



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

REGINALDO PAZ DE FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DA SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE
CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FLUIDIZADO**

Bagé
2016

REGINALDO PAZ DE FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DA SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE
CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FLUIDIZADO**

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

Bagé
2016

REGINALDO PAZ DE FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DA SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE
CORNICHÃO (*Lotus corniculatus* L.) EM LEITO FLUIDIZADO**

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 de Mestrado defendida e aprovada em: **23/09/2016**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe
UFSM

Dr. João Carlos Pinto Oliveira
EMBRAPA-PECUÁRIA SUL

Prof. Dr. Marcilio Machado Morais
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com muita dedicação e com o apoio direto e indireto de diferentes pessoas, sendo todas de extrema importância por cada conquista que envolva a realização deste trabalho. Primeiramente gostaria de agradecer minha família, minha mãe e avó por todo apoio e confiança, e principalmente quem manteve diretamente um apoio e motivação incansável sobre mim, que é minha esposa Marceli, uma companheira de verdade e uma grande estrela na minha vida.

Em relação ao apoio técnico, agradecer o professor Vanderlei e o técnico e amigo Mozer por todo apoio, paciência e atenção a este trabalho e construção do aparato experimental.

Um agradecimento muito especial com certeza vai aos colegas Anderson, Elizandra e Cibele, que sempre estiveram em todos momentos com sua experiência “Engenharística” para me auxiliar, sempre com muito coleguismo e amizade. Um agradecimento mais que especial ao amigo Lucas, ou mais conhecido como Lucão, que está quase doutor estas horas e muitas vezes deixou seus compromissos para me guiar no início de minha trajetória no programa.

O agradecimento especial vai para uma grande inspiração profissional, um profissional que apesar de não possuir uma formação pedagógica, é o melhor professor que encontrei nestes longos anos de sala de aula, um orientador dominante de um conhecimento teórico e prático simplesmente absurdo, fruto de seu trabalho e dedicação que é sempre realizado em alto nível, o Professor André Ricardo Felkl de Almeida. Foi um orgulho receber parte de minha formação de quem com certeza, é o melhor!

RESUMO

O estado do Rio Grande do Sul tem grande destaque em atividades pecuarista como economia regional. Isto implica em uma crescente necessidade da utilização de espécies de sementes forrageiras de estação fria nesta região. Dentre as sementes forrageiras mais adaptáveis ao clima frio tem-se o cornichão (*Lotus corniculatus* L.), uma leguminosa forrageira hibernal, muito versátil, com alta tolerância a acidez do solo a qual é utilizada em ampla escala no Rio Grande do Sul. A semente é o veículo que leva ao agricultor todo o potencial genético de uma cultivar com características superiores, e em seu caminho, pequenas quantidades de sementes são multiplicadas até que sejam alcançados grandes volumes de produção, no decorrer do qual a qualidade dessas sementes estará sujeita a uma série de fatores capazes de causarem perda de todo potencial genético. 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. A operação de secagem aplicada a sementes tem a finalidade de assegurar a conservação deste produto por meio da redução do seu teor de água. Neste caso, onde trata-se de materiais orgânicos, a redução no teor de água deve ser efetuada de maneira bem controlada, necessitando um estudo e análise da operação aplicada ao material, já que a mesma se for realizada de maneira descontrolada pode acarretar na perda do material. 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. A utilização do secador de leito fluidizado para aplicação da operação de secagem vem sendo objeto de investigações científicas, pois este secador apresenta já reconhecidas vantagens que vão desde alta capacidade de secagem pela eficiente transferência de massa e de energia, até redução de tempo de secagem pela rapidez na remoção da umidade e a facilidade de controles. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo uma modelagem matemática e aplicação de simulação da secagem em leito fluidizado, seguida de

testes aplicados experimentalmente através de ensaios realizados em um secador de leito fluidizado confeccionado para este trabalho. Foram realizados estudos de caracterização física e fisiológica das sementes; modelagem e simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fluidizado; confecção do aparato experimental de leito fluidizado que foi utilizado no processo de secagem das sementes de cornichão; caracterização fluidodinâmica do leito fluidizado; secagem das sementes de cornichão em secador de leito fluidizado; estudo do comportamento do modelo simulado e ajustes com a experimentação realizada; análise de sensibilidade paramétrica do modelo proposto, e estudo da influência dos parâmetros do processo de secagem, umidade final e coeficiente global de transferência de massa, sobre a germinação das sementes de cornichão. Os resultados do estudo de secagem ficaram na faixa de 9,00 a 10,22 % em relação a umidade final em base úmida. No que se refere a germinação os valores encontrados ficaram na ordem de 72 a 78 %. Para estas duas respostas a temperatura foi a variável de maior influência. O estudo da modelagem e simulação apresentou-se eficaz para a secagem das sementes de cornichão em leito fluidizado. O coeficiente global de transferência de massa influencia de maneira significativa os índices de germinação das sementes, sendo seu aumento prejudicial a fisiologia das sementes de cornichão (*Lotus coniculatus* L.).

Palavras-chave: Secagem; Cornichão; Leito fluidizado; Modelagem; Umidade Final; Coeficiente Global de Transferência de Massa; Germinação.

ABSTRACT

The Rio Grande do Sul state has great prominence in pastoralist activities as a regional economy. This implies a growing need to use species of fodder seeds cool season in this region. Among the most adaptable forage seeds to the cold weather has the birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) a Winter forage legume, very versatile, with high tolerance to acid which is used in large scale in Rio Grande do Sul. The seed is the vehicle that leads to the farmer all the genetic potential of a cultivar with superior characteristics, and on their way, small amounts of seeds are multiplied until they are achieved high volume production, during which the quality of the seeds will be subject to a number factors capable of causing loss of the entire genetic potential. Faced with such a promising market, obtaining better quality seeds still has difficulties ranging from the production phase in the countryside where the seeds are harvested early in relation to the 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. The drying operation applied to seeds aims to ensure the conservation of this product through reduction of water content. In this case where these are organic materials, reduction in water content must be performed in a well controlled manner requiring a study and analysis of operation applied to the material, since the same if performed in an uncontrolled manner may result in loss of material. In high quality drying seed production technology is taken with one of the most important steps, since it allows reducing the water content at appropriate levels for storage and marketing (12 to 15% humidity), preserves the seeds of physical and chemical changes induced by excess moisture, makes it possible to maintain the initial quality during storage and enables next harvest physiological ripeness. The use of fluidized bed dryer for implementation of the drying operation has been the subject of scientific investigation since this dryer has been recognized advantages ranging from high drying capacity for efficient mass transfer and energy until drying time reducing the speed of moisture removal and ease of controls. Given the above, this study aimed to mathematical modeling and drying simulation application in fluidized bed, followed by tests applied experimentally by tests carried out in a fluidized bed dryer made for this job. physical and physiological characterization studies were performed seeds; Modeling and Simulation of drying seeds birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) fluidized bed; making the fluidized bed experimental apparatus that is used in the drying process of the seed birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.); fluid dynamic

characterization of the fluidized bed; Drying of the seeds birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) in a fluidized bed dryer; model behavior study simulated and adjustments to the trial held; analysis of parametric sensitivity of the model; study of the influence of the parameters of the drying process, the final moisture and overall mass transfer coefficient on the germination of seeds birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.). Drying study results were in the range from 9.00 to 10.22% over the final moisture on a wet basis. As regards the germination values found were in the range 72-78%. For these two answers the temperature was the most influential variable. The study of modeling and simulation showed to be effective in drying the seeds birdsfoot trefoil fluidized bed. The overall mass transfer coefficient influences significantly the levels of seed germination and increase its adverse physiology of seed birdsfoot trefoil (*Lotus coniculatus* L.).

Keywords: Drying; Birdsfoot trefoil; Fluidized bed; Modeling; Final moisture; Global coefficient of Mass Transfer; Germination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fotografia ilustrativa das sementes (a) e da plântula do cornichão (b).....	6
Figura 2.2 – Representação de migração no interior do sólido.....	10
Figura 2.3 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo.....	11
Figura 2.4 – Curva de taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade.....	11
Figura 2.5 – Histerese das isotermas de sorção.....	17
Figura 2.6 – Classificação das isotermas por Brunauer et al., (1938).....	18
Figura 2.7 – Variação da queda de pressão e da porosidade em um leito fluidizado.....	22
Figura 2.8 – Regimes de fluidização.....	23
Figura 2.9 – Diagrama de GELDART (1973) para a fluidização em ar.....	24
Figura 2.10 – Secadores em leito fluidizado.....	26
Figura 3.1 – Sementes de cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	30
Figura 3.2 – Fluxograma organizacional das etapas experimentais e de simulação desenvolvidas neste trabalho de mestrado.....	31
Figura 3.3 – Fotografia ilustrativa das partes superior e lateral do aparato de ângulo de repouso.....	33
Figura 3.4 – Fotografia do equipamento utilizado para a determinação da massa específica real.....	34
Figura 3.5 – Disposição das sementes de cornichão na caixa gerbox.....	35
Figura 3.6 – Estufa germinadora.....	35
Figura 3.7 – Amostras de sementes no interior do banho termostaticado.....	36
Figura 3.8 – Imagem ilustrativa do projeto do leito fluidizado.....	37
Figura 3.9 – Ilustração de forma esquemática da unidade experimental.....	38
Figura 3.10 – Curva de calibração do transdutor de pressão 5 ” _{H2O}	39
Figura 3.11 – Curva de calibração da placa de orifício de 40mm.....	39
Figura 3.12 – Curva de calibração do transdutor de Pressão 2,5 ” _{H2O} , utilizado para medir a queda de pressão no leito.....	40
Figura 4.1 – Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas das sementes de cornichão.....	47

Figura 4.2 – Secador de leite fluidizado manufaturado, utilizado nos ensaios de secagem.....	50
Figura 4.3 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 40°C.....	51
Figura 4.4 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 50°C.....	51
Figura 4.5 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 60°C.....	52
Figura 4.6 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Fick.....	53
Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Page.....	54
Figura 4.8 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Henderson.....	54
Figura 4.9 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Midilli.....	55
Figura 4.10 – Diagrama de pareto para estudo da resposta umidade final.....	60
Figura 4.11 – Diagrama de pareto para estudo da resposta germinação.....	60
Figura 4.12 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação à U_A	62
Figura 4.13 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_R	62
Figura 4.14 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a T_g	63
Figura 4.15 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BU}	63
Figura 4.16 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BS}	64
Figura 4.17 – Temperatura das sementes de cornichão durante o processo de secagem.....	64
Figura 4.18 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_g	67
Figura 4.19 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_s	68

