

As sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foram caracterizadas fisicamente quanto ao teor de umidade, esfericidade, ângulo de repouso, distribuição do tamanho médio de partículas, massa específica *bulk*, massa específica real e porosidade do leito. Para a caracterização fisiológica foi realizada a determinação dos valores de germinação. As técnicas e procedimentos de análises utilizados para a determinação destas propriedades são descritos nos itens que se seguem.

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

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

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

na qual 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 foi calculada através de 20 medidas dos comprimentos longitudinais e transversais obtidos em ensaios de paquimetria. O paquímetro digital utilizado foi da marca King Tools (0–150 mm) com precisão de $\pm 0,01\text{mm}$. Como a semente de cornichão apresenta duas dimensões bem definidas com geometria semelhante à de um elipsóide esferóide, os cálculos da esfericidade foram feitos segundo a Equação 3.3:

$$\phi = \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume}}{\text{área da superfície da partícula}} = \frac{\pi \cdot [d_e]^2}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \left[b + \frac{a^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arcsen \left(\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right) \right]} \quad (3.3)$$

na qual a e b são a metade do valor dos comprimentos longitudinais e transversais do elipsóide esferóide. O diâmetro equivalente (d_e) foi determinado pela Equação 3.4:

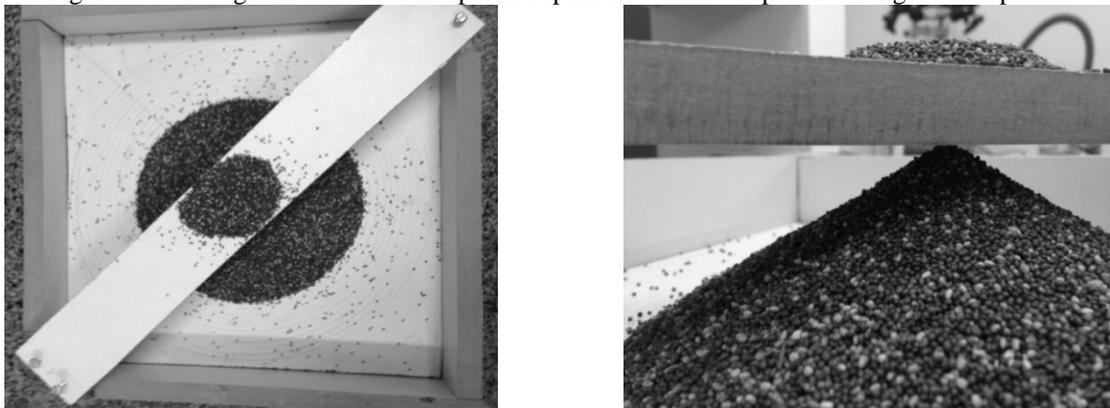
$$d_e = \left(\frac{6}{\pi} \cdot V_{\text{elipsoide}} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

sendo o volume do elipsoide esferóide ($V_{\text{elipsoide}}$) determinado através da Equação 3.5.

$$V_{\text{elipsoide}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot b \quad (3.5)$$

Ângulo de repouso - por meio do método empírico do funil fixo, foi determinado o ângulo de repouso (θ) das sementes de cornichão. A Figura 3.3 mostra, respectivamente, uma fotografia ilustrativa das partes superior e lateral do aparato utilizado.

Figura 3.3 – Fotografia ilustrativa das partes superior e lateral do aparato de ângulo de repouso.



Fonte: Autor, 2014.

De um modo geral, o aparato consistiu de uma caixa de madeira contendo círculos desenhados no fundo da mesma, os quais eram dispostos do centro até o limite da parede da caixa. Cada círculo possuía um espaçamento de 0,5 cm entre si. A altura do centro da caixa até o orifício de entrada das sementes foi fixa de 4,5 cm. As sementes foram colocadas através

do orifício superior até atingirem o topo do bocal de entrada, formando assim uma pirâmide. Todo o procedimento foi realizado em triplicata.

Para a determinação do ângulo de repouso foi utilizado a Equação 3.6, que corresponde ao valor da hipotenusa formada pelo ângulo de estagnação dos sólidos.

$$Q^2 = D^2 + F^2 \quad (3.6)$$

Na Equação 3.6 Q é a hipotenusa, D é a distância do centro da caixa até o limite da base da pirâmide formada e F é a altura da base da pirâmide até o bocal (4,5 cm). O valor de θ foi calculado por meio da relação entre Q e o seno do ângulo, conforme a Equação 3.7:

$$\sin \theta = \frac{F}{Q} \quad (3.7)$$

onde \sin é o seno do ângulo θ .

Distribuição do tamanho médio de partículas - utilizando-se um conjunto de peneiras da série *Tyler* (8, 9, 10, 14, 24, 60, 80) e um agitador de peneiras, ambos da marca Bertel Indústria Metalúrgica Ltda., foi determinada a curva da distribuição granulométrica diferencial e o diâmetro médio de sauter (\bar{d}_s) das sementes de cornichão. Todas as análises foram realizadas em triplicata. O cálculo do diâmetro médio de sauter foi realizado através da Equação 3.8:

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (3.8)$$

na qual x_i é a fração ponderal retida e d_{pi} é a média das aberturas das peneiras passante e retida. A fração ponderal retida foi calculada por meio da Equação 3.9:

$$x_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.9)$$

onde 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 por meio do ensaio de proveta. A proveta utilizada foi da marca Astral Científica de 100 mL a qual foi preenchida com as sementes e a sua massa determinada com o auxílio de uma balança analítica. Os ensaios foram realizados em triplicata.

Massa específica real das partículas - a massa específica real (ρ_{real}) das sementes foi determinada por picnometria gasosa em um picnômetro da marca Quantachrome Instruments, ultrafoam1000e, modelo UPY-30F e balança analítica, conforme ilustra a fotografia da Figura 3.4. O gás inerte utilizado no experimento foi o hélio com índice de pureza de 6.0.

Figura 3.4 – Fotografia do equipamento utilizado para a determinação da massa específica real.



Fonte: Autor, 2014.

Este equipamento foi ajustado para realizar dez medidas sucessivas de massa específica em uma pressão de operação de 19 psi e na temperatura de aproximadamente 19 °C. A partir dos resultados obtidos, calculou-se a média e o desvio padrão dos valores da massa específica.

Porosidade média do leito estático - a porosidade média do leito estático de sementes foi determinada através da relação entre a massa específica *bulk* e a massa específica real das sementes, conforme a Equação 3.10:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{real}} \right) \quad (3.10)$$

Germinação - os testes de germinação foram efetuados seguindo a metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992). Esta análise constituiu na utilização de caixas gerbox juntamente com papel filtro, onde foram colocadas 100 sementes. As amostras foram submetidas a um confinamento controlado em uma estufa germinadora, operando na temperatura de 20 °C na influência de luz solar natural. As contagens da germinação foram procedidas no quarto e décimo segundo dia após o início do teste. Ressalta-se que todos os testes de germinação foram realizados em triplicata. Nas Figuras 3.5 e 3.6 são mostradas fotografias ilustrativas da caixa gerbox e da estufa de germinação com as amostras, respectivamente.

Figura 3.5 – Disposição das sementes de cornichão na caixa gerbox.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.6 – Estufa germinadora.



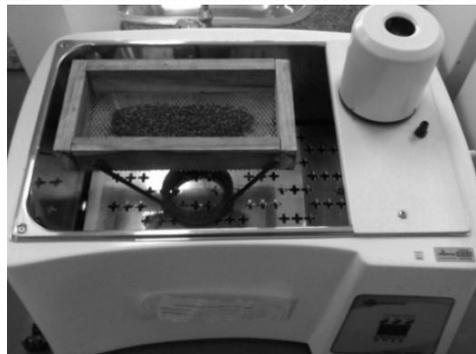
Fonte: Autor, 2014.

3.3 Estudo do Processo de Reumidificação das Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

Pela dificuldade de se obter as sementes na época de colheita, situação ideal para a secagem, adquiriu-se estas prontas para o plantio, isto é, secas até o teor de umidade comercial. Devido a isto, a etapa do estudo do processo de reumidificação teve como objetivo principal analisar as condições ideais para que as sementes de cornichão apresentassem um teor de umidade semelhante ao encontrado nas sementes recém-colhidas na lavoura e que passaram pelo processo de pré-limpeza.

O estudo do processo de reumidificação foi realizado de acordo com a metodologia de saturação proposta por Arnost Jr. (1997). Essa consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e saturado sob as temperaturas de 30, 35 e 40 °C. O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado foi um banho termostatizado (banho maria) da marca Quimis, conforme ilustrado na fotografia da Figura 3.7.

Figura 3.7 – Amostras de sementes no interior do banho termostatizado.



Fonte: Autor, 2014.

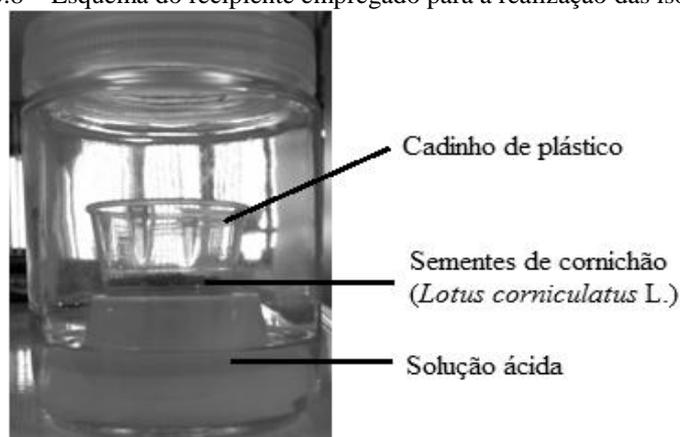
Foi utilizada na reumidificação das sementes uma camada de aproximadamente 1 cm, dispostas em um suporte de fundo telado para facilitar o processo de transferência de massa. Tanto antes da reumidificação como a cada vinte e quatro horas de processo, foi determinado o teor de umidade das sementes através do método gravimétrico recomendado pela *Association of Official Analytical Chemists - AOAC*, (1997).