Figura 4.20 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_R	68
Figura 4.21 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_A	60
Figura 4.22 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BU}	69
Figura 4.23 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BS}	69
Figura 4.24 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_g	71
Figura 4.25 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_s	71
Figura 4.26 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_R	72
Figura 4.27 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_A	72
Figura 4.28 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BU}	73
Figura 4.29 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BS}	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores dos parâmetros calculados por Kanaan (2014) para o ajuste do modelo de Peleg.....	19
Tabela 3.1 – Matriz do planejamento fatorial 2^2 com tréplica no ponto central.....	42
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão.....	46
Tabela 4.2 – Umidade em base úmida das sementes de cornichão (<i>Lotus Corniculatus L.</i>) antes e após reumidificação.....	48
Tabela 4.3 – Velocidades de mínima fluidização para as temperaturas de secagem....	52
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.....	56
Tabela 4.5 – Respostas dos ensaios de secagem para semente de cornichão (<i>Lotus Corniculatus L.</i>).....	58
Tabela 4.6 – Resultados do K_p em comparação a germinação das sementes de cornichão em cada condição estabelecida no estudo.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Modelos matemáticos utilizados para avaliar as curvas de cinética de secagem.....	15
Quadro 2.2 – Modelos matemáticos utilizados para avaliar as curvas de isotermas de grãos.....	18
Quadro 2.3 – Modelos de secagem em Leito Fluidizado.....	27

LISTA DE SIGLAS

AOAC – Association of Official Analytical Chemists

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MSU – Michigan State University

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PEAD – Polietileno de alta densidade

RS – Rio Grande do Sul

SEAPA – Secretaria da Agricultura do Estado

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

GAB – Guggenheim-Anderson-de Boer

BET – Brunauer, Emmett e Teller

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔP	Queda de pressão no leito	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$a, a_1, b, b_1, c,$ $c_1, n, k_2,$ k_3, n_1, n_2, C_{BET} a', b'	Constantes	$[-]$
a_r	Semi eixos do elipsoide esferoide	$[L]$
a_w	Área da partícula	$[L^2]$
ρ_{bulk}	Atividade da água	$[-]$
C_{pg}	Densidade <i>bulk</i>	$[ML^{-3}]$
C_{ps}	Calor específico do gás	$[LT^{-2}\theta^{-1}]$
C_{pss}	Calor específico do sólido	$[LT^{-2}\theta^{-1}]$
C_{pv}	Calor específico do sólido seco	$[LT^{-2}\theta^{-1}]$
D	Calor específico de vapor	$[LT^{-2}\theta^{-1}]$
D_{cir}	Altura da base até o bocal	$[L]$
d_e	Diâmetro da circunferência	$[L]$
D_{ef}	Diâmetro equivalente	$[L]$
d_m	Difusividade efetiva	$[L^2T^{-1}]$
ds	Diâmetro médio	$[L]$
e_0	Diâmetro médio de Sauter	$[L]$
F	Espessura de sólidos na bandeja	$[L]$
f	Distância do centro até o limite da pirâmide	$[L]$
G	Taxa de transferência de massa	$[MT^{-1}L^{-2}]$
G_{total}	Germinação	$[\%]$
ρ_g	Germinação total	$[\%]$
G_g	Massa específica do gás	$[MT^{-1}L^{-2}]$
h	Fluxo mássico de gás	$[ML^{-2}T^{-1}]$
H	Coefficiente global de transferência de calor	$[MT^{-3}\theta^{-1}]$
k	Altura do sólido na direção z	$[L]$
K, Ct	Constante de secagem	$[T^{-1}]$
k_1, k_0	Constante associada à entalpia	$[-]$
K_p	Coefficientes de secagem	$[T^{-1}]$
L	Coefficiente global de transferência de massa	$[ML^{-1}\theta^{-1}]$
L_h	Altura do leito	$[L]$
L_s	Altura do leito	$[L]$
m	Massa de sólido seco	$[M]$
$m_{\acute{a}gua}$	Massa total de sólido úmido	$[M]$
m_{as}	Massa de água	$[M]$
m_{au}	Massa da amostra seca	$[M]$
m_{eq}	Massa da amostra úmida	$[M]$
ε_{mf}	Massa da amostra no equilíbrio	$[M]$
m_i	Porosidade em mínima fluidização	$[-]$
N_c	Massa retida	$[M]$
θ	Taxa de secagem constante	$[MT^{-1}L^{-2}]$
P_p	Ângulo de repouso	$[^\circ]$
	Erro relativo	$[\%]$

P_v	Pressão de vapor da água pura	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_w	Pressão parcial	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Q	Taxa de transferência de calor	$[ML^{-2}T^{-3}]$
R^2	Coefficiente de determinação	[%]
ρ_{real}	Densidade real	$[ML^{-3}]$
sin	Seno do ângulo	[°]
t	Tempo	[T]
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco	$[\theta]$
T_{BU}	Temperatura de bulbo úmido	$[\theta]$
T_g	Temperatura do gás	$[\theta]$
$T_{g,t=0}$	Temperatura do gás com tempo igual a zero	$[\theta]$
T_s	Temperatura do sólido	$[\theta]$
$T_{s,t=0}$	Temperatura do sólido com tempo igual a zero	$[\theta]$
u_{ar}	Velocidade superficial do gás	$[L.T^{-1}]$
U_A	Umidade absoluta	$[MM^{-1}]$
U_{BU}	Umidade base úmida	$[MM^{-1}]$
U_{BUi}	Umidade base úmida inicial	$[MM^{-1}]$
U_{BUf}	Umidade base úmida final	$[MM^{-1}]$
U_{BS}	Umidade base seca	$[MM^{-1}]$
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	$[LT^{-1}]$
U_R	Umidade relativa	[-]
$V_{elipsoide}$	Volume do elipsoide	$[L^{-3}]$
V	Vigor	[%]
V_{GU}	Varição de germinação das sementes úmidas	[%]
X	Umidade	[-]
X_0	Umidade inicial no tempo zero	[-]
X_1	Umidade no tempo t_1	[-]
X_c	Umidade crítica	[-]
X_e	Umidade de equilíbrio	[-]
x_i	Fração ponderal retida	[M]
X_m	Umidade da monocamada do material	[-]
x_m	Umidade media	[%]
X_t	Umidade média no tempo t	$[MM^{-1}]$
X_{t0}	Umidade no tempo inicial	$[MM^{-1}]$
Y_{eq}	Fração mássica no equilíbrio	[-]
Y_g	Fração mássica de vapor de água	[-]
$Y_{g,L=0}$	Fração mássica de gás na entrada do leito	[-]
Y_s	Fração mássica de água no sólido	[-]
$Y_{s,L=0}$	Fração mássica de sólido em tempo igual a zero	[-]
Z	Hipotenusa do ângulo	[L]
ρ_s	Massa específica do sólido	$[ML^{-3}]$
ε	Porosidade	[-]
λ	Calor latente de vaporização	$[L^2T^{-2}]$
ϕ	Esfericidade	[-]

SUMÁRIO

1 Introdução	2
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Visão e Características do Cornichão	5
2.2 Qualidade da Semente	7
2.3 Interesse de Secagem em Sementes.....	8
2.4 Fundamentos da Secagem	9
2.5 Cinética de Secagem.....	13
2.6 Isotermas de Sorção.....	16
2.7 Processo de Reumidificação das sementes de Cornichão	20
2.8 Secagem de Sementes em Leito Fluidizado	21
2.9 Modelagem da Secagem em Leito Fluidizado	27
3 Materiais e Métodos para o Desenvolvimento da Proposta.....	30
3.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.) .	31
3.2 Processo de Reumidificação e Isotermas de Dessorção das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.)	35
3.3 Equipamentos e periféricos da unidade de secagem	36
3.4 Caracterização da unidade experimental	41
3.5 Procedimento experimental de secagem.....	41
3.6 Modelo de Secagem para Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	42
4 Resultados e Discussão	46
4.1 Caracterização Física e Fisiológica das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.) .	46
4.2 Processo de Reumidificação das Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	48
4.3 Unidade experimental e caracterização fluidodinâmica.....	49
4.4 Secagem das sementes de cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.)	53
4.5 Modelo de Secagem para Sementes de Cornichão (<i>Lotus corniculatus</i> L.).....	61
5 Conclusão	75
Referências Bibliográficas	77
Apêndices.....	89

1 INTRODUÇÃO

A unidade federativa do Rio Grande do Sul, localizada ao sul do Brasil, tem grande destaque em atividades pecuarista como economia regional. O estado que possui em grande parte de sua região um clima temperado oceânico, e aproximadamente 76% de sua área pastoril utilizada na pecuária de corte, é coberta por uma vegetação natural, sendo que em torno de 8% desta área é melhorada por adubação e sobressemeadura de espécies forrageiras de clima temperado (NABINGER, 2006). A semente é o veículo que leva ao agricultor todo o potencial genético de uma cultivar com características superiores, sendo que neste caminho, pequenas quantidades de sementes são multiplicadas até que sejam alcançados volumes em uma escala comercial, no decorrer do qual a qualidade dessas sementes estará sujeita diversos fatores capazes de causarem perda de todo potencial genético (PESKE et al., 2006). Minimizar tais perdas, com a produção de quantidades adequadas, é o objetivo principal de um programa de sementes. O uso de sementes forrageiras é de grande importância para tais atividades, já que é à base de feno, silagem ou a mais importante neste trabalho que é o melhoramento de pastejo natural. Forrageiras são *in natura*, ou seja, de origem vegetal consumível em seu estado natural.

Apesar das qualidades deste tipo de semente, apenas 2% das áreas utilizadas para pastagens no Brasil e algo semelhante no Rio Grande do Sul são cobertas por sementes de espécie forrageiras cultivadas (DALL'AGNOL et al., 2002). Essa baixa persistência e utilização podem estar relacionadas a problemas de estabelecimento e manejo.

O clima frio predominante por um longo período anual na região requer qualidades específicas de sementes, as quais devem ser bem adaptáveis ao clima. Dentre as sementes forrageiras mais adaptáveis ao clima frio tem-se o cornichão (*Lotus corniculatus* L.), uma leguminosa forrageira hibernal, muito versátil, com alta tolerância a acidez do solo a qual é utilizada em ampla escala no Rio Grande do Sul. Esta semente é indicada para pastagem permanente em regiões de clima temperado (BALL et al., 2007). Segundo Santos (2011) ela possui um valor nutritivo semelhante ao da alfafa, além de ter a vantagem de ser menos exigente em questão a fertilidade do solo.

O processo envolvendo plantio, colheita e armazenagem das sementes, requer atenção para um controle de qualidade e adequação sem prejuízos de produtividade. Segundo Marcos Filho (1987), para se obter um bom rendimento em cultivos, é indispensável o uso de sementes com alta qualidade e que estejam dentro dos padrões estabelecidos pelo mercado.

Na produção de sementes de alta qualidade a secagem é tida com uma etapa dentre as diversas, de maior importância, pois permite a redução do teor de água da semente quando colhida para uma margem em níveis adequados ao armazenamento e também comercialização (12 a 15 % de umidade), além de preservar as sementes de alterações físicas e químicas induzidas pelo excesso de umidade, tornando possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento e possibilitando colheitas próximas da maturação fisiológica. Por consequência, temos um conjunto de características que determinam a capacidade de sementes apresentarem desempenho adequado quando expostas a diferentes condições ambientais, sendo que o desempenho pós-semeadura pode refletir diretamente sobre a produção final.

Quando colhidas, sementes apresentam teores de umidade inadequados para um possível armazenamento. Se armazenadas desta forma, poderá haver no processo perdas de qualidade, acarretando em prejuízos financeiros e de produtividade. Uma alternativa para solução deste problema é submeter à semente um processo de secagem. A operação de secagem aplicada a sementes é um tratamento de remoção de água livre, permitindo que sejam cumpridas as especificações a respeito da matéria prima em questão. Este trabalho tem como objetivo principal realizar a análise experimental e da simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fluidizado. Para alcançar este objetivo foram efetuadas as seguintes etapas:

1. Caracterização física e fisiológica das sementes;
2. Modelagem e simulação da secagem de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fluidizado;
3. Confecção do aparato experimental de leito fluidizado que foi utilizado no processo de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.);
4. Caracterização fluidodinâmica do leito fluidizado;
5. Secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em secador de leito fluidizado;
6. Estudo do comportamento do modelo simulado e ajustes com a experimentação realizada;
7. Análise de sensibilidade paramétrica do modelo proposto;

8. Estudo da influência dos parâmetros do processo de secagem, umidade final e coeficiente global de transferência de massa, sobre a germinação das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Visão e Características do Cornichão

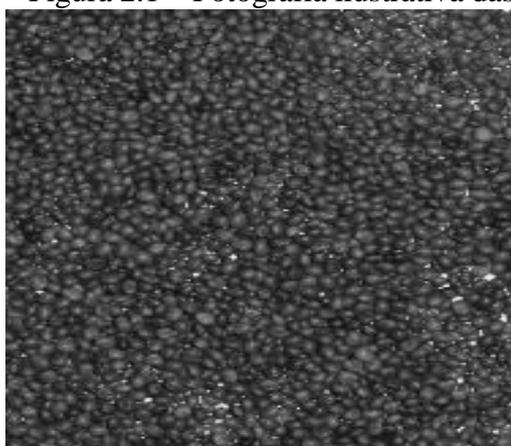
Segundo Piana (1986, apud Rizzi Jr 2008) o Brasil importa grande parte das sementes utilizadas na formação de suas pastagens e, em razão da perspectiva de aumento do consumo interno de sementes de espécies forrageiras, em especial de cornichão, torna-se necessário um aumento na produção e uma melhor disponibilidade no mercado.

O mercado de sementes de espécies forrageiras no Rio Grande do Sul se apresenta de maneira desorganizada, funcionando de forma extrainstitucional, ignorando as Normas e Padrões de Produção de Sementes para o Estado do Rio Grande do Sul (MELO, 2005).

O cornichão (*Lotus corniculatus* L.) é uma semente leguminosa forrageira perene hiberno primaveril, de origem europeia e mediterrânea, porém distribuída em todas as partes do mundo, com exceção de regiões muito frias e de áreas muito tropicais (BEUSELINCK, 1999).

Morfológicamente, apresenta variações quanto ao tamanho, à forma e à coloração das flores. 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). Os caules são mais finos e folhosos do que os de alfafa (*Medicago sativa*). A altura dos caules pode atingir de 0,30 a 0,75m (BALL et al., 2007). Ainda como descrição morfológica, segundo Fontanelli et. al (2012), o cornichão é uma leguminosa com raiz pivotante e muito ramificada, com sistema de raízes profundo. As folhas são pequenas e pinadas, compostas de três folíolos apicais digitados e dois folíolos basais distanciados assemelhando-se a estípulas. Os folíolos não possuem nervuras visíveis ou têm somente a principal aparente. A inflorescência é em forma de umbelas com três a quatro flores de coloração amarelo brilhante. O legume é linear com coloração que varia de marrom a púrpura, cilíndrico, deiscente, bivalvo com falsos septos transversais entre as sementes. As sementes são escuras, globosas e pequenas. As Figuras 2.1 (a) e (b) mostram fotografias ilustrativas das sementes e da plântula do cornichão, respectivamente.

Figura 2.1 – Fotografia ilustrativa das sementes (a) e da plântula do cornichão (b).



(a)

Fonte: Kanaan, 2014.



(b)

Fonte: MSU, 2013.

O cornichão é rústico e se desenvolve melhor em comparação com outras leguminosas, como por exemplo, a alfafa em solos moderadamente ácidos. Apesar do clima frio da região Sul do Brasil, a semente adapta-se à maioria das regiões do Rio Grande do Sul, pois não é uma semente exigente em relação a solos, e se mostra mais tolerante às condições desfavoráveis de inverno em comparação a alfafa. Em termos de qualidade, pode substituir o feno de alfafa. Por essa razão, o cultivo de cornichão é preferido em solos de fertilidade média a baixa em grandes áreas. É pouco tolerante ao sombreamento, sendo prejudicado em consorciação com espécie de porte alto e produtora de grande massa (FONTANELLI & SANTOS, 2011). Apesar da considerável adaptação, apresenta problemas de persistência, principalmente por causa de seu hábito de crescimento ereto (OLIVEIRA & PAIM, 1990). O cornichão possui taninos condensados, o que evita a ocorrência de timpanismo. Sendo assim, recomenda-se a sua implantação em consorciação com outras leguminosas e gramíneas.

A planta possui um valor nutritivo muito elevado. Isso se dá devido aos elevados teores de proteína e digestibilidade. Os dados nutritivos, segundo a empresa PGW Sementes (2014), são tratados como, 24% de proteína bruta e 86% de digestibilidade. O fato de possuir taninos condensados aumenta de 18% a 25% no aproveitamento de proteína, cujos teores atingem 28% quando em estágio bem jovem. Quando do florescimento os teores se situam entre 15 e 18% e, quando as sementes estão maduras, os teores caem para níveis próximos a 8%. No pleno florescimento a porcentagem de proteína é semelhante à da alfafa e do trevo-vermelho.

Segundo Aguinaga (2009), especificamente na região da campanha parte das terras produtivas é arrendada para a produção de grãos no período de 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 Qualidade da Semente

Segundo parâmetros apresentados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013), o sucesso de qualquer empreendimento agrícola baseado na exploração comercial de cultivos vegetais requer a utilização de sementes de alta qualidade, com potencial de produzir plantas vigorosas e produtivas, de maneira uniforme e no menor tempo possível.

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.

Segundo Brooker et al. (1992), são muitos os fatores que contribuem para a perda de qualidade e quantidade dos alimentos e, dentre eles, destacam-se: características da espécie e da variedade, condições ambientais durante o seu desenvolvimento, época e procedimento de colheita, método de secagem e práticas de armazenagem. 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 que englobam as funções vitais de uma semente, as quais são definidas pela sua germinação e vigor (BORBA & ANDRADE et al., 1993). Existem recomendações para testes padrões de germinação e vigor afim de regulamentação de sementes para o comércio. 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 avaliar a qualidade de determinado lote de sementes em laboratório, é necessário dispor de um padrão de germinação de cada espécie, pois cada uma apresenta sementes com características distintas quanto ao seu comportamento fisiológico e germinativo (WIELEWICKI et al., 2006). A avaliação do vigor se torna uma ferramenta fundamental em programas de produção de sementes, tanto do ponto de vista dos produtores, o qual permite o monitoramento da

qualidade da produção, quanto para os consumidores, como elemento norteador na tomada de decisões.

Um fator de grande influencia na produção da semente é a umidade em que a mesma é colhida e armazenada. 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).

Segundo Faroni e Silva (1998) a temperatura inicial dos grãos armazenados, que deve estar igual ou superior à temperatura do ar atmosférico, deve ser reduzida rapidamente para não permitir a deterioração dos grãos, pois quando estes estão frios há menor possibilidade de que isto ocorra. A temperatura está entre os fatores que influenciam no processo de respiração dos grãos. Há um aumento de intensidade de respiração, proporcional ao aumento da temperatura, que fica na dependência do teor de umidade dos grãos. Sob altos índices de umidade, superior a 13-14%, a respiração aumenta rapidamente na maioria dos cereais, o que causa a sua deterioração. Tais fatores apresentados mostram que o processo de secagem se torna de fundamental importância no que se refere a qualidade da semente.

2.3 Interesse de Secagem de Sementes

A operação de secagem aplicada em sementes é fundamental no sistema de produção, pois, além de reduzir o teor de água, a fim de permitir a preservação de sua qualidade fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversa (BAUDET et al., 1999). 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.

Sendo assim, desde a maturidade fisiológica até o momento de sua utilização na semeadura, as sementes estão sujeitas à perda da qualidade fisiológica pelas mudanças bioquímicas e fisiológicas que venham a ocorrer. A deterioração, em muitos casos imperceptíveis na fase inicial, manifesta-se no decorrer do tempo, ocasionando reflexos negativos no vigor das sementes. Segundo Moraes (2000), a rapidez com que ocorre a perda de qualidade das sementes quando as mesmas atingem sua maturidade fisiológica é função da

espécie, do cultivar e das condições impostas às sementes no campo, após a colheita e durante as operações de beneficiamento e 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).

A secagem artificial vem sendo utilizada como uma operação de rotina nas empresas de sementes, principalmente, nos estados do Sul do Brasil e, não obstante as vantagens que apresenta, é uma operação de risco, podendo proporcionar danos irreversíveis se realizada sem os conhecimentos e cuidados necessários à preservação da qualidade inicial das sementes (CARVALHO, 1994; MIRANDA et al. 1999). Sendo assim, a secagem é uma ferramenta muito importante no cultivo de sementes, e seu estudo torna-se fundamental.

Pode-se caracterizar uma semente como higroscópica, ou seja, ganha ou perde água num processo dinâmico, em função da umidade relativa do ar (PESKE, ROSENTHAL, ROTA et al. 2003). A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um produto define sua higroscopicidade, que é muito marcante nos produtos alimentícios e torna-se uma característica fundamental, que irá influenciar os processos de manuseio, estocagem e consumo de materiais biológicos (TEIXEIRA NETO e QUAST, 1993).

Assim, para cada umidade relativa numa temperatura específica, a semente terá um teor de água (umidade), denominado como equilíbrio higroscópico. Um estudo pode ser feito através de isotermas de sorção que descrevem, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio entre uma quantidade de água sorvida pela semente e a umidade relativa, a uma determinada temperatura. As próximas seções deste trabalho discutirão melhor o papel dessas curvas de nível.

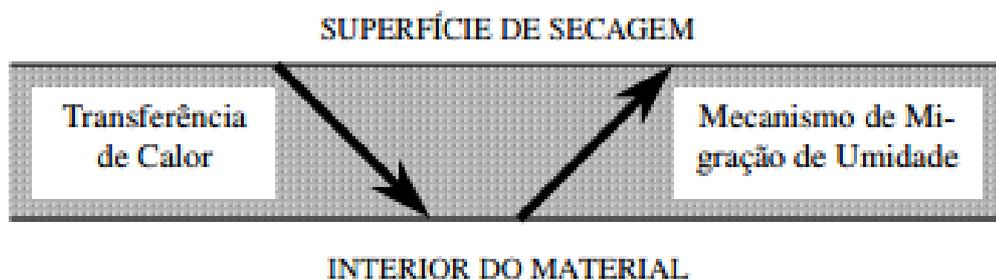
2.4 Fundamentos da Secagem

Por definição, a secagem é um processo de remoção de umidade de um sólido por meio da evaporação (McCORMICK, 1983). A secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação (PARK et al., 2007). Neste trabalho, a secagem se define pela evaporação de água em um material biológico. O processo de secagem se dá pelo fornecimento de calor por uma fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado. Devido à complexidade deste fenômeno, pode-se dizer que a secagem 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). 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).