Um aspecto importante acerca do estudo do processo de reumidificação é relatado por Gouvea et al., (2013). Esses autores afirmam que o processo germinativo sofre grande influência do processo de reumidificação, onde essa etapa pode acelerar e uniformizar a germinação das sementes proporcionando uma melhor qualidade para a mesma. Por conta disso, foi determinado tanto antes como após cada análise de reumidificação a germinação das sementes através da metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

3.4 Isotermas de Dessorção

A determinação das isotermas de dessorção das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi embasada no 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 atividade de água de 0,05 a 0,89 conforme apresentado na Tabela 3.1. Os experimentos foram conduzidos nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Cada análise foi realizada em triplicata, utilizando-se recipientes de vidros hermeticamente fechados, suporte e cadinho de plástico conforme mostra a fotografia da Figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquema do recipiente empregado para a realização das isotermas.



Fonte: Autor, 2014.

No interior de cada recipiente foram inseridos 30 mL das soluções de ácido sulfúrico. Também foi inserido em cada cadinho de plástico aproximadamente 2,5 g de sementes de cornichão reumidificado. A Tabela 3.1 apresenta os valores da atividade de água para cada concentração de ácido sulfúrico nas temperaturas de 40, 50, 60 °C.

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 recipientes apresentados na Figura 3.7 foram colocados em estufa de circulação forçada, marca Nova Ética, sendo realizadas pesagens do cadinho plástico no primeiro, sétimo, décimo e décimo quarto dia de experimento. Essas pesagens foram feitas com o objetivo de verificar o equilíbrio mássico para cada atmosfera estudada. As pesagens foram realizadas na mesma balança analítica utilizada nos testes anteriores. Com o equilíbrio mássico alcançado no décimo quarto dia, o teor de umidade de equilíbrio (em base seca) foi calculado através da Equação 2.13. Nessa equação, a diferença entre a massa da amostra no equilíbrio mássico e a massa da amostra seca, foi determinada através do método gravimétrico recomendado pela AOAC, (1997).

Os resultados obtidos nas isotermas de dessecção das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foram analisados através do ajuste dos dados experimentais aos modelos de BET, GAB, Henderson, Oswin e Peleg. O coeficiente de determinação (R^2) e o erro relativo (P_p), representado na Equação 3.11, foram os critérios abordados para decidir o modelo de isoterma que mais se adequou ao comportamento obtido para as sementes de cornichão.

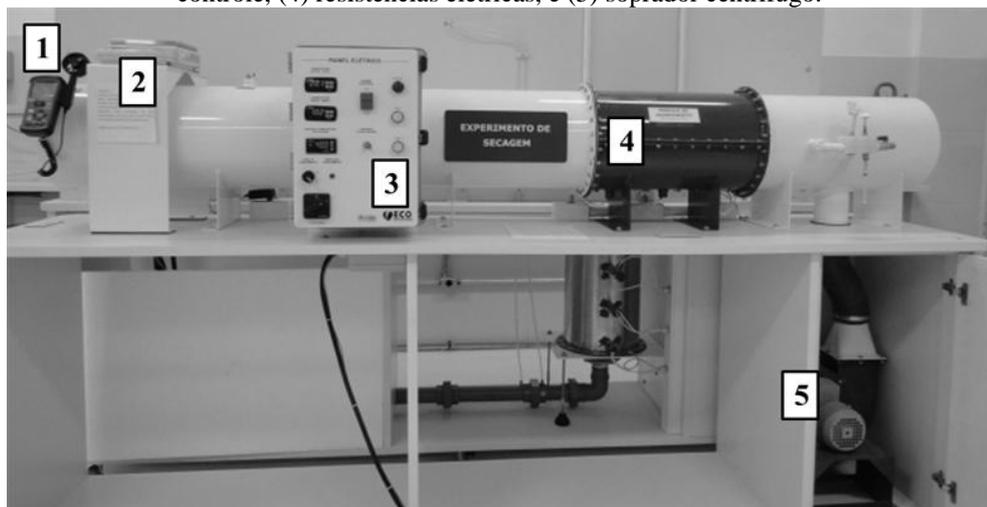
$$P_p = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{eExp} - X_{ePre}|}{X_{eExp}} \quad (3.11)$$

Na Equação 3.11 X_{eExp} é o valor encontrado experimentalmente, X_{ePre} o valor calculado pelo modelo e n o número de observações experimentais. Nessa perspectiva, para um bom ajuste matemático dos modelos, P_p deve ser menor que 10 % e R^2 próximo à unidade (MOHAPATRA e RAO, 2005).

3.5 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes em Secador de Leito Fixo com Fluxo de Ar Paralelo

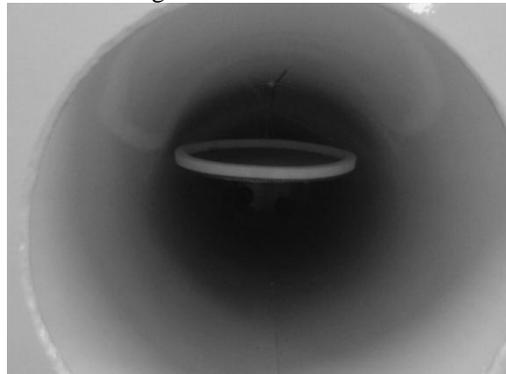
Para o estudo da cinética de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi utilizado um secador de bandeja com escoamento paralelo de ar, da marca ECO Educacional. Fotografias ilustrativas do secador e de seus componentes periféricos são apresentadas pelas Figuras 3.9 e 3.10, respectivamente.

Figura 3.9 – Secador de bandeja com escoamento paralelo de ar. (1) anemômetro, (2) balança, (3) painel de controle, (4) resistências elétricas, e (5) soprador centrífugo.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 3.10 – Fotografia do interior do túnel de secagem.



Fonte: Autor, 2014.

O secador apresentado na Figura 3.9 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. Nos itens que se seguem são descritos os detalhes dos periféricos que compõem o sistema de secagem.

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 3.9(3)), o qual é constituído por um inversor de frequência acoplado ao soprador. Para a determinação da velocidade do escoamento do ar no túnel de secagem, utilizou-se um anemômetro do tipo ventoinha da marca Instrutherm TAD-500 com precisão de $\pm 3\%$, conforme mostrado na Figura 3.9(1).

Determinação da massa - a massa da bandeja de secagem, constituída por bandejas cilíndricas de fundo telado com 0,5, 0,75 e 1,0 cm de altura e 9,5 cm de diâmetro, foi determinada por uma balança da marca Marte Balanças e Aparelhos de Precisão Ltda. com carga máxima de $4200 \pm 0,01$ g, conforme apresenta a Figura 3.9(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 foram realizadas diretamente no painel de controle mostrado na Figura 3.9(3).

Aquecimento do ar - o ar de secagem foi aquecido por quatro resistências elétricas de 800 W cada. Tais resistências elétricas estão localizadas no secador entre o sistema de fornecimento do ar e câmara de secagem, conforme ilustra a Figura 3.9(4).

Fornecimento de ar - o ar de secagem foi fornecido por um soprador centrífugo (Figura 3.9(5)) modelo Facitar com 1 CV.

Para a realização dos ensaios de secagem em camada delgada, utilizaram-se parâmetros pré-determinados que foram organizados de acordo com um planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central. As variáveis estudadas nesse planejamento foram a altura da bandeja (h), velocidade do ar (v) e a temperatura do ar de secagem (T), conforme apresentado na Tabela 3.2.

Para cada condição de secagem do planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central, o sistema foi monitorado de 5 em 5 min para os primeiros 30 min da secagem e de 10 em 10 min até o meio atingir o equilíbrio mássico. As variáveis medidas durante os experimentos foram as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar na entrada do túnel de secagem, a temperatura do ar de secagem e a massa na bandeja. Com os valores das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na entrada do secador e com o valor da temperatura do ar de secagem, foi determinado a umidade relativa e a umidade absoluta antes

e após o aquecimento do ar de secagem. Esta determinação foi feita através do *software* livre Catt2, que é específico para cálculos psicrométricos.

Tabela 3.2 - Condições experimentais do planejamento experimental fatorial 2^3 usado 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	40	1,0	1,0
3	40	2,0	0,5
4	40	2,0	1,0
5	60	1,0	0,5
6	60	1,0	1,0
7	60	2,0	0,5
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.

Por meio do planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central 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 índice de umidade final em base úmida e germinação.

Além da análise da resposta do planejamento experimental fatorial 2^3 com tréplica no ponto central, foram analisadas também as curvas da taxa de secagem em função da umidade média e do adimensional de umidade livre em função do tempo. A partir dos dados do adimensional de umidade livre em função do tempo determinaram-se as difusividades efetiva de cada processo de secagem pelo ajuste das curvas aos modelos da Lei de Fick, Page, Midilli e Henderson.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados e as respectivas discussões para cada procedimento de estudo presente nesta dissertação.

4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos na caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão fornecidas pela Embrapa - Pecuária Sul. Nessa tabela os resultados apresentados são a umidade das sementes em base úmida, o diâmetro médio de sauter, a massa específica real, a massa específica *bulk*, a porosidade média do leito estático, a esfericidade, o ângulo de repouso e a germinação.

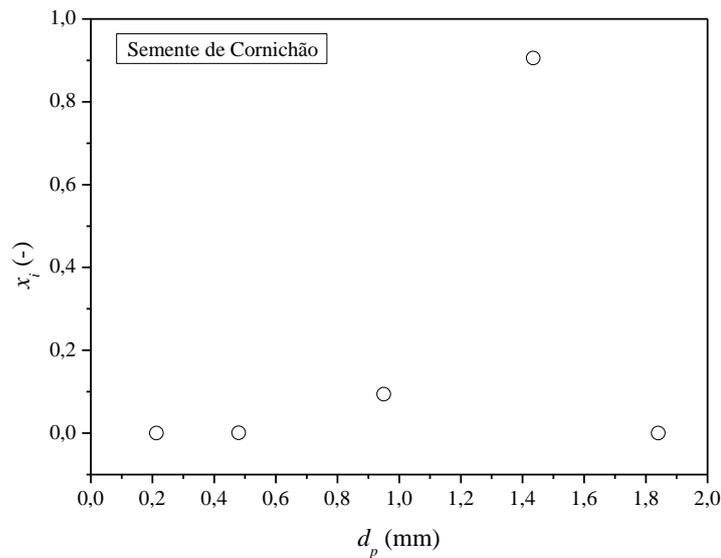
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão.

Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
U_{BU} (%)	$10,00 \pm 0,06$	ε	$0,37 \pm 0,01$
d_s (mm)	$1,37 \pm 0,01$	ϕ	$0,98 \pm 0,01$
ρ_{real} (kg/m ³)	$1363,66 \pm 0,67$	θ (°)	$25,34 \pm 0,01$
ρ_{bulk} (kg/m ³)	$858,28 \pm 5,30$	G (%)	$66,00 \pm 3,33$

Fonte: Autor, 2014.

Ao analisar a Tabela 4.1 verifica-se que o valor de U_{BU} obtido encontra-se na faixa indicada (10 a 12 %) para a comercialização de sementes (MACEDO et al., 1987). O resultado para o d_s foi de $1,37 \pm 0,01$. Ao comparar este resultado com o obtido por Ferreira (2013) no estudo das sementes de *Pennisetum glaucum* é verificado valores semelhantes, onde este autor encontrou um valor de d_s de 2,00 mm. Para uma visualização e melhor compreensão do resultado obtido para o diâmetro de sauter das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), é apresentado na Figura 4.1 a curva da distribuição granulométrica diferencial.

Figura 4.1 – Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas das sementes de cornichão.



Fonte: Autor, 2014.

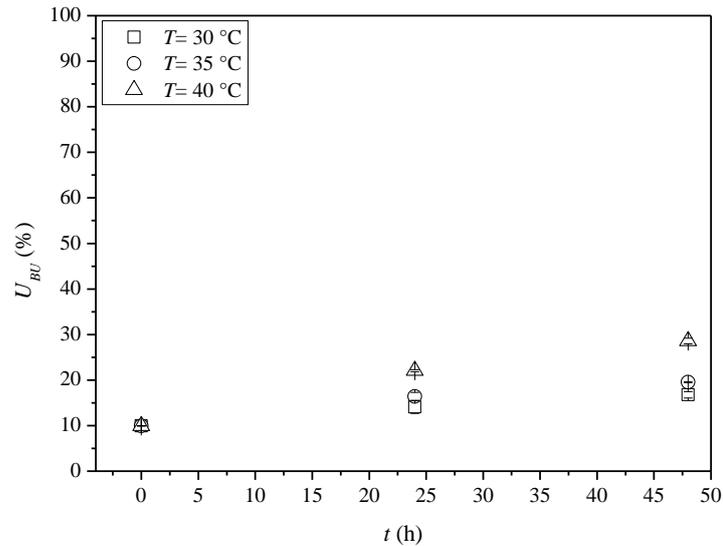
Observa-se na Figura 4.1 que a semente de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) apresentou um comportamento típico de distribuição granulométrica diferencial, com formato de curva de distribuição normal (FOUST et al., 2008). Aproximadamente 90 % das sementes apresentaram um diâmetro de partícula de 1,42 mm.

Os valores encontrados para ρ_{real} , ρ_{bulk} , ε , ϕ , e θ não foram comparados com a literatura devido à inexistência de dados deste tipo nas bibliografias consultadas. O ensaio de germinação das sementes de cornichão apresentou um valor médio de $66,00 \pm 3,33$ o qual está dentro dos padrões exigidos comercialmente (SEAPA – Secretaria da Agricultura do Estado). Os resultados fornecidos da análise da picnometria gasosa encontram-se no Apêndice A.

4.2 Estudo do Processo de Reumidificação e de Germinação

Na Figura 4.2 são apresentados os dados de umidade das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em base úmida em função do tempo de exposição na atmosfera saturada do processo de reumidificação.

Figura 4.2 – Umidade em base úmida em função do tempo.



Fonte: Autor, 2014.

Observa-se na Figura 4.2 que o processo de reumidificação foi eficiente, visto que permitiu elevar o teor de umidade das sementes de aproximadamente 10 % em base úmida para valores compreendidos entre 14 a 27 % em base úmida. Verifica-se também na Figura 4.2 que o processo de reumidificação realizado na temperatura de 40 °C foi o mais eficiente, visto que possibilitou colocar as sementes em teores de umidade compreendidos entre 20 a 27 % em base úmida. Ao analisar esses valores, é verificado que os mesmos são bastante próximos aos encontrados em sementes de azevém (*Lolium multiflorum* L.) recém-colhidas e que passaram pelo processo de limpeza (HAMM, 2013).

Outro aspecto importante a se salientar é que o processo de reumidificação pode também ser 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 poder reduzir a capacidade germinativa da semente e/ou induzir a dormência. No caso deste trabalho, como as amostras de cornichão não foram submetidas a um tratamento químico à base de fungicida, foi constatado que tempos de reumidificação superiores a 48 h provocaram o desenvolvimento de fungos e micro-organismos que inviabilizaram o uso das amostras.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores da germinação das sementes antes da reumidificação e das sementes reumidificadas nas diferentes condições experimentais estudadas.

Tabela 4.2 – Análise do teste de germinação.

Semente	Contagem 4º dia	Contagem 12º dia	Total	Média
	69	1	70	
Não Reumidificada	60	2	62	66,0 ± 3,3 %
	63	3	66	
Reumidificada a 30 °C	66	0	66	
em 24 h	66	3	69	65,6 ± 3,5 %
	57	5	62	
Reumidificada a 30 °C	53	19	72	
em 48 h	39	27	66	68,0 ± 3,5 %
	54	12	66	
Reumidificada a 35 °C	63	3	66	
em 24 h	50	4	54	60,0 ± 6,0 %
	56	4	60	
Reumidificada a 35 °C	50	4	54	
em 48 h	59	3	62	55,6 ± 5,6 %
	49	2	51	
Reumidificada a 40 °C	68	3	71	
em 24 h	60	1	61	65,3 ± 5,1 %
	60	4	64	
Reumidificada a 40 °C	66	2	68	
em 48 h	56	1	57	62,3 ± 5,5 %
	59	3	62	

Fonte: Autor, 2014.

Na Tabela 4.2 é verificado que os valores dos índices de germinação obtidos para as sementes não reumidificadas são muito próximos aos das sementes reumidificadas nas diferentes condições experimentais. Por conta disso, foi possível afirmar que o processo de reumidificação não causou nenhum tipo de dano fisiológico nas sementes. Os resultados da Tabela 4.2, aliados aos resultados da Figura 4.2, permitiram definir que o processo de reumidificação mais adequado para as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi o que ocorreu nas condições de temperatura de 40 °C em um período de 24 h. Nessas condições, foi encontrado o maior percentual de vigor das sementes de cornichão se comparado com as demais etapas do processo de germinação. As sementes mais vigorosas são aquelas que germinam de maneira mais uniforme e numerosa no 4º dia do processo germinativo. Por conta disto, a reumidificação realizada na temperatura de 40 °C durante 24 h foi utilizada no tratamento das sementes para as demais etapas do estudo de secagem de cornichão presentes neste trabalho.

4.3 Isotermas de Dessorção das Sementes Reumidificadas

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

Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros calculados a partir do ajuste dos modelos de GAB, BET, Oswin, Peleg e Henderson.

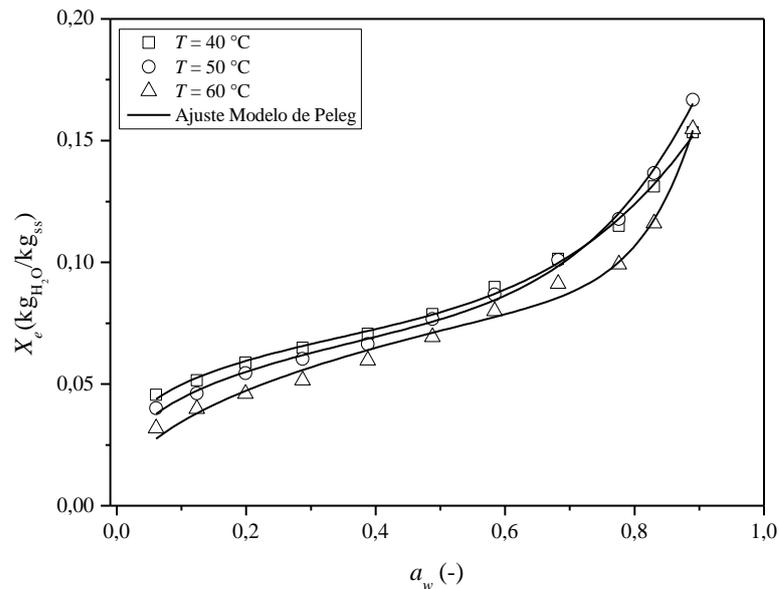
Modelo	Valor do parâmetro a 40 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,043, C = 1,244E+45, n = 6,457$	0,964	2,420
GAB	$X_m = 0,051, C = 172,256, k = 0,749$	0,995	1,093
Oswin	$a = 0,085, b = 0,273$	0,984	2,523
Peleg	$k_1 = 0,088, n_1 = 0,231, k_2 = 0,117, n_2 = 4,511$	0,997	0,817
Henderson	$a = 338,364 b = 2,573$	0,935	2,653
Modelo	Valor do parâmetro a 50 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,038, C = 1,055E+45, n = 8,455$	0,964	3,547
GAB	$X_m = 0,045, C = 133,770, k = 0,815$	0,993	1,827
Oswin	$a = 0,081, b = 0,330$	0,981	2,916
Peleg	$k_1 = 0,091, n_1 = 0,306, k_2 = 0,162, n_2 = 5,933$	0,995	0,262
Henderson	$a = 107,215 b = 2,058$	0,931	3,139
Modelo	Valor do parâmetro a 60 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,033, C = 4,172E+48, n = 8,728$	0,938	2,427
GAB	$X_m = 0,040, C = 70,328, k = 0,814$	0,974	2,222
Oswin	$a = 0,070, b = 0,342$	0,979	3,332
Peleg	$k_1 = 0,098, n_1 = 0,456, k_2 = 0,235, n_2 = 11,602$	0,989	1,686
Henderson	$a = 106,787 b = 1,941$	0,935	4,137

Fonte: Autor, 2014.