Antigamente, calor era definido pela teoria do calórico, uma teoria hoje obsoleta, que supunha a existência de um fluido invisível e inodoro. Hoje, o modelo físico para definição de calor é apresentado como uma forma de energia. Logo, transferência de calor pode ser definida como a transição de energia térmica de uma massa (de um corpo) mais quente para uma massa mais fria. Na secagem, a transferência de calor acontece no ambiente para evaporar a umidade superficial de um material específico. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície, conforme a representação ilustrada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Representação de migração no interior do sólido

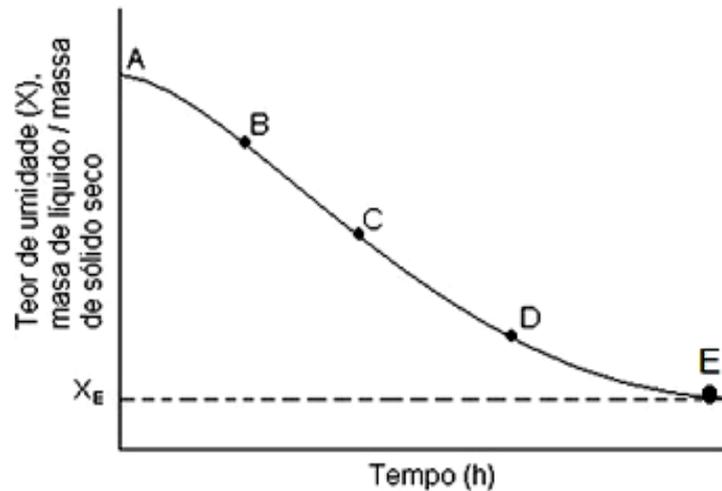


Fonte: adaptado por Park et. al, 2007.

Apesar de não se ter uma relação teórica que represente de maneira generalizada os processos de secagem, na literatura, são definidos mecanismos de transporte importantes e que controlam a operação, como a difusão líquida, a difusão de vapor e 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).

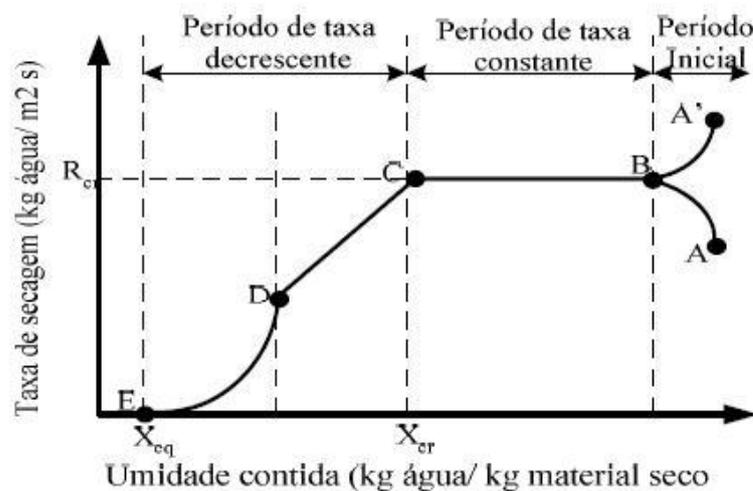
Segundo Park et al., (2007) a transferência simultânea de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida em três períodos característicos. De acordo com McCormick (1983), a secagem pode ser dividida em período de taxa constante e período de taxa decrescente, conforme as Figuras 2.3 e 2.4.

Figura 2.3 – Curva de secagem típica em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo.



Fonte: Foust et al., 1982.

Figura 2.4 – Curva de taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, em função do teor de umidade.



Fonte: adaptado de Geankoplis, 1998.

A Figura 2.3 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 2.4 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 2.4, 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 2.3 e 2.4) 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 2.3 e 2.4, é caracterizado pelo período onde a taxa constante chega ao fim. Este ponto é denominado de umidade crítica (X_c), 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 2.4), 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 2.4.

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

2.5 Cinética de Secagem

O estudo da cinética de secagem é de suma importância para a descrição dos fenômenos de transferência de calor e de massa, sendo indispensável para o projeto de secadores. É através deste estudo que se estabelecem as relações da umidade em função do tempo de secagem para os diferentes períodos de taxa de secagem, conforme ilustração mostrada na Figura 2.4.

No caso de materiais orgânicos, Celestino (2010) relata que a cinética de secagem é o estudo da rapidez, ou taxa, com que esse alimento perde umidade, sendo controlado pelas características da matriz do mesmo e pelas variáveis temperaturas, velocidade e umidade relativa do ar. Nesse sentido, 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).

No período de taxa constante, a transferência de calor e de massa se dá na superfície do material, diferentemente do período de taxa decrescente aonde interações internas agem no fenômeno em questão. As equações definindo as transferências de calor e de massa na interface ar-produto são estabelecidas fazendo referência a uma noção de condutância de superfície interpretada por um fenômeno de camada limite.

A Equação 2.1 representa a equação da taxa de secagem em coordenadas cartesianas na direção do eixo z , sentido horizontal:

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

em que N representa a taxa de secagem, 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.

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

Para o período de taxa decrescente, Park et al. (2007) descreve que há duas teorias que podem explicar o comportamento da secagem, a teoria difusional e a teoria capilar. A teoria difusional se apoia na segunda lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. A velocidade do movimento da umidade é então expressa na forma unidimensional, pela Equação 2.4:

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

sendo D_{ef} o coeficiente de difusão efetiva aplicável ao movimento através do sólido e z a espessura ou a distância da massa sólida. O coeficiente de difusão efetiva é uma variável que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste de curvas experimentais. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), não é intrínseca ao material e convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (LEWIS, 1921).

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. Segundo Brooker et al., 1992, a segunda lei de Fick aplicada à geometria esférica, apresenta um modelo teórico de cinética de secagem através da solução dada pela equação 2.5:

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2} t \right] \quad (2.5)$$

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 r é o raio da esfera.

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

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\left(\frac{\pi}{r}\right)^2 D_{ef} t \right] \quad (2.6)$$

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, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Modelos matemáticos utilizados para avaliar as curvas de cinética de secagem.

Autor	Modelo	Equação
Lewis (1921)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \exp(-kt)$	(2.7)
Page (1949)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \exp(-kt^n)$	(2.8)
Henderson (1968)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k \cdot t) + b_1 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(2.9)
Thompson (1968)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = C \cdot \ln(\exp^{-kt^n}) + B_1 \cdot [\ln(\exp^{-kt^n})]^2$	(2.10)
Midilli (2002)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(2.11)

Fonte: Autor, 2016.

Na Equação 2.7 k é um coeficiente de secagem, na Equação 2.8 k é um coeficiente de secagem e n é um parâmetro de ajuste do modelo, na Equação 2.9 a_1 , b_1 e c_1 são constantes dos modelos e k , k_0 e k_1 são coeficientes de secagem, na Equação 2.10 os parâmetros C e B_1 são funções da temperatura do ar, k é um coeficiente de secagem e n é um parâmetro de ajuste do modelo e na Equação 2.11 a e b constantes do modelo, n é um parâmetro de ajuste e k o coeficiente de secagem. Os valores de k para partículas esféricas são definidos como o expoente da Equação 2.6.

Os modelos empíricos, conforme exemplo da Tabela 2.1, são abordagens baseadas 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). Já os modelos semi-empíricos são, de acordo com Syarief et al., (1984), 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.

2.6 Isotermas de Sorção

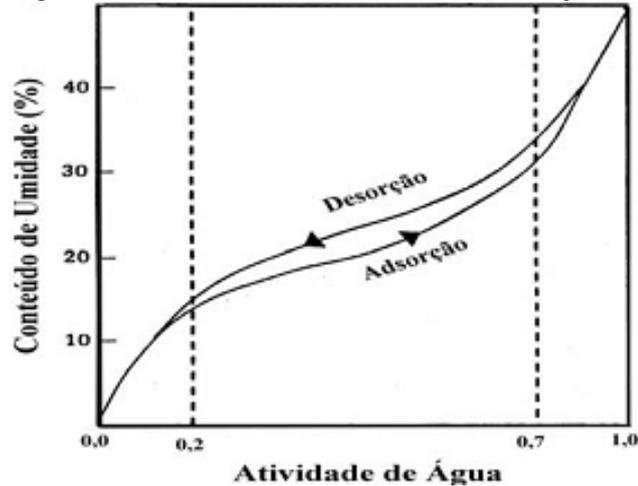
De acordo com Goneli (2008) a vida útil de muitos produtos pode ser determinada através do processo de secagem e armazenamento. Nesses processos o conhecimento da relação entre a umidade do material e a umidade relativa do ar é de suma importância, pois está diretamente relacionada com o equilíbrio termodinâmico 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 2.5. Este fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase.

Figura 2.5 – Histerese das isotermas de sorção.



Fonte: Park et al., 2007.

As três regiões mostradas na Figura 2.5 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 (U_R) 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, conforme apresentado na Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Modelos matemáticos utilizados para avaliar as curvas de isotermas de grãos.

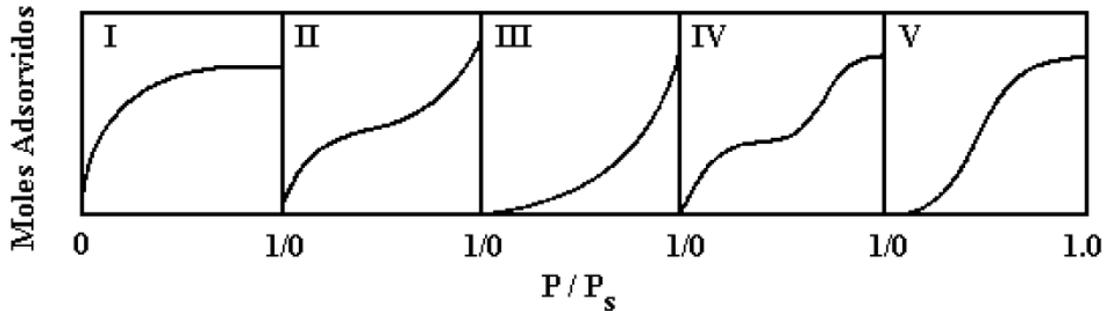
Autor	Modelo	Equação
Henderson	$X_e = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{1/b}$	(2.14)
GAB	$X_e = \frac{X_m \cdot Ct \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$	(2.15)
Peleg	$X_e = k_2 \cdot a_w^{n_1} + k_3 \cdot a_w^{n_2}$	(2.16)
BET	$X_e = \left[\frac{(X_m \cdot c \cdot e^{b/T} \cdot a_w) \cdot [1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (e^{b/T} - 1) \cdot a_w - e^{b/T} \cdot a_w^{n+1}]} \right]$	(2.17)
Oswin	$X_e = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$	(2.18)

Fonte: Autor, 2016.

Nas Equações 2.14 a 2.18 a , b , c , k_2 , k_3 , n , n_1 e n_2 são constantes, 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.

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 2.6 é apresentado um esboço destes tipos de isotermas.

Figura 2.6 – Classificação das isotermas por Brunauer et al., (1938).



Fonte: Schwanke, 2003.

De acordo com Porpino (2009), as isotermas do tipo I podem ser limitadas a poucas camadas moleculares, onde os poros excedem um pouco o diâmetro molecular do adsorvente.

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

Isotermas do tipo IV são obtidas com adsorventes mesoporosos. 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.

Para as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), um estudo anterior a este, desenvolvido por Kanaan (2014), caracterizou o comportamento das isotermas de dessorção através do método gravimétrico estático, empregando 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, para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Nesse estudo, os resultados obtidos nas isotermas de dessorção das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foram analisados através do ajuste dos dados experimentais aos modelos de BET, GAB, Henderson, Oswin e Peleg.

Segundo Kanaan (2014), 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, sendo os valores das constantes do modelo apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.1 – Valores dos parâmetros calculados por Kanaan (2014) para o ajuste do modelo de Peleg.

Valor do parâmetro a 40 °C	Valor do parâmetro a 50 °C	Valor do parâmetro a 60 °C
$k_1 = 0,088, n_1 = 0,231,$ $k_2 = 0,117, n_2 = 4,511$	$k_1 = 0,091, n_1 = 0,306,$ $k_2 = 0,162, n_2 = 5,933$	$k_1 = 0,098, n_1 = 0,456,$ $k_2 = 0,235, n_2 = 11,602$

Fonte: Kanaan (2014).

Outro aspecto importante observado pelo autor foi as que sementes de cornichão, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, apresentam um comportamento de isoterma do tipo II, seguindo a classificação de Brunauer de 1938. 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.

2.7 Processo de Reumidificação em Sementes

Na pecuária, as forrageiras hibernais são as sementes mais utilizadas para a formação de pastagens no Sul no país, onde as pastagens nativas sofrem uma queda de produção em função do inverno rigoroso que ocasiona baixas temperaturas, falta de luminosidade, excesso de chuva e dias mais curtos (SKONIESKI, 2011). Nestas épocas ocorre a necessidade de implementação de pastagens para o auxílio da alimentação dos animais.

A fim de manter o controle de qualidade e reduzir perdas na produção, o processo de reumidificação torna-se de grande importância já que influencia diretamente nos índices de germinação das sementes. O estudo é realizado através da metodologia de saturação proposta por Arnosti Jr. (1997). Essa consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e saturado sob condições de temperaturas específicas. Flores (2013) avaliou a influência do processo de reumidificação de sementes de azevém (*Lolium multiflorum* L.) sob o controle de tempo e temperatura. Os resultados obtidos mostraram que o processo de reumidificação promoveu um aumento nos índices de germinação das sementes. Kanaan (2014) realizou estudos aplicados a sementes de cornichão (*Lotus corniculatus*, L.), onde o autor realiza o processo a fim de trazer as sementes a um estado de umidade semelhante ao encontrado no momento da colheita na lavoura, com o objetivo de estudar a secagem das sementes em leito fixo. Neste estudo, o autor determina como 40 ° C em um tempo de 24 h a melhor condição para representar as sementes como recém colhidas da lavoura.

Um aspecto importante acerca do estudo do processo de reumidificação é relatado por Gouvea et al., (2013), onde afirma que o processo germinativo sofre grande influencia do

processo de reumidificação, sendo que esta etapa pode acelerar e uniformizar a germinação das sementes proporcionando uma melhor qualidade às mesmas. 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).

2.8 Secagem de Sementes em Leito Fluidizado

As definições e fundamentações matemáticas apresentadas nesta seção se baseiam na revisão bibliográfica de autores como Kunii & Levenspiel (1991), Geankoplis (1993), Thober (1995), Grace (1997), Cortez (2002), Rizzi Jr. (2008), e Ustra (2005).

A utilização do secador de leito fluidizado para aplicação da operação de secagem vem sendo objeto de inúmeras investigações científica. Isto se deve a este secador apresentar vantagens já reconhecidas como, a uniformidade de temperaturas e umidade nos produtos secos, a alta capacidade de secagem pela eficiente transferência de massa e de energia, principalmente em umidades elevadas, tempo reduzido de secagem pela rapidez na remoção da umidade e a facilidade de controles (USTRA, 2005).

É possível fundamentar fluidização como a circulação de sólidos juntamente com um fluido (gás ou líquido). Tal fenômeno minimiza a existência de gradientes de temperatura, de pontos muito ativos ou de regiões estagnadas no leito, proporcionando também um maior contato superficial entre sólido e fluido, favorecendo a transferência de calor e de massa. A fluidização então ocorre, quando um fluxo de fluido (gás ou líquido) ascendente através de um leito de partículas adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las junto com o fluido. O leito assume o aspecto de um líquido em ebulição e devido a isso se tem o termo fluidização. Pode-se citar como características de fluidização:

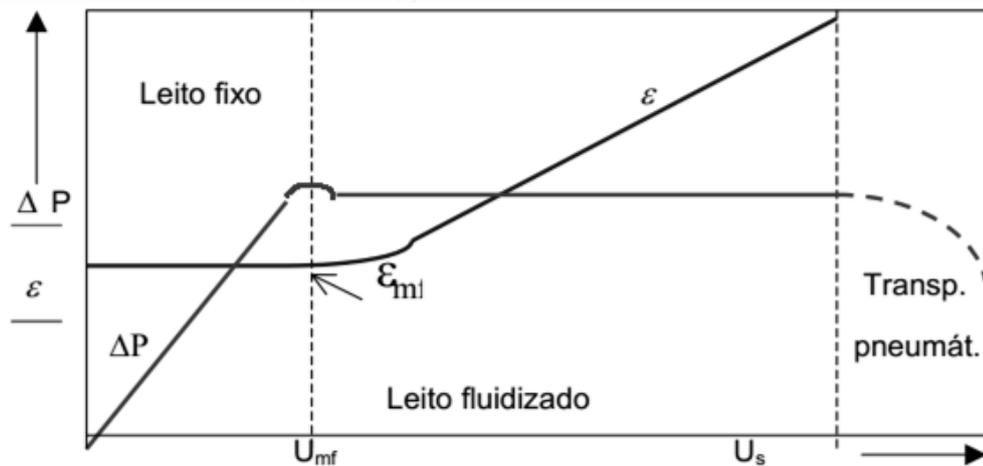
- sob velocidade muito baixa, o fluido percorre pequenos e tortuosos canais, perdendo energia e pressão;
- em um nível intermediário de velocidade de fluidização, a ação dinâmica do fluido permite a reordenação das partículas, de modo a oferecer menor resistência à passagem de ar, e
- já em velocidades muito altas, as partículas deixam de estar em contato e parecem como líquido em ebulição.

Se um fluido passa ascendentemente através de um leito de partículas finas a uma baixa vazão, o fluido acaba percorrendo apenas pelos espaços entre as partículas estacionadas, ou

seja, paradas. Este é um leito que é denominado leito fixo. Com um aumento na vazão do fluido, as partículas distanciam-se e uma pequena vibração e movimentações em regiões restritas podem ser observadas, recebendo neste estado a denominação de leito expandido. Com vazão ainda maior, atinge-se uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás ou líquido.

Em termos físicos, em um leito fixo a força de arraste atuante nos sólidos não é suficiente para compensar seu peso. Com o aumento da velocidade do fluido, a queda de pressão aumenta atingindo um ponto em que o seu valor se iguala ao valor da queda pressão causada pelo peso dos sólidos. Portanto, o ponto da velocidade, U_{mf} , e da porosidade, ε_{mf} , da mínima fluidização, que marca o limite entre as condições de leito fixo e leito fluidizado, pode ser determinado mediante o conhecimento da queda de pressão, ΔP , e da porosidade, ε , através do leito em função da velocidade superficial do gás, U , conforme ilustração da Figura 2.7.

Figura 2.7 - Variação da queda de pressão e da porosidade em um leito fluidizado.

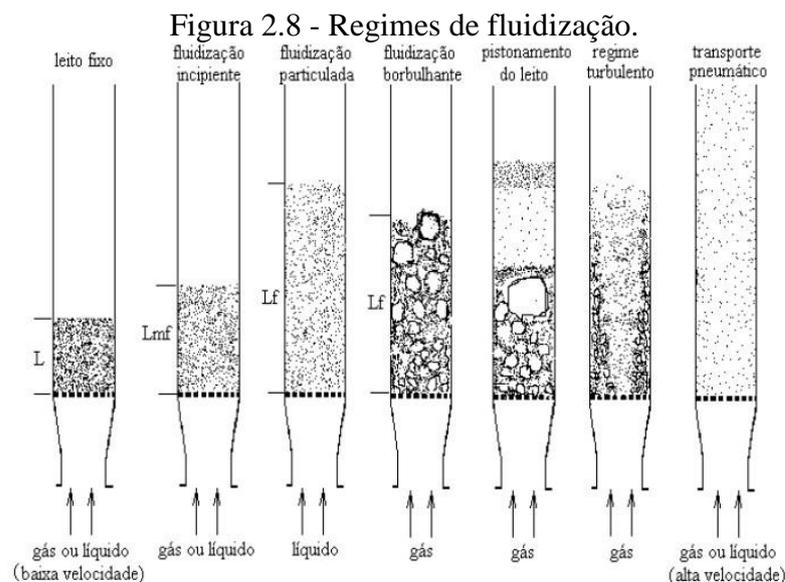


Fonte: Cortez, 2005.

Pode-se observar através da representação esquemática da Figura 2.7, que na região do leito fixo a porosidade é constante, enquanto a queda de pressão aumenta com o incremento da velocidade do fluido. Isto ocorre porque nesta região os sólidos encontram-se estáticos e compactados. Na região do leito fluidizado, a queda de pressão se torna constante e a porosidade do leito de sólidos aumenta com o aumento da velocidade do fluido devido a expansão do sistema sólido. Esse comportamento das variáveis ocorre até condição em que a velocidade do fluido atinge o valor da velocidade terminal dos sólidos, ocasionando assim o surgimento da região de transporte pneumático.

O fenômeno de fluidização em baixas vazões com gás é similar a ocorrida com líquido. Entretanto, em altas vazões a fluidização com gás é diferente da fluidização com líquido. Nos estudos citados no início desta seção, o fenômeno de fluidização pode ser definido como fluidização homogênea (particulada) e fluidização heterogênea (agregativa).

A fluidização homogênea, também conhecida como particulada, ocorre, principalmente, quando o fluido é um líquido. Neste tipo de fluidização, tem-se a expansão do leito de sólidos devido a um aumento da velocidade do líquido, somente aumentando a agitação das partículas em altas vazões. Já a fluidização heterogênea, denominada também de fluidização agregativa, ocorre quando o fluido é um gás em altas velocidades. Neste caso, o sistema apresenta a formação de duas fases que são denominadas de emulsão e de bolhas. A representação esquemática da Figura 2.6 apresenta os regimes de fluidização. Nessa figura são mostradas as principais diferenças entre os sistemas de fluidização agregativa e particulada.



Fonte: Cortez, 2002.