Pela análise da Tabela 4.3, é possível afirmar que o modelo matemático de Peleg foi o que melhor descreveu o comportamento das isotermas de dessorção das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) para as três temperaturas em estudo. Para este modelo, os coeficientes de determinação (R^2) ficaram na ordem de 0,989 a 0,997 e o erro relativo (P_p) ficou na ordem de 0,262 a 1,686. Ao comparar esses valores de P com os obtidos para os modelos de BET, GAB, Oswin e Henderson é verificado que ele é bastante inferior, indicando o melhor ajuste para o modelo matemático de Peleg. Também para este modelo, é verificado que os parâmetros de ajuste encontrados neste estudo estão de acordo com a literatura, visto que Vásquez et al., (2013) indicam valores de $n_1 < 1$ e valores de $n_2 > 1$.

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas experimentais de isotermas de dessorção das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, ajustadas pelo modelo de Peleg. Através da análise do comportamento da isoterma apresentada nessa figura, é verificado que esta é do tipo II, seguindo a classificação de Brunauer de 1938. A forma sigmoidal da classificação do tipo II é característica de isotermas de produtos orgânicos (VEGA et al., 2005). Este tipo de isoterma resulta de adsorventes nos quais há uma extensa variação de tamanhos de poros. Esta variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar. Observa-se também que o aumento da a_w promove um aumento da X_e para cada temperatura. Sendo assim, 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).

Figura 4.3 – Isotermas de dessorção das sementes de cornichão ajustadas pelo modelo de Peleg.

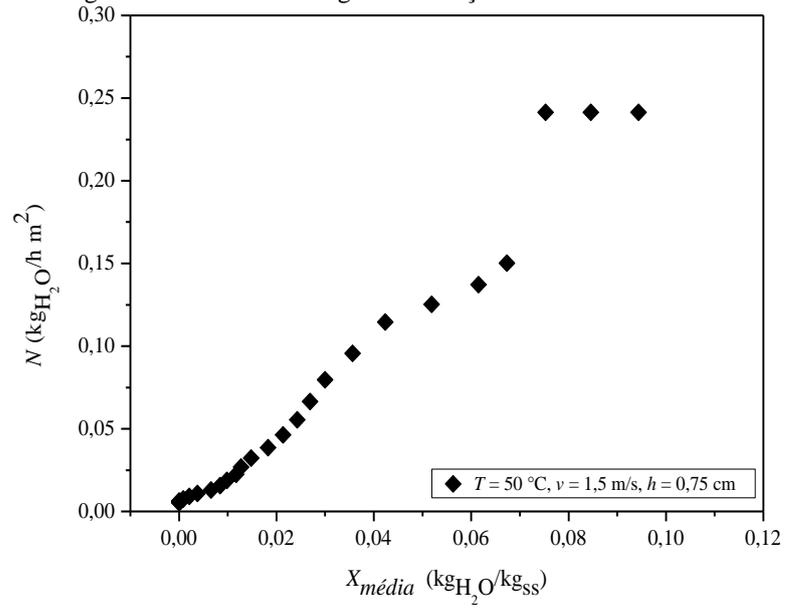


Fonte: Autor, 2014.

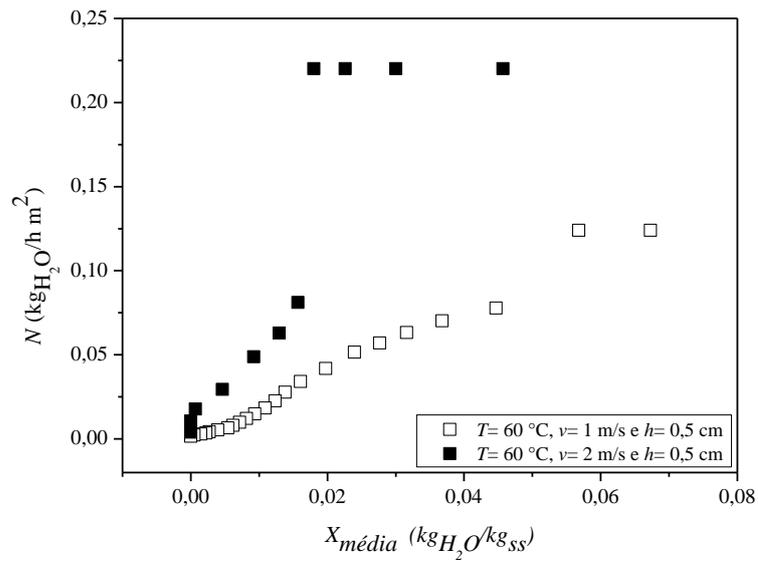
4.4 Estudo da Cinética de Secagem das Sementes Reumidificadas em Secador de Leito Fixo com Fluxo de Ar Paralelo

Na Figura 4.4 (a - d) são apresentadas curvas da taxa de secagem em função da umidade média.

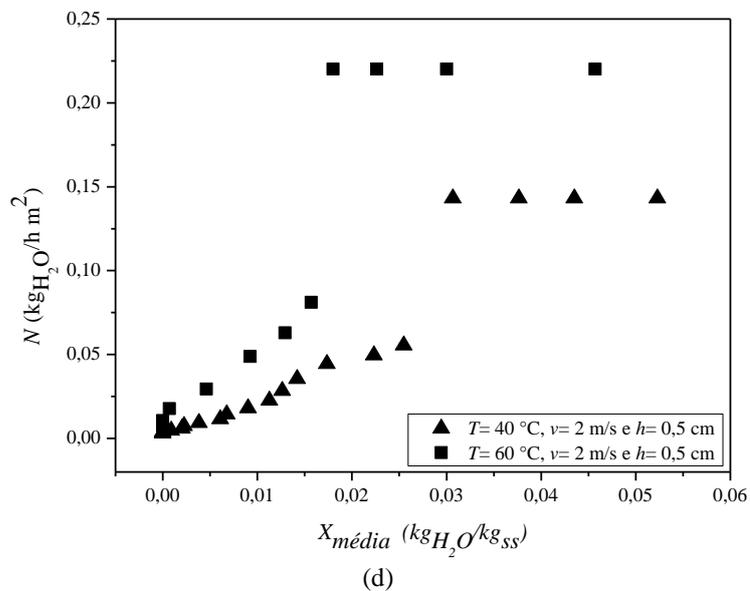
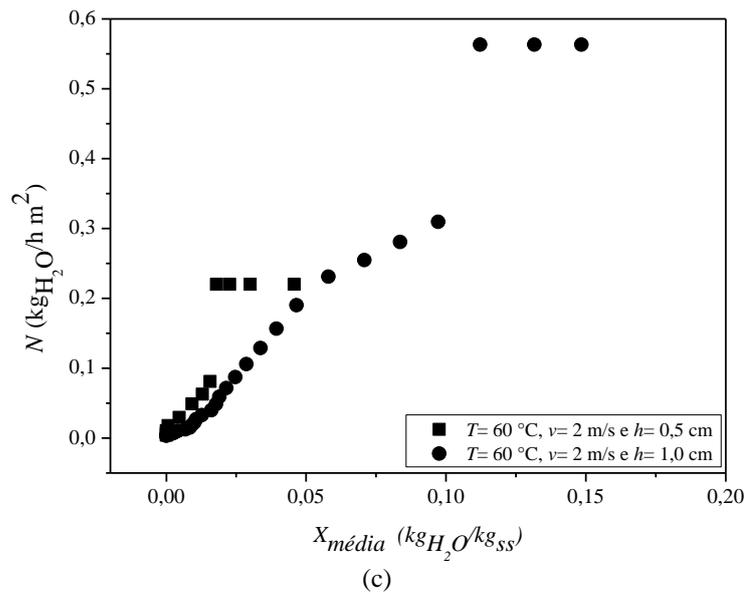
Figura 4.4 – Taxa de secagem em função da umidade média.



(a)



(b)



Fonte: Autor, 2014.

Observa-se na Figura 4.4 (a - d) que as cinéticas de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) apresentaram um comportamento típico de secagem com os períodos de taxa constante e decrescente (GEANKOPLIS, 1998).

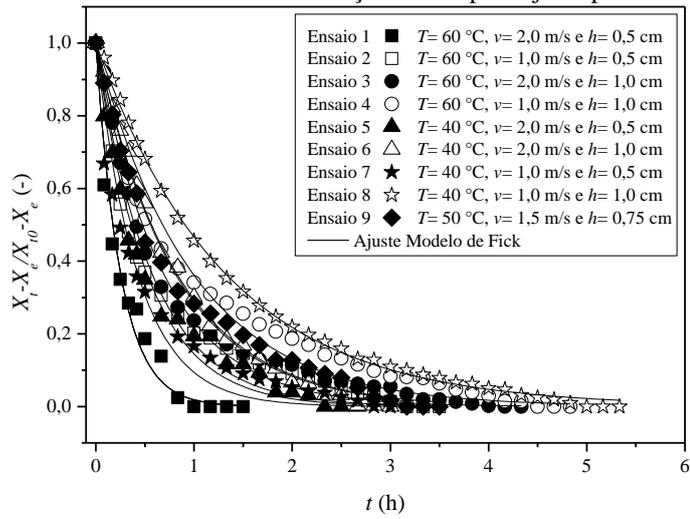
Para a taxa decrescente é observado na Figura 4.4 (a - d) que todas as condições experimentais analisadas tiveram quedas no índice da taxa representadas pelos mecanismos da capilaridade e da difusão, sendo o mecanismo da difusão o predominante. A queda nos índices da taxa de secagem para o período de taxa decrescente é 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 se refere à migração de umidade do interior para a superfície do sólido, que é efetuada, no caso das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), pelos mecanismos de transferência de massa da capilaridade e da difusão. A predominância do mecanismo da difusão está de acordo com a literatura (GEANKOPLIS, 1998; PARK et al., 2007), que diz que esse mecanismo é característico de sólidos orgânicos.