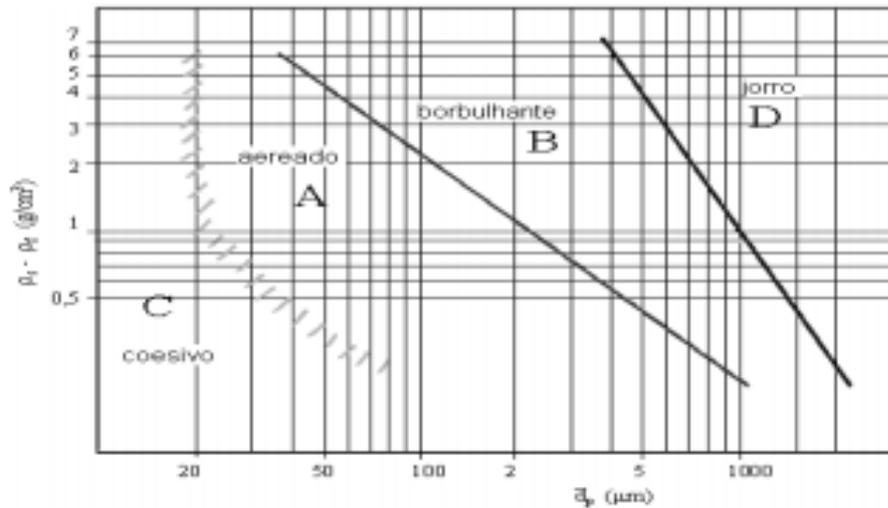
Na situação de baixa velocidade apresentada na Figura 2.8, o sistema apresenta uma baixa vazão, mantendo o fluido percolado pelos espaços entre as partículas estacionadas, tendo assim o leito fixo. Com o aumento da queda de pressão do leito, causada pelo aumento da velocidade do fluido (líquido ou gás), o sistema entra em uma “fronteira” de leito Fixo L e leito fluidizado com velocidade de mínima fluidização L_{mf} . Neste ponto as forças de fricção entre as partículas e o fluido contrabalançam o peso das partículas. No regime de fluidização particulado, as partículas movimentam-se individualmente sem formar vazios nem aglomerados de partículas no leito. O regime de fluidização agregativa borbulhante apresenta-

se geralmente em sistemas gás-sólido, formando bolhas de gás, as quais aumentam conforme ascensão no leito. Em um leito de maior profundidade e de diâmetro pequeno, as bolhas podem eventualmente tornar-se grandes o suficiente para expandir-se pela coluna. Quando as partículas são muito finas e são submetidas a fluidização com alta vazão de gás, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, onde, por consequência, acarreta no desaparecimento da superfície superior do leito. Suspensões de partículas tornam-se mais firmes e as formações de bolhas passam a se apresentar instáveis, onde se observa um movimento turbulento de agrupamentos de sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas. A última representação de regime de fluidização da Figura 2.8 ilustra um sistema onde se tem um ainda maior aumento da velocidade do fluido, ocasionando o arraste dos sólidos do leito com o fluido, denominado como transporte pneumático.

Cada tipo de partícula submetida a um sistema de fluidização pode comporta-se de maneira distinta em relação aos regimes ilustrados na Figura 2.8.

Segundo GELDART (1973) é possível classificar as partículas de acordo com as suas propriedades de fluidização em quatro grupos distintos, sendo eles: partículas do GRUPO A, denominadas assim para quando fluidizadas por ar apresentam uma fluidização não borbulhante começando à velocidade mínima de fluidização, seguida por fluidização borbulhante a medida que aumenta a velocidade; partículas do GRUPO B, onde as mesmas apresentam fluidização borbulhante; partículas do GRUPO C, onde estas são caracterizadas por serem muito finas, sendo incapazes de fluidizar, no estrito sentido da palavra, e partículas do GRUPO D, onde se trata de grandes partículas, geralmente maiores de 1 mm de diâmetro médio, que distinguem-se por sua habilidade de produzir leitos jorro. A Figura 2.9 apresenta a classificação de GELDART (1973) por grupos, relacionadas às propriedades da partícula sólida.

Figura 2.9 - Diagrama de GELDART (1973) para a fluidização em ar.



Fonte: Geldart, 1973.

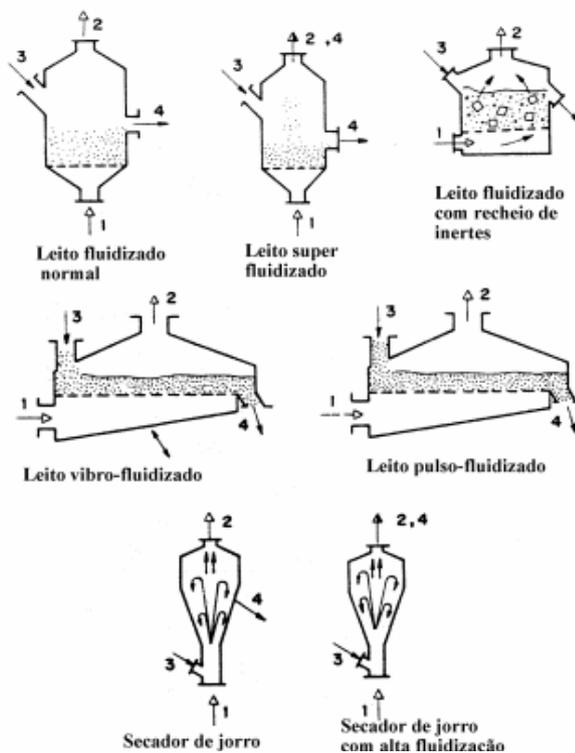
As transições, ou seja, mudanças de um regime para outro podem ser estabelecidas através da estimativa das velocidades que delimitam estes regimes. Por exemplo, na fluidização de um sistema formado por sólido - gás, em um regime borbulhante, a velocidade superficial do gás tem que ser maior que a velocidade mínima de borbulhamento, e também menor que a velocidade mínima de pistonamento. Existem na literatura diversas fundamentações matemáticas para a estimativa das velocidades superficiais do gás fluidizante, que delimitam os diferentes regimes de fluidização representados na Figura 2.9.

Já há algumas décadas o estudo na área de leito fluidizado vem crescendo de interesse e importância, destacando-se em caminhos que levam a novas alternativas de trabalho. Apesar de ser comum a existência de dúvidas ou opiniões diferentes sobre o pioneirismo deste processo, segundo um bom número de autores, a primeira planta a usar o regime de leito fluidizado rápido teria sido um gaseificador a carvão mineral desenvolvido por Fritz Winkler no ano de 1922. Segundo Thober (1995), os estudos e interesse em trabalhos referentes a um leito de fluidização vêm sendo ampliados nos últimos anos, justificando assim, pesquisas que buscam explicar, elucidar, prever e modelar fenômenos fluidodinâmicos de transferência de calor e de massa neste sistema sólido-fluido. No presente trabalho, será utilizado um secador de leito fluidizado para secagem de sementes de cornichão.

Segundo Park et al. (2007), o leito fluidizado pode ser um instrumento de secagem artificial com regime hidrodinâmico ativo, nos quais a agitação do leito ou das partículas é causada por uma força hidrodinâmica exercida sobre as partículas por uma corrente de ar com

uma velocidade apropriada. Neste processo, a interação entre material a ser seco e a corrente de ar cria um leito fluidizado típico ou um leito de fluidização rápida. A maioria dos processos, incluindo os de secagem em leito fluidizado opera dentro de uma faixa de temperatura que vai da ambiente até perto dos 1000°C (CORTEZ, 2002). O efeito da variável temperatura sobre a qualidade de um leito fluidizado é dependente do tamanho da partícula utilizada no secador. A ilustração da Figura 2.10 apresenta alguns tipos de secadores em leito fluidizado.

Figura 2.10 - Secadores em leito fluidizado.



Fonte: Park et al., 2007.

Informações de empresas fabricantes em escala industrial de secadores de leito fluidizado denominam este equipamento de secagem como altamente indicado para materiais em pó, granulados úmidos ou materiais fluidizáveis como filmes moídos (PEBD/PEAD), ou ainda *flakes* (PP/PET). A câmara fluidizada do secador oferece a vantagem de operar tanto com energia térmica residual (gases de chaminé de caldeira), trocador de calor, queimador a gás, resistência elétrica, entre outros. Os sistemas de alimentação e descarga podem ser desenvolvidos de acordo com o material a ser seco ou as instalações físicas do cliente, fazendo com que todo o conjunto se integre ao processo. Um difusor de fluxo de ar responsável pela movimentação do material dentro do secador mantém o material em suspensão, permitindo um fluxo regular. Desta forma, aumenta a eficiência de evaporação da

água contida no material, pelo fato do mesmo encontrar-se na forma pulverizada dentro da câmara de leito fluidizado.

As vantagens e aplicações oferecidas na secagem em leito fluidizado, indicados pela literatura e por muitas empresas presentes na indústria fabricante deste equipamento vão desde o processamento de materiais onde é necessário trabalhar com temperaturas muito baixas, como é o caso de produtos orgânicos, até o processamento de resinas de PVC e polímeros resultantes de processos de reciclagem e processamento de lodo da indústria de papel e celulose.

2.9 Modelagem da Secagem em Leito Fluidizado

Técnicas computacionais e estudos de modelagem tem-se tornado cada vez mais frequentes, visto que esta aplicação possibilita prever comportamento de processos contribuindo a estudo de casos e resultados mais eficientes (ALMEIDA, 2009). Existem inúmeros modelos matemáticos propostos na literatura com objetivo de descrever a operação de secagem em leitos fluidizados. Segundo Rizzi Jr. (2008) estes modelos dependem do tratamento e classificação do material em análise no leito fluidizado

Dentre os vários modelos propostos na literatura, o Quadro 2.1 apresenta alguns destes modelos seguidos de sua caracterização e aplicação.

Quadro 2.3 – Modelos de secagem em Leito Fluidizado.

Modelo	Caracterização	Aplicação
Palancz (1983)	Descreve o secador dividido em três fases: uma fase diluída ou bolha, fase de gás intersticial e uma fase sólida.	Análise de efeito de tamanho de partícula bolha, da velocidade, temperatura de um gás de entrada e tempo de residência e no teor de umidade final dos sólidos de saída.
Ülkü e Uçkan (1986)	O secador é tratado como um sistema homogêneo, com bolhas ignoradas, e é baseado na difusão de líquido e vapor dentro de cada semente de milho.	Secagem de grão de milho num secador de leito fluidizado em batelada.
Chandran et al. (1990)	Analisa o coeficiente de secagem durante o período de taxa constante, os teores de umidade inicial.	Modelo cinético para a secagem de resina de troca iônica e areia em um leito fluidizado
Massarani e Silva Telles (1992)	É composto por uma fase sólida (sólido seco e água líquida) e uma fase gasosa (ar e vapor).	Modelagem de secadores em leitos fixos, deslizantes e cruzados.

Continuação do Quadro 2.3

Brooker et al. (1992)	Modelo de três equações: balanço de energia, de massa e de umidade individual de cada grão.	Secagem generalizada de grãos em leito fluidizado.
Syahrul et al. (2002)	Modelo cinético para estudo de efeito da temperatura do ar de entrada, da velocidade do ar e do teor de umidade inicial.	Modelo de transferência de calor e de massa na secagem de milho em leito fluidizado.
Lima (2004)	Modelo simplificado de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), considerando equilíbrio térmico entre as fases gás e sólido.	Secagem generalizada de grãos em leito fluidizado.

Fonte: Autor, 2016.

O modelo de Palancz (1983) propôs a descrição da secagem de sólidos em leito fluidizado contínuo, no qual se assume que o secador pode ser dividido em três fases distintas, uma fase diluída ou bolha, uma fase de gás intersticial e uma fase sólida.

Ülkü e Uçkan (1986) assim como Booker *et al.*(1992) tratou o sistema como homogêneo, baseando-se na difusão de líquido e vapor dentro de cada grão do material analisado pelo autor.

O modelo cinético de Chandran et al. (1990) analisa o coeficiente de secagem durante o período de taxa constante e os teores de umidade inicial, crítica e de equilíbrio do sólido sob a influência de alguns parâmetros, sendo eles: a temperatura e vazão de ar, a altura do leito e a vazão de sólidos no regime permanente.

Já o modelo de Massarani e Silva Telles (1992), é composto por uma fase sólida (sólido seco e água líquida) e uma fase gasosa (ar e vapor), sendo que, o modelo associa a cada ponto do sistema uma fase sólida e outra gasosa com velocidade, umidade e temperatura próprias. Também na literatura, é apresentado simplificações aos modelos de Massarani e Silva Telles (1992), o que resulta no chamado modelo de duas fases que considera equilíbrio térmico entre as fases gás e sólido. Este modelo foi estudado e aplicado no trabalho de vários autores como CALADO (1993), CALÇADA (1994), MAYTA (1994), BARROZO (1995) e CALÇADA (1998).

O modelo de Brooker et al. (1992) leva em consideração diversas idealizações, como: encolhimento desprezível, gradientes de temperatura no interior dos grãos desprezíveis, condução grão-a-grão desprezível, vazões de ar e de grãos constantes e em fluxo pistonado, estado estacionário ou pseudo-estacionário, paredes adiabáticas, capacidades caloríficas constantes para o ar úmido e para o grão num curto período de tempo, equações de secagem e

de umidade de equilíbrio precisas, a evaporação da umidade ocorre na temperatura do ar de secagem, além de considerar que os grãos num leito fluidizado são perfeitamente misturados e que o ar que sai do leito está em equilíbrio térmico com os grãos (Júnior, 2008).

O modelo de Syahrul et al. (2002) analisa a eficiência térmica do processo de transferência de calor e de massa na secagem de milho em leito fluidizado. Syahrul et al. (2002) observou alta eficiência térmica sempre no período inicial do processo de secagem, uma vez que no período final, com teores de umidade abaixo da umidade crítica, há um aumento na resistência à transferência de massa, verificando a diminuição de efeitos das variáveis externas.

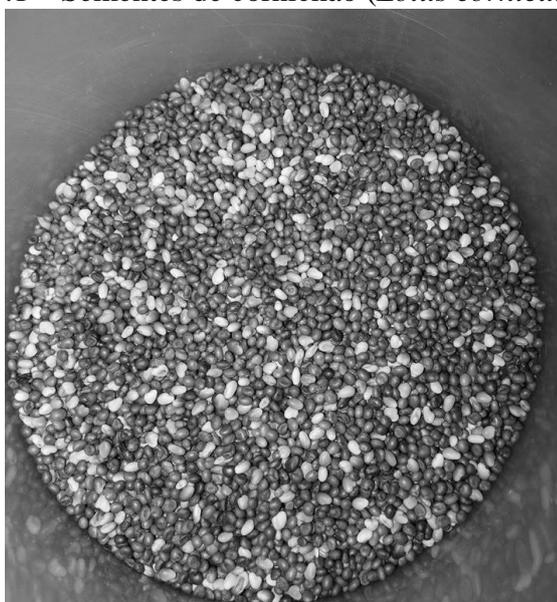
O modelo de Lima (2004) consiste em um balanço de massa para duas fases, fase sólida e fase gás, além de um balanço de energia para a mistura gás-sólido, mostrando-se bastante vantajoso por não apresentar muitos parâmetros ajustáveis.

Dentre todos os modelos aqui apresentados, o de Massarani e Silva Telles (1991) é um modelo a se destacar, pois sua fundamentação apresenta um número reduzido de parâmetros que estão relacionados aos fenômenos de transferência de calor e de massa e à isoterma de secagem. Calado (1993) validou o modelo a duas fases para a secagem de sementes de soja e milho, utilizando um leito deslizante com fluxos cruzados e recirculação pneumática. Já Calçada (1994) utilizou o modelo a duas fases para descrever a secagem de milho em leito fixo. Outro estudo com modelo de duas fases foi o de Mayta (1994), onde o autor determinou o coeficiente global de transferência de massa na secagem de sementes de milho em leito deslizante e fluxos cruzados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.), mostradas na fotografia ilustrativa da Figura 3.1. Este material foi fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Pecuária Sul, na cidade de Bagé/RS. Os experimentos foram realizados a partir de um mesmo lote de sementes, assim, podendo garantir um material com as mesmas características físicas e fisiológicas iniciais. Tal lote de sementes já havia sido utilizado como matéria prima por Kanaan (2014) no estudo de secagem do cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em leito fixo. Para garantir que a qualidade da matéria prima não foi afetada pelo tempo de armazenamento, foi realizada novamente sua caracterização Física e Fisiológica.

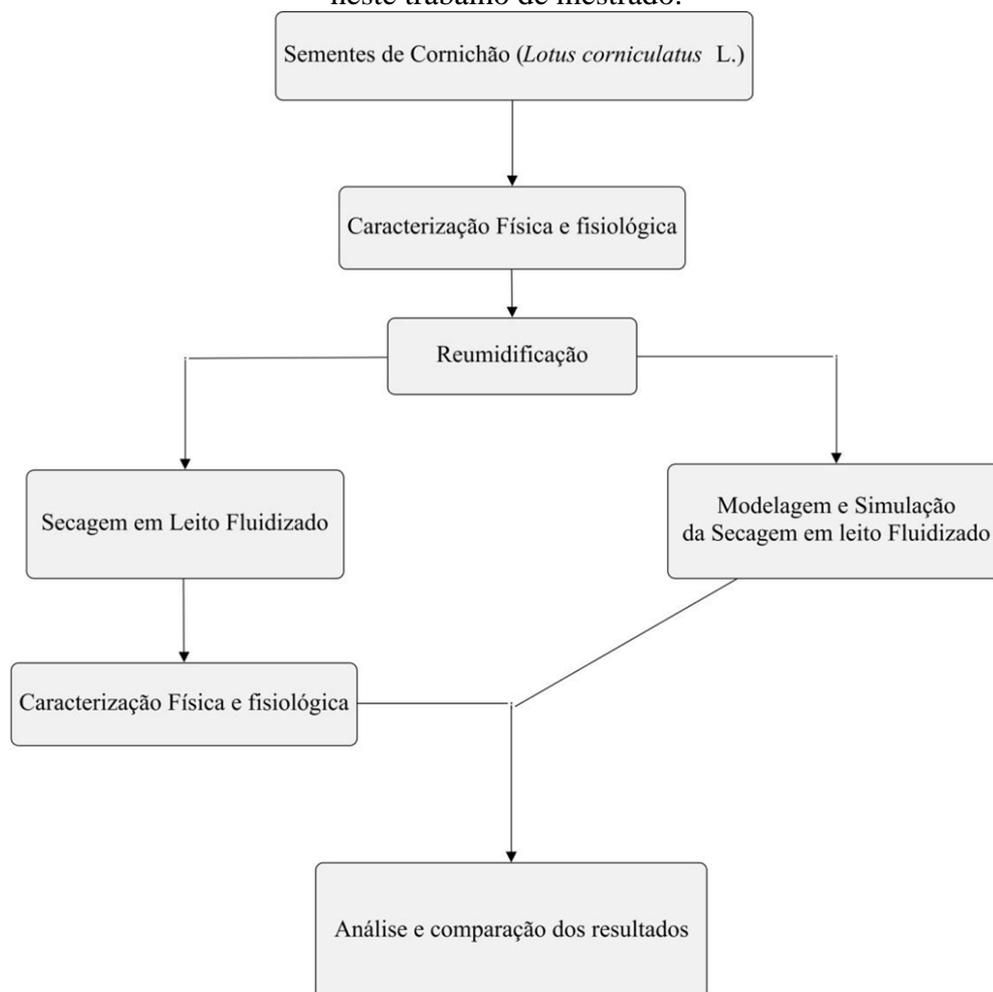
Figura 3.1 – Sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).



Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 3.2 é apresentado um fluxograma organizacional que ilustra as a sequência das etapas experimentais e de simulação desenvolvidas neste trabalho de mestrado.

Figura 3.2 – Fluxograma organizacional das etapas experimentais e de simulação desenvolvidas neste trabalho de mestrado.



Fonte: Autor, 2016.

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

O processo de caracterização física do lote de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi realizado em relação 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 vigor e 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 e umidade em base seca foram realizados pelas Equações 3.1 e 3.2:

$$U_{BU} = 100. \left(\frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{\acute{a}gua} + m_{as}} \right) \quad (3.1)$$

$$U_{BS} = \left(\frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{as}} \right) \quad (3.2)$$

na qual U_{BU} é a umidade em base úmida, U_{BS} é a umidade em base seca, $m_{\acute{a}gua}$ é a massa de água e m_{as} é a massa da amostra seca. A massa de água foi obtida através da Equação 3.3:

$$m_{\acute{a}gua} = m_{au} - m_{as} \quad (3.3)$$

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

Esfericidade - a esfericidade (ϕ) das sementes foi calculada através de 10 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 ± 0,01mm. Como a semente de cornichão apresenta duas dimensões bem definidas com geometria semelhante à de um elipsóide não escaleno, ou seja, do tipo esferoide em forma de comprimido, os cálculos da esfericidade foram feitos segundo a Equação 3.4:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume}}{\text{área da superfície da partícula}} \\ &= \frac{\pi. [d_e]^2}{2. \pi. b'. \left[b' + \frac{a'^2}{\sqrt{a'^2 - b'^2}} \arcsen \left(\frac{\sqrt{a'^2 - b'^2}}{a'} \right) \right]} \end{aligned} \quad (3.4)$$

na qual a' e b' são a metade do valor dos comprimentos longitudinais e transversais do elipsóide esferoide. O diâmetro equivalente (d_e) foi determinado pela Equação 3.5:

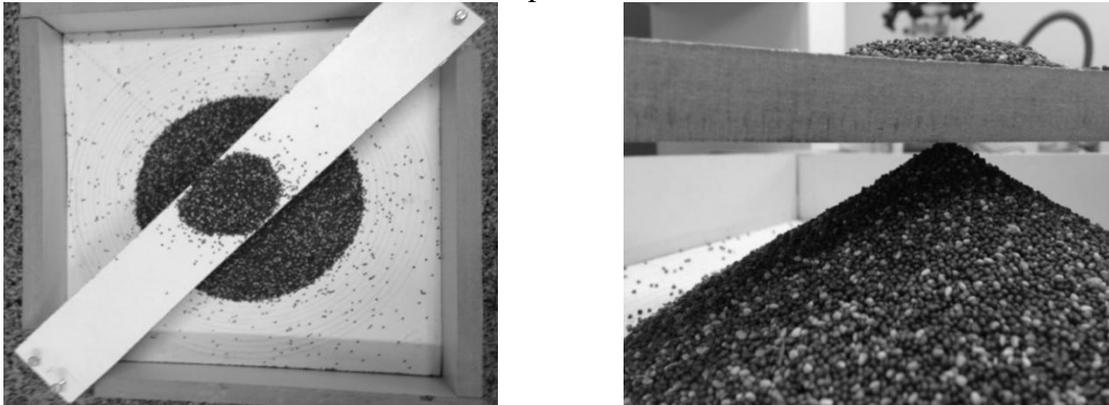
$$d_e = \left(\frac{6}{\pi} \cdot V_{elipsoide} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

sendo o volume do elipsoide esferoide ($V_{elipsoide}$) determinado através da Equação 3.6.

$$V_{elipsoide} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a' \cdot b' \cdot b' \quad (3.6)$$

Ângulo de repouso - por meio de um método empírico denominado funil fixo, foi possível determinar 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 experimental que foi utilizado. Este aparato também foi utilizado por Kanaan (2014).