Na Figura 4.4 (b) ao se analisar o comportamento das curvas em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi verificado que a modificação no valor de 1,0 m/s para 2,0 m/s causou um aumento na taxa de secagem para o período de taxa constante. Este comportamento 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. Na Figura 4.4 (c), ao se analisar o comportamento das curvas em relação à mudança na altura de bandeja, foi observado que a modificação no valor de 0,5 cm para 1,0 cm causou um aumento na taxa de secagem para o período de taxa constante. Isto ocorre devido ao aumento na altura da bandeja proporcionar uma maior massa de material na bandeja, disponibilizando assim uma maior quantidade de água livre para o processo evaporativo. Por fim, na Figura 4.4 (d), analisando-se o comportamento das curvas em relação à mudança de temperatura, foi constatado que a modificação no valor de 40 °C para 60 °C causou um aumento na taxa de secagem para o período de taxa constante. Isto é explicado pela física do processo. Uma vez que a secagem para esse período está intimamente ligada com a transferência convectiva de calor e de massa na superfície do material sólido, era esperado que a elevação na temperatura causasse um aumento na força motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema. Comportamentos semelhantes aos demonstrados pela Figura 4.4 (a - d) foram encontrados para as demais condições de secagem abordadas neste estudo.

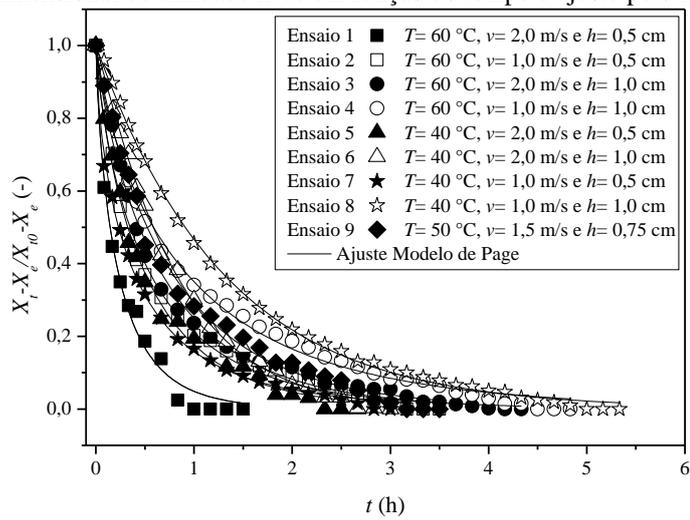
Nas Figuras 4.5 a 4.8 são apresentadas as curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo juntamente com os ajustes dos modelos da Lei de Fick, de Page, Henderson e Midilli para as sementes secas.

Figura 4.5 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo da Lei de Fick.



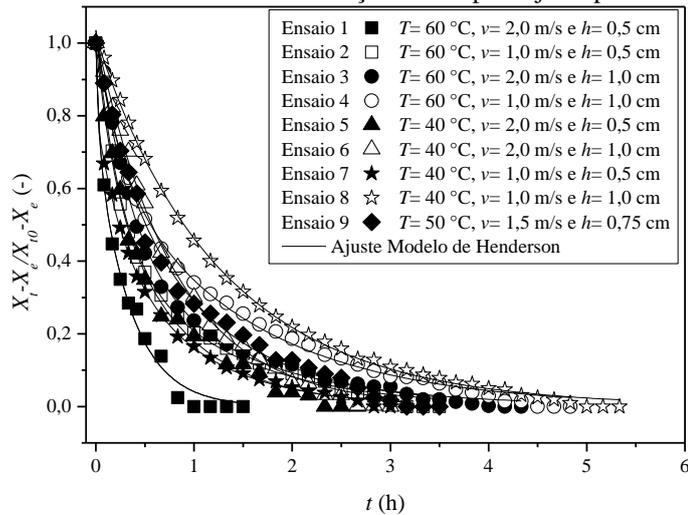
Fonte: Autor, 2014.

Figura 4.6 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Page.



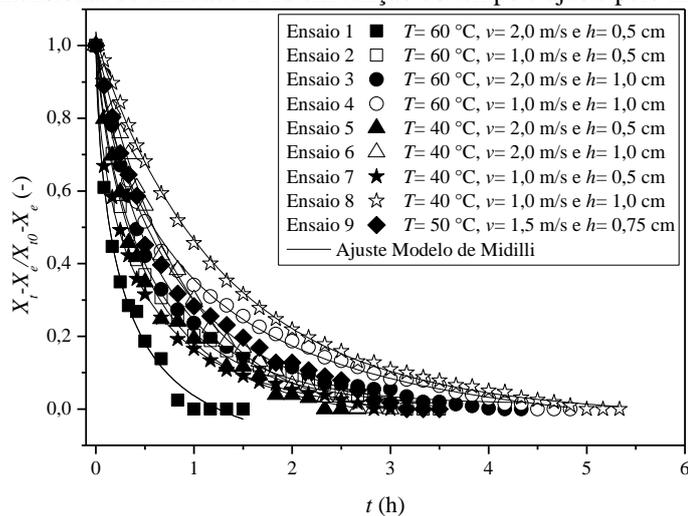
Fonte: Autor, 2014.

Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Henderson.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 4.8 – Adimensional de umidade livre em função do tempo e ajuste pelo modelo de Midilli.



Fonte: Autor, 2014.

Nas curvas das Figuras 4.5 a 4.8 é observado que dentre as secagens, a que teve maior temperatura (60 °C), maior velocidade do ar ($v = 2,0$ m/s) e menor altura de bandeja ($h = 0,5$ cm) foi a que apresentou o menor tempo de secagem, com o equilíbrio mássico alcançado em aproximadamente uma hora de processo. Já a amostra seca na menor temperatura (40 °C), menor velocidade do ar ($v = 1,0$ m/s) e na maior altura de bandeja ($h = 1,0$ cm) foi a que apresentou o maior tempo de secagem, com o equilíbrio mássico sendo atingido em aproximadamente três horas de processo. Observa-se também nessas figuras que todas as curvas apresentaram um comportamento característico de secagem, com diminuição do teor de água livre em função do tempo.

Outro aspecto importante que foi observado nas Figuras 4.5 a 4.8 foram as modificações que ocorreram no comportamento das curvas com as alterações nas variáveis temperatura, velocidade do ar de secagem e altura de bandeja. Ao se analisar a influência da temperatura e da 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 promoveu um aumento do tempo de secagem. A explicação para esses fatos está na física do processo. Como 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 ocasiona uma elevação no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), aumentando também a taxa de 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 uma diminuição no tempo de secagem. Para a altura da bandeja, o seu aumento provoca uma resistência maior ao processo de secagem, o que dificulta as transferências de calor e de massa do sistema e provoca um aumento no tempo de secagem.

Os parâmetros dos ajustes das curvas das Figuras 4.5 a 4.8 e os valores de difusividade efetiva e do erro relativo para cada condição de secagem ajustadas pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, de Henderson 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 e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, de Henderson e de Midilli.

Ajuste do Modelo da Lei de Fick					
Ensaio	k (h ⁻¹)	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)	
(1)	3,9940	0,9708	9,45	1,012x10 ⁻⁵	
(2)	1,7576	0,9687	9,65	4,452x10 ⁻⁶	
(3)	1,4581	0,9680	7,67	1,477x10 ⁻⁵	
(4)	1,0180	0,9726	9,45	1,031x10 ⁻⁵	
(5)	1,9316	0,9804	9,15	4,893x10 ⁻⁶	
(6)	1,2222	0,9951	0,54	1,238x10 ⁻⁵	
(7)	2,3619	0,9520	7,27	5,983x10 ⁻⁶	
(8)	0,7623	0,9988	3,24	7,724x10 ⁻⁶	
(9)	1,2457	0,9886	8,45	7,100x10 ⁻⁶	

Ajuste do Modelo de Page					
Ensaio	k (h ⁻¹)	n	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	3,0230	0,7629	0,9876	6,16	7,657x10 ⁻⁶
(2)	1,5583	0,7705	0,9882	1,90	3,947x10 ⁻⁶
(3)	1,3857	0,8930	0,9922	1,84	3,907x10 ⁻⁶
(4)	1,0491	0,7792	0,9948	3,35	1,062x10 ⁻⁵
(5)	1,7347	0,8178	0,9921	3,52	4,394x10 ⁻⁶
(6)	1,2333	1,0786	0,9980	1,93	1,249x10 ⁻⁵
(7)	1,8441	0,6690	0,9976	0,88	4,671x10 ⁻⁶
(8)	0,7618	1,0016	0,9988	3,34	7,718x10 ⁻⁶
(9)	1,2284	0,8848	0,9931	4,25	7,001x10 ⁻⁶

Ajuste do Modelo de Henderson									
Ensaio	a	b	c	k (h ⁻¹)	k_o (h ⁻¹)	k_l (h ⁻¹)	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	0,2536	0,2957	0,4507	30,0585	2,8966	2,8973	0,9871	4,80	3,027x10 ⁻⁵
(2)	0,2466	0,2466	0,5410	0,8994	0,9004	4,2788	0,9932	1,51	5,132x10 ⁻⁶
(3)	0,3152	0,3152	0,4054	2,6558	2,6566	0,7523	0,9964	1,59	2,048x10 ⁻⁵
(4)	0,1698	0,1700	0,6766	3,9230	3,9207	0,6845	0,9968	2,11	2,880x10 ⁻⁵
(5)	0,1816	0,1816	0,6378	4,9771	4,9771	1,2792	0,9912	2,96	9,485x10 ⁻⁶
(6)	0,3412	0,3412	0,3412	1,2562	1,2562	1,2562	0,9963	0,88	1,273x10 ⁻⁵
(7)	0,3104	0,1897	0,4997	3,9813	5,4890	1,1689	0,9988	5,59	8,983x10 ⁻⁶
(8)	0,4732	0,4732	0,0709	0,7389	0,7389	1,9058	0,9988	2,40	5,231x10 ⁻⁶
(9)	0,3029	0,2921	0,4177	0,9519	3,2336	0,9518	0,9929	3,43	9,760x10 ⁻⁶

Ajuste do Modelo de Midilli								
Ensaio	a	b	k (h ⁻¹)	n	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)	
(1)	0,9978	-0,0427	2,5299	0,6691	0,9912	3,75	6,408x10 ⁻⁶	
(2)	1,0357	-0,0009	1,5900	0,7398	0,9880	1,56	4,027x10 ⁻⁶	
(3)	1,0391	0,0024	1,4574	0,8353	0,9929	2,17	1,476x10 ⁻⁵	
(4)	1,0274	-0,0084	1,0348	0,7024	0,9963	1,36	1,047x10 ⁻⁵	
(5)	1,0110	-0,0104	1,6505	0,7664	0,9920	2,16	4,180x10 ⁻⁶	
(6)	1,0054	-0,0090	1,1857	1,0252	0,9985	0,95	1,201x10 ⁻⁵	
(7)	0,9970	-0,0090	1,7389	0,6290	0,9988	0,63	4,404x10 ⁻⁶	
(8)	1,0229	-0,0030	0,7817	0,9436	0,9991	3,05	7,920x10 ⁻⁶	
(9)	1,0222	-0,0083	1,2014	0,8192	0,9935	3,05	6,847x10 ⁻⁶	

Fonte: Autor, 2014.

É observado, tanto nas curvas das Figuras 4.5 a 4.8 como na Tabela 4.4, que o modelo de Midilli apresentou os melhores ajustes em relação aos demais modelos utilizados. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram todos acima de 0,99 que segundo Madamba et al., (1996), significa um bom ajuste do modelo para a representação do fenômeno de secagem. Analisando os valores obtidos referentes ao erro médio relativo (P_p), o modelo de Midilli foi o que apresentou os menores valores se comparado com os demais modelos utilizados. Sendo assim, este modelo foi o que obteve o melhor ajuste aos dados experimentais da secagem de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) corroborando os resultados verificados por Corrêa et al., (2007) para a modelagem da secagem do feijão vermelho. Esses resultados estão semelhantes com os encontrados por Furtado et al., (2010), que trabalhando a secagem de polpa de ceriguela (*Spondias purpurea* L.) pelo método de camada de espuma, verificaram que o modelo de Midilli se ajustou satisfatoriamente aos dados de secagem. Meisami-Asl et al., (2009), estudando a modelagem matemática em camada delgada de fatias de maçã em temperaturas de 40 a 80 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s, verificaram também que o modelo de Midilli foi o que melhor representou os dados experimentais de secagem. Também foi possível observar que a difusividade efetiva de todos os modelos apresentados na Tabela 4.4 demonstrou um comportamento típico com o esperado fisicamente. Ao se analisar os valores da difusividade efetiva em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi verificado que a modificação no valor de 1,0 m/s para 2,0 m/s provocou um aumento no D_{ef} devido ao aumento na força motriz de secagem. Ao se analisar 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 causou um aumento no D_{ef} devido ao aumento da altura da bandeja proporcionar uma maior massa de material, fazendo com que haja uma maior quantia de água livre para o processo evaporativo. Por fim, ao se analisar os valores da difusividade efetiva em relação à mudança de temperatura, foi verificado que a modificação no valor de 40 °C para 60 °C provocou também um aumento no D_{ef} de todo processo. Isto pôde ser explicado pela física do processo, onde a elevação na temperatura causa um aumento na força motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores da umidade em base úmida (U_{BU}), da umidade absoluta (UA), da umidade relativa (UR) e da germinação (G) das sementes que passaram pelo processo de secagem nas diferentes condições experimentais estudadas.

Tabela 4.5 – Umidades final, absoluta e relativa e germinação total das sementes secas.

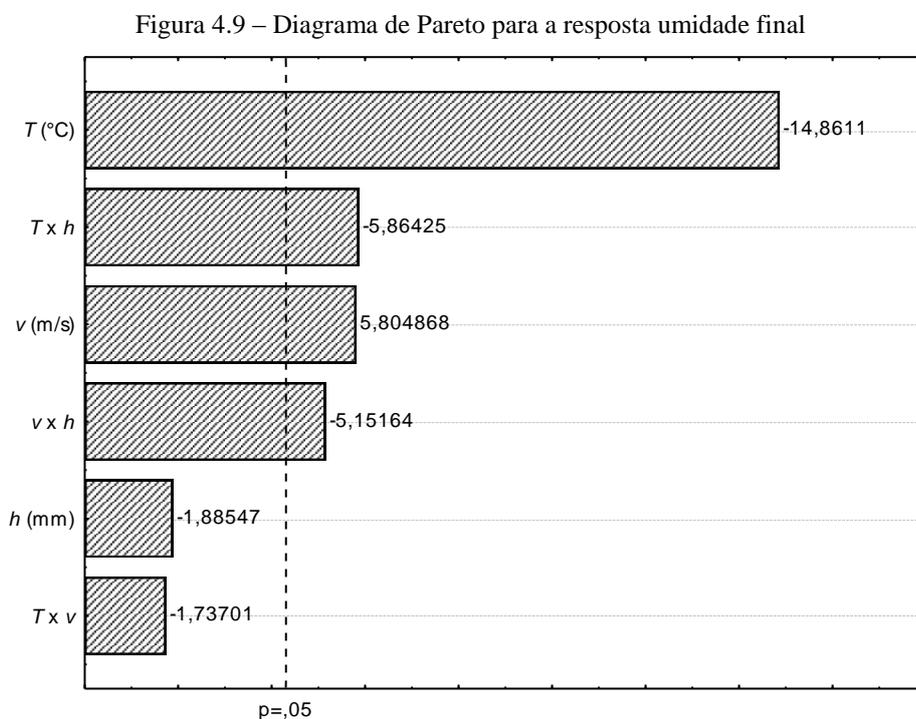
Ensaio	Contagem 4° dia	Contagem 12° dia	Total	Média (%)	U_{BU} (%)	U_A ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ss}}$)	U_R (%)
<i>In natura</i>	46	8	54				
	51	9	60	$59,0 \pm 4,0$	$9,89 \pm 0,01$	0,126	-
	56	7	63				
1	57	0	57				
	50	4	54	$57,0 \pm 2,0$	$5,06 \pm 0,01$	0,015	12,19
	57	3	60				
2	46	9	55				
	37	15	52	$55,0 \pm 2,0$	$5,68 \pm 0,04$	0,011	9,43
	52	6	58				
3	58	1	59				
	48	6	54	$52,3 \pm 5,5$	$7,34 \pm 0,15$	0,015	12,33
	36	8	44				
4	40	7	47				
	45	6	51	$49,3 \pm 1,5$	$5,35 \pm 0,04$	0,021	17,03
	36	14	50				
5	36	16	52				
	23	24	57	$53,3 \pm 2,4$	$9,04 \pm 0,11$	0,016	36,15
	19	32	51				
6	41	14	55				
	36	3	39	$44,0 \pm 7,3$	$8,95 \pm 0,12$	0,019	42,11
	36	2	38				
7	30	14	41				
	41	12	53	$48,6 \pm 5,1$	$7,01 \pm 1,28$	0,017	37,98
	34	18	52				
8	50	15	65				
	36	18	54	$59,0 \pm 4,0$	$8,44 \pm 0,01$	0,021	46,65
	23	25	58				
9	44	3	47				
	41	2	43	$47,0 \pm 3,1$	$6,79 \pm 0,07$	0,019	25,50
	49	2	51				

Fonte: Autor, 2014.

Observa-se na Tabela 4.5 que o aumento no valor da temperatura de 40 °C (ensaios 5, 6, 7 e 8) para 60 °C (ensaios 1, 2, 3 e 4) causou uma diminuição no valor da umidade final em base úmida das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L). Este resultado está de acordo com a física do processo. Na teoria da secagem, a retirada de umidade ocorre por conta da busca pelo equilíbrio termodinâmico entre o ar circundante e o material sólido. Como modificações na temperatura do ar de secagem causam mudanças na umidade relativa do sistema (atividade de água), é esperado que em temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água é menor, o valor da umidade do produto final seja inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas. Para os resultados obtidos da umidade absoluta e da umidade relativa, foi verificado que o ensaio 2 (condição de $T = 60$ °C, $v = 1,0$ m/s e $h = 0,5$ cm) forneceu os menores valores destas grandezas se comparados com as demais condições de

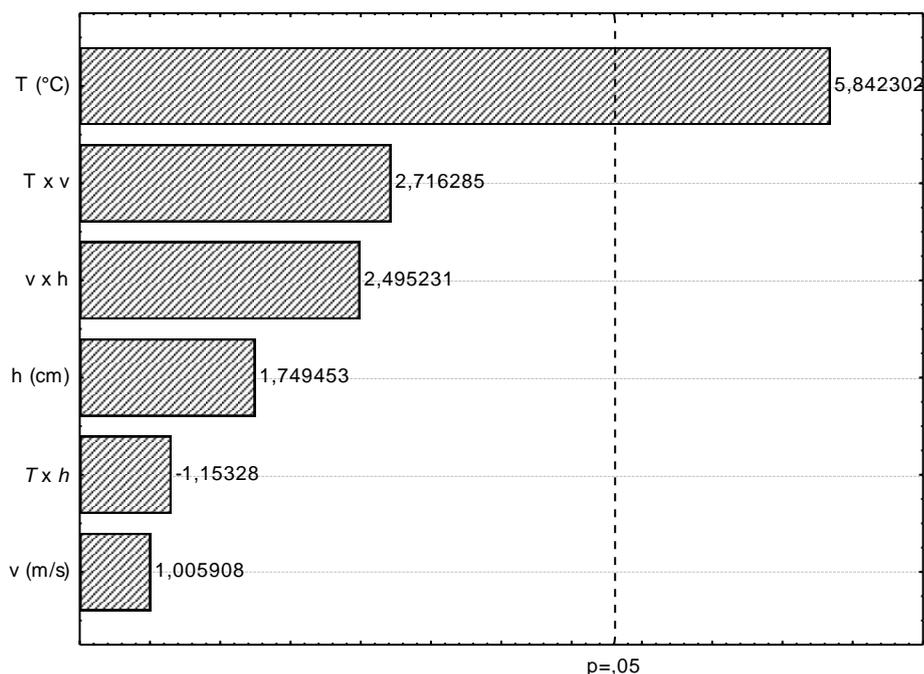
secagem abordadas. Em relação à germinação, é observado na Tabela 4.5 que os valores encontrados estão na ordem de 44 a 59 % para as amostras secas neste estudo. Dentre as secagens, a amostra que obteve o maior valor médio de germinação, com valor de 59 %, foi a realizada no ensaio 8 (condição de $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 1,0\text{ m/s}$ e $h = 1,0\text{ cm}$). Esse valor é muito próximo ao obtido nas sementes fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Pecuária Sul da cidade de Bagé/RS e indica que esta secagem não modificou a qualidade fisiológica das sementes.

Para uma melhor compreensão da discussão que foi efetuada sobre a análise da umidade final em base úmida e da germinação no ponto de vigor (contagem 4º dia) das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L), são apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10 os diagramas de Pareto do planejamento experimental fatorial 2^3 . Nesse diagrama, a magnitude da influência do efeito sobre a resposta umidade final em base úmida e germinação no ponto de vigor 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.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 4.10 – Diagrama de Pareto para a resposta de germinação no ponto de vigor.



Fonte: Autor, 2014.

Analisando-se a Figura 4.9, para a resposta umidade final em base úmida, observa-se que o fator temperatura de secagem foi o fator que mais influenciou a resposta U_{BU} final das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L). Para este fator, o sinal negativo indica que o aumento na temperatura promoveu uma diminuição no valor da resposta umidade final em base úmida. Este resultado condiz com as explicações efetuadas na Tabela 4.5, onde foi constatado que modificações na temperatura do ar de secagem causam mudanças na umidade relativa do sistema (atividade de água) e por este motivo é esperado que em temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água é menor, o valor da umidade do produto final seja inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas. Para a Figura 4.10, foi observado que o fator, que teve uma magnitude do efeito com significado estatístico para $p=0,05$, também foi a temperatura de secagem. Na análise desse fator foi verificado uma magnitude de efeito positivo, isto é, o aumento da temperatura de secagem de 40 para 60 °C promoveu um aumento na resposta germinação no ponto de vigor.

5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões deste trabalho com respeito aos objetivos propostos para esta dissertação de mestrado.

Na caracterização física das sementes fornecidas pela Embrapa foi possível obter-se um valor de umidade em base úmida de $10,00 \pm 0,06$ %, de diâmetro de sauter de $1,37 \pm 0,01$ mm, de massa específica real de $1363,66 \pm 0,67$ kg/m³, de massa específica *bulk* de $858,28 \pm 5,30$ kg/m³, de porosidade do leito estático de $0,37 \pm 0,01$, de esfericidade de $0,98 \pm 0,01$, de ângulo de repouso de $25,34 \pm 0,01$ ° e de germinação de $66,00 \pm 3,33$ %.

No estudo do processo de reumidificação pode-se concluir que o mesmo foi adequado para as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), visto que não deteriorou as sementes e possibilitou aumentar os níveis de umidade para valores compreendidos entre 14 a 27 %. Também se pode concluir através deste estudo que o processo de reumidificação mais adequado para as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é o que ocorreu nas condições de temperatura de 40 ° C em um tempo de 24 h.

No estudo das isotermas de dessecção, pode-se concluir que a forma da isoterma na qual as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) seguem é a do tipo II da classificação de Brunauer de 1938 e que o modelo matemático que melhor descreve seu comportamento foi o modelo de Peleg com um R^2 na ordem de 0,989 a 0,997 e um erro relativo P_p na ordem de 0,262 a 1,686.

Quanto às cinéticas de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) pode-se concluir que as mesmas tiveram um comportamento típico de secagem com períodos de taxa constante e decrescente. Na avaliação das curvas do adimensional de umidade em função do tempo pode-se concluir que os aumentos na temperatura e na velocidade do ar de secagem promoveram um aumento na força de secagem, diminuindo o tempo de processo. Para a altura da bandeja, pode-se concluir que o aumento da mesma, dificulta o processo de transferência de massa, aumentando assim o tempo de secagem. Para a difusividade efetiva, pode-se concluir que o aumento na velocidade do ar de secagem, na temperatura de secagem e na altura da bandeja, proporcionaram um aumento no D_{ef} de todo o processo de secagem. Conclui-se também que, dos modelos matemáticos testados, o que melhor representou a cinética do processo de secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi o modelo de Midilli, com coeficientes de determinação acima de 0,99 e erro relativo na ordem de 0,63 a 3,75.

Para a análise de umidade final, conclui-se que a temperatura foi o fator que mais influenciou a resposta umidade final em base úmida das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.). Pela análise do diagrama de Pareto foi possível concluir que a temperatura foi o fator que mais influenciou na resposta umidade final com um nível estatístico de confiança de 95%.

No estudo da influência do processo de secagem sobre a germinação das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), conclui-se que os testes fisiológicos das sementes secas apresentaram índices de germinação na ordem de 44 a 59 %, sendo o maior valor obtido na secagem realizada na condição de $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 1,0\text{ m/s}$ e $h = 1,0\text{ cm}$. Esse valor, que é muito próximo ao obtido nas sementes fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Pecuária Sul da cidade de Bagé/RS, indica que esta secagem não modificou a qualidade fisiológica das sementes. Pela análise do diagrama de Pareto foi possível concluir que a temperatura foi o fator que mais influenciou na resposta germinação no ponto de vigor com um nível estatístico de confiança de 95%.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- ✓ Estudar a secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em diferentes condições de temperaturas e velocidades do ar de secagem;
- ✓ Realizar o estudo das isotermas de sorção em outros níveis de temperatura;
- ✓ Analisar outros modelos matemáticos empíricos e também modelos mecanísticos para descrever a cinética de secagem;
- ✓ Desenvolver estudos semelhantes aos que foram efetuados neste trabalho utilizando outros tipos de secadores;
- ✓ Aperfeiçoar o processo de germinação pela quebra da dormência via pré-condicionamento a frio;
- ✓ Analisar a resposta do processo de secagem em sementes previamente tratadas pelo método de submersão em álcool.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JUNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. *Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n° 3, p.349-353, 1999.

AGUINAGA, A. J. Q. *Caracterização de sistemas de produção de bovinos de corte na região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Doutorado), p.51, 2009.

ALCÂNTARA, S. R.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P. *Isotermas de adsorção do pedúnculo seco do caju*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n° 1, p.81-87, 2009.

ALMEIDA, L.; MAEDA, J. A.; FALIVENE, M.P.S. *Efeito de métodos de escarificação na germinação de sementes de cinco leguminosas forrageiras*. Bragantia, Campinas, v.38, n° 9, p.83-96, 1979.

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

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 (Doutorado), p.232, 1997.

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

BEUSELINCK, P.R. *Trefoil: The science and technology of Lotus*. Madison, CSSA, p.9, 1999.

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*. Editora da Unicamp, p.245-266, 1992.

BLAHOVEC, J. *Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach*. Journal of Food Engineering, v.65, p.489-495, 2004.

BORBA, C. S.; ANDRADE, R. V. *Qualidade das sementes*. Embrapa, Sete Alagoas/MG, p.5, 1993.

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.

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

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.

BRUIN, S.; LUYBEN, K. C. A. M. *Drying of food materials: a review of recent developments*. In: *Advances in Drying*, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1980. In: 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.

CARAMBULA, M. *Produccion y manejo de pasturas sembradas*. Montevideo, Hemisferio Sur, p.577, 1977.

CARAMBULA, M. *Produccion de semillas de plantas forrajeras*. Editora Hemisferio Sur, p.332-335, 1984.

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, P. C. F.; DOS SANTOS, D. T.; GONÇALVES, E. N.; DE MORAES, A.; NABINGER, C. *Forrageiras de clima temperado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Doutorado), p.2, 2010.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; JÚNIOR, M. S. S. *Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n° 9, p.87-994, 2013.

CASTRO, C. R.; CARVALHO, W. *Superação da dormência tegumentar em sementes de cornichão (Lotus corniculatus L.)*. Revista Sociedade Brasileira de Zootecnia. Viçosa, v.21, n° 6, p.1009-1013, 1992.

CAVARIANI, C. *Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

CHEN, C.; JAYAS, D. S. *Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products*. Transactions of ASAE, v.41, n° 6, p.1755-1760, 1998.

CHIRIFE, J. *Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods*. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in drying*. Washington Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p.73-102, 1983. In: MARTINS, P. C. *Secagem de Cebola (Allium cepa L.) em Camada Delgada: Estudo da Cinética e das Características do Produto Desidratado*. Departamento de Química, Fundação Universidade de Rio Grande (Mestrado), 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. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n° 2, p.501-510, 2007.

CURTIS, K.; MCKERSIE, B. O. *Growth potential of the axis as a determinant of seeding vigor in birdsfoot trefoil*. Crop Science, v.24, p.47-50, 1984.

DA SILVA, G. M.; MAIA, M. B.; MAIA, M. S. *Qualidade de sementes forrageiras de clima temperado*. Embrapa-Pecuária Sul, Bagé, p.13, 2011.

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

DÍAZ, P.; MONZA, J.; MÁRQUEZ, A. *Drought and saline stress in Lotus japonicus*. In: MÁRQUEZ, A. (Ed.). *Lotus japonicus Handbook*. Oxford: Springer, 2005.

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

EICHELBERGER, L.; MAIA, M. S.; PESKE, S. T.; MORAES, D. M. *Efeito da pré-limpeza na qualidade fisiológica de sementes de azevém anual (Lolium multiflorum Lam.) submetidas ao retardamento da secagem e ao armazenamento*. Revista Brasileira de Sementes, v.22, n° 2, p.268-278, 2000.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, *Centro de Pesquisa de Pecuária dos Campos Sulbrasilieiros. Melhoria da oferta forrageira para a Região Sul – novas tecnologias*. Bagé, p.62, 2000.

ETTLIN, W. H.; LAVERACK, G. *Seed quality in Lotus corniculatus in relation to pod maturity and harvest treatment*. Lotus Newsletter, v.27, 1996.

FARIA, L. J. G.; ROCHA, S. C. S. *Optimization of Annatto (Bixa orellana L.) Drying in Fixed Bed*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.17, n° 4, 2000.

FELIPE, C. A. S. *“Influência das Variáveis de Processo na Qualidade de Sementes de Soja Submetidas à Secagem em Leito Deslizante e Escoamentos Concorrentes”*. 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*. Universidade federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Fitotecnia (Mestrado), p.50, 2011.

FERREIRA, M. M. P. *Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial*. Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (Doutorado), 2003.

- FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. *Isotermas se adsorção de umidade da pitanga em pó*. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.7, n° 1, 2007.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- FUMAGALLI, F.; *Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de brachiária brizantha*. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos (Doutorado), 2007.
- FURTADO, G. F.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SANTOS, P. *Secagem de polpa de ceriguela pelo método de camada de espuma*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.12, n° 1, p.9-14, 2010.
- GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3° Edição, México, CECSA, 1998.
- GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. *Caracterização e isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.4, n° 2, p.157-165, 2002.
- GONELI, A. L. D. *Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento*. Universidade Federal de Viçosa (Doutorado), p.19, 2008.
- GOUVEA, C. A. K.; BORZIO, R. F., BERRETTA-HURTADO, A. L. *Reumidificação de Folhas de Tabaco: Uma Proposta mais Sustentável*. 4th International Workshop. Advances in Cleaner Production – Academic Work. São Paulo, p.1-10, 2013.
- GRANT, W. *Interspecific hybridization and amphidiploid of Lotus as it relates to phylogeny and evolution*. In: BEUSELINCK, P.R. (Ed.). *Trefoil: the science and technology of Lotus*. Madison, CSSA, p.10-20, 1999.
- HAGHI, A. K.; AMANIFARD, N. *Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.25, p.491-501, 2008.
- HAMM, J. B. S. *Análise da Secagem de Azevém (Lolium multiflorum) em Leito Fixo com Escoamento de Ar Paralelo*. Universidade Federal do Pampa (Mestrado), 2013.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*, 2014.
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. *Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food components*. New York, Academic Press. 1ª ed., p.1374, 1982. In: VIEIRA, H. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. *Isotermas se adsorção de umidade da pitanga em pó*. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.7, n° 1, 2007.
- 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.

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

KEEY, R. B. *Drying of Loose and Particulate Materials*, New York: Hemisphere Publ., p. 29-32, 1992. In: AMBROSIO, M. C. B.; TARANTO, O. P. *The drying of solids in a modified fluidized bed*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.19, n° 3, p.355-358, July–September, 2002.

KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. *Obtenção de isoterms de dessecção de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente*. Ciência e Tecnologia de Alimentos, p.828-834, 2005.

LABUZA, T. P. *Sorption phenomena in foods*. Food Technology, v.22, n° 3, p.15-24, 1968. In: PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. *Considerações termodinâmicas das isoterms*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.10, n° 1, p.83-94, 2008.

LÓPEZ, J.; PRESTES, P. J. Q.; MAGALHÃES, E. *A curva de crescimento e a composição em carboidratos solúveis, estruturais, lignina e proteína e a digestibilidade em cornichão*. In: International Grassland Congress, 1965, São Paulo, Alarico, p.851-887, 1996.

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, v.9, n° 3, p.29-37, 1987.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Biblioteca Nacional de Agricultura (BINAGRI), n° 1, 2009.

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.

MARCOS FILHO J.; TOLEDO, F. F. *Manual de Sementes: Tecnologia da Produção*. Ed. CERES, São Paulo, p. 224, 1977. In: FUMAGALLI, F.; *Estudo da transferência de calor e massa na secagem das sementes de Brachiária brizantha*. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Doutorado), São Paulo, 2005.

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, v.11, n° 3, p.301-306, 2007.

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

MARTINS, P. C. *Secagem de cebola (Allium cepa L.) em camada delgada: Estudo da cinética e das características do produto desidratado*. Departamento de Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, (Mestrado), 2002.

Mc CORMICK, P. Y. *Solids drying fundamentals*. PERRY, R. H. and CHINTON, C. H. Chemical Engineer's Handbook, Editora McGraw-Hill, 5ª edição, 1983.

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

MELO, P. T. B. S.; BARROS, A. C. A. S. *Estudo sobre o consumo de trevo branco (Trifolium repens L.), cornichão (Lotus corniculatus L.) e cornichão El Rincon (Lotus subbiflorus Lag.) no Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira Agrociência, v.9, n° 3, p. 291-295, 2003.

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.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. *A thin layer drying model of parboiled wheat*. Journal of Food Engineering, v.66, p.513-518, 2005.

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.

MOREIRA, M. F. P. *Secagem de Gel Agar*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), 2000.

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

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 Vetor, v. 13, n° 2, p.79-91, 2003.

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

MSU. Disponível em:
<msue.anr.msu.edu/news/birdsfoot_trefoil_fills_a_forage_need_on_many_michigan_farms>.
Acesso em: 13 de maio. 2014.

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.

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

- PALMEIRA, J.; SILVA, E.; CARDOSO, F.; DO NASCIMENTO, J.; DA SILVA, M. *Isotermas de dessorcao em frutos de cajá (Spondia lútea L.)*. Revista Brasileira de almecenamiento, v.29, n° 2, p.76-81, 2004.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. *Estudo de secagem de pêra bartlett (pyrussp.) em fatias*. Ciência Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.21, n° 3, p.288-292, 2001.
- PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. Campinas, 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.
- PERRY, R. H.; CHINTON, C. H. *Chemical Engineer's Handbook*, Editora McGraw-Hill, 5ª edição, 1983.
- PEZZUTTI, A.; CRAPISTE, G. H. *Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic*. Journal Food Engineer, v.31, p.113-123, 1997.
- PIANA, Z. *Produção de sementes de plantas forrageiras de clima temperado*. Florianópolis: EMPASC, p.72, 1986.
- 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 caranguejocidescordatus*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- ROBERTS, E. H. *Physiology of ageing and its application to drying and storage*. Seed Science Technology, v.9, p.359-72, 1981.
- ROSO, C.; RESTLE, J. *Aveia preta, triticales e centeio em mistura com azevém. Produtividade animal e retorno econômico*. Revista Brasileira de Zootecnia, v.29, n° 1, p.85-93, 2000.
- RUSSELLE, M.P.; MCGRAW, R.L.; LEEP, R.H. *Birdsfoot trefoil response to phosphorus and potassium*. Journal of Production Agriculture, v.4, p.114-120, 1991.
- SALOMONI et al., 1994. In: POLÍ, C. H. E. C.; CARVALHO, P. C. F.; MORAES, C. O. C.; GONZAGA, S. S. *Sistema de criação de ovinos nos ambientes ecológicos do sul do Rio Grande do Sul*. Embrapa Pecuária Sul, Bagé, 2008.
- SAMANIEGO-ESGUERRA, C. M.; BOAG, I. F.; ROBERTSON, G. L. *Comparison of regression methods for fitting the Gab model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables*, 1991. In: VIEIRA, H. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.

Isotermas se adsorção de umidade da pitanga em pó. Revista de Biologia e Ciências da Terra, Campina Grande, v.7, n°1, 2007.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHERE, F.; MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. *Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn.* Journal of Food Engineering, v.79, p.168, 2007. In: OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. *Moisture sorption characteristics of microalgae Spirulina platensis.* Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.26, n°1, p.189-197, January-March, 2009.

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

SEANEY, R. R.; HENSON, P. R. *Birdsfoot trefoil.* Advances in Agronomy, v.22, p.119-157, 1970.

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

SILVA, G. M.; MAIA, M. B.; MAIA, M. S. *Qualidade de Sementes Forrageiras de Clima Temperado.* Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Pecuária Sul, 2011.

SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; GOMES, J. P. *Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas.* Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.32, n°2, p.342-353, mar./abr., 2012.

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

STEINER, J. J.; GARCIA DE LOS SANTOS, G. *Adaptive ecology of Lotus corniculatus L. genotypes: I. Plant morphology and RAPD marker characterizations.* Crop Science, v.41, p.552-563, 2001.

STRUMILLO, C. Z.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design.* In: HUGHES, R. Topics in chemical engineering. UK: Gordon and Breach Science Publisher, v.3, 1986. In: OLIVEIRA, E.G. *Secagem de Spirulina platensis: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada.* Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2006.

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

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

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.

VIANDS, D. R.; EHLKE, N. J.; PAPADOULOS, Y. A. *Cooperative Project to develop birdsfoot trefoil with multiple disease resistance*. Newsletter, v.25, 1994.

VÁSQUEZ, C.; DIAZ-CALDERON, P.; ENRIONE, J.; MATIACEVICH, S. *State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content*. Journal of Food Engineering, n°520, p.8-15, 2013.

VEGA, A.; ANDRES, A.; FITO, P. *Modelado de la cinética de secado del pimiento Rojo (Capsicum annuum L.)*. Información tecnológica, n°16, p.3-11, 2005.

WANG, Y.; DOUGLAS, G. B.; WAGHORN, G. C.; BARRY, T. N.; FOOTE, A. G. *Effect of condensed tannin upon lactation performance in ewes*. Agronomy Journal, v.126, p.353-362, 1996.

APÊNDICE A

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

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapyc 1200e V4.01
Analysis Report

Sun Apr 7 11:28:30 2013
User ID: UNIPAMPA

Sample Parameters

Sample ID: CORNIXAO
Weight: 5.8705 g

Analysis Parameters

Cell Size - Small
V Added - Small: 12.6799 cc
V Cell: 19.0307 cc
Analysis Temperature: 19.3 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: 0.0117 %
Average Volume: 4.3035 cc
Volume Std. Dev.: 0.0005 cc
Average Density: 1.3641 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0002 g/cc
Coefficient of Variation: 0.0124 %

----- Run Data -----		
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	4.3020	1.3646
2	4.3086	1.3625
3	4.3074	1.3629
4	4.3065	1.3632
5	4.3040	1.3640
6	4.3046	1.3638
7	4.3037	1.3641
8	4.3031	1.3642
9	4.3031	1.3642
10	4.3043	1.3639

Fonte: Autor, 2014.