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



Fonte: Autor, 2016.

De um modo geral, o aparato consistiu de uma caixa de madeira contendo círculos desenhados no fundo da mesma, os quais foram 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 3.7.

$$Z^2 = D^2 + F^2 \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 é definida através de um caso especial da lei dos cossenos quando o triângulo é retângulo e que apresenta a medida da hipotenusa formada pelo ângulo de estagnação dos sólidos, onde Z 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 Z e o seno do ângulo, conforme a Equação 3.8:

$$\sin \theta = \frac{F}{Z} \quad (3.8)$$

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, 12, 14, 24) 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 3.9:

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (3.9)$$

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 3.10:

$$x_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.10)$$

onde m_i é a massa retida na peneira e m é a massa total da amostra de sementes.

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 - 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, 2016.

Este equipamento foi ajustado para realizar 10 medidas sucessivas de massa específica em uma pressão de operação de 18 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 3.11:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{real}} \right) \quad (3.11)$$

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.



Figura 3.6 – Estufa germinadora.



Fonte: Autor, 2016.

3.2 Processo de Reumidificação e Isotermas de Dessorção das Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

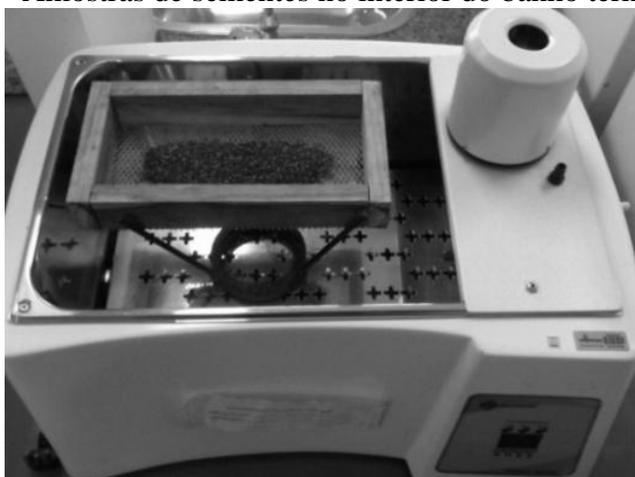
O processo de reumidificação e as isotermas de dessorção deste trabalho foram embasados no estudo efetuado anteriormente por Kanaan (2014).

Pela dificuldade de se obter as sementes na época de colheita, situação ideal para a secagem, o lote de sementes trabalhado apresentava-se secas até o teor de umidade comercial. Sendo assim, foi realizada uma análise do trabalho de Kanaan (2014), onde o autor apresentou um estudo do processo de reumidificação com o objetivo principal de analisar as condições ideais para trazer as sementes de cornichão a uma condição de teor de umidade semelhante à encontrada nas sementes recém-colhidas na lavoura e que passaram por um processo denominado de pré-limpeza.

De acordo com os resultados obtidos por Kanaan (2014), a condição experimental ideal para trazer as sementes de cornichão ao teor de umidade semelhante à encontrada nas sementes recém-colhidas na lavoura é a de 40 ° C em um tempo de 24 h. Por conta disso, todos os ensaios de reumidificação deste trabalho foram feitos sob essas condições.

O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado proposto pela metodologia de saturação de Arnosti Jr. (1997) e adaptado por Kanaan (2014) para sementes de cornichão foi um banho termostaticado (banho maria) da marca Quimis, conforme ilustrado na fotografia da Figura 3.7.

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



Fonte: Autor, 2016.

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. Em cada ensaio de reumidificação foi determinado o teor de umidade das sementes através do método gravimétrico recomendado pela *Association of Official Analytical Chemists - AOAC*, (1997).

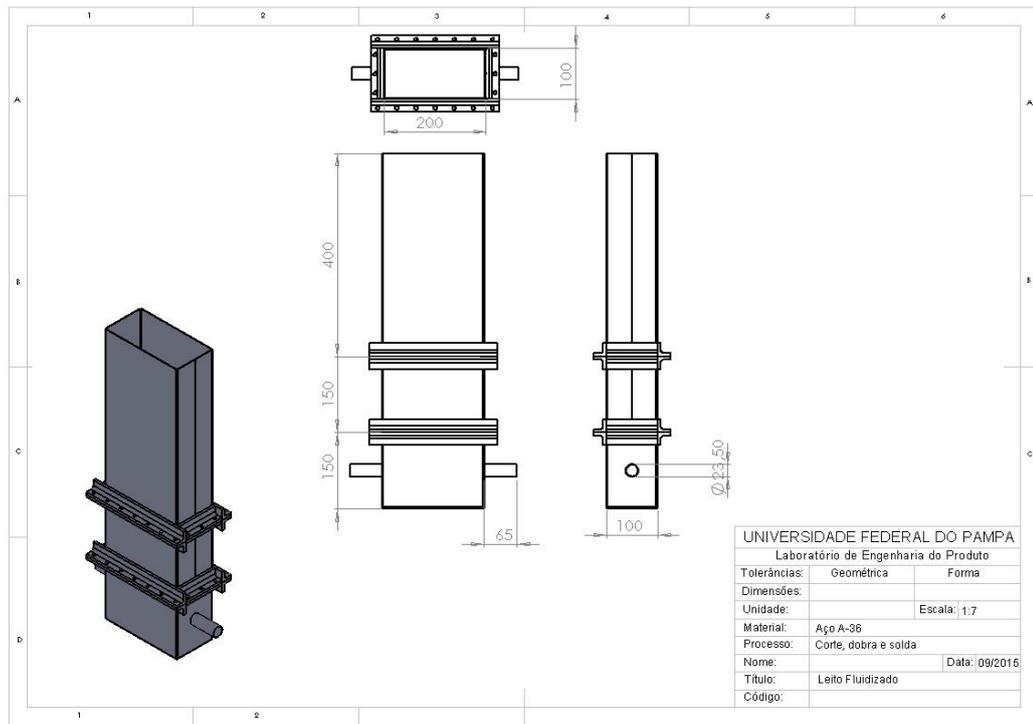
Para as isotermas de dessecção, e respectiva determinação da umidade de equilíbrio das sementes nas condições de secagem estudadas neste trabalho, foram utilizados os dados obtidos por Kanaan (2014), dados esses já descritos na revisão bibliográfica deste trabalho. Em suma, o modelo utilizado foi o de Peleg (Equação 2.16) com os valores das constantes mostradas na Tabela 2.3.

3.3 Equipamentos e periféricos da unidade de secagem

Para o estudo da cinética de secagem, utilizou-se um secador em leito fluidizado manufaturado em colaboração com o curso de Engenharia de Produção no Laboratório de

Engenharia do Produto da UNIPAMPA/Campus Bagé em uma parceria com o Professor Msc. Vanderlei Eckhardt, além da colaboração do Acadêmico Fernando Augusto Mattos de Souza e do técnico laboratorista Mozer Cardoso. Uma imagem ilustrativa do projeto do leito fluidizado é apresentada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Imagem ilustrativa do projeto do leito fluidizado.

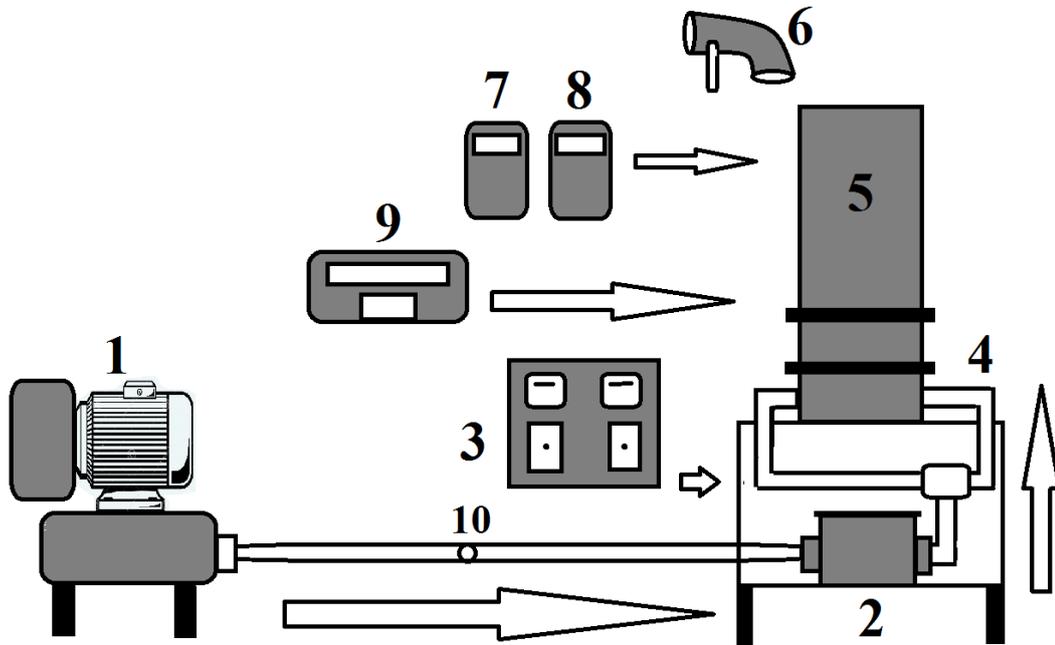


Fonte: Autor, 2016.

A imagem da Figura 3.8 mostra que o leito projetado foi subdividido em três módulos, um módulo que compõe a câmara de entrada do gás na parte inferior e com dimensões de 0,1 m de largura, 0,2 m de comprimento, 0,15 m de altura e com diâmetro dos dutos de entrada de 0,025 m, um módulo que compõe a câmara de distribuição do gás (pleno) na parte intermediária e com dimensões de 0,1 m de largura, 0,2 m de comprimento, 0,15 m de altura e um módulo superior que compõe a região de fluidização e com dimensões de 0,1 m de largura, 0,2 m de comprimento, 0,4 m de altura.

Uma ilustração de forma esquemática da unidade experimental projetada é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Ilustração de forma esquemática da unidade experimental. (1) Soprador radial VOGES 7.5 cV, (2) Aquecedor de ar, (3) Transdutores de pressão *Coli Parmer*, (4) Distribuidor de ar do secador, (5) leito de partículas, (6) Suporte para Termopar T_{bs} e T_{bu} , (7) e (8) Termometro ICEL Td-801, (9) Controlador *Flyever* FE50RPN, (10) Placa de orifício de 40 mm.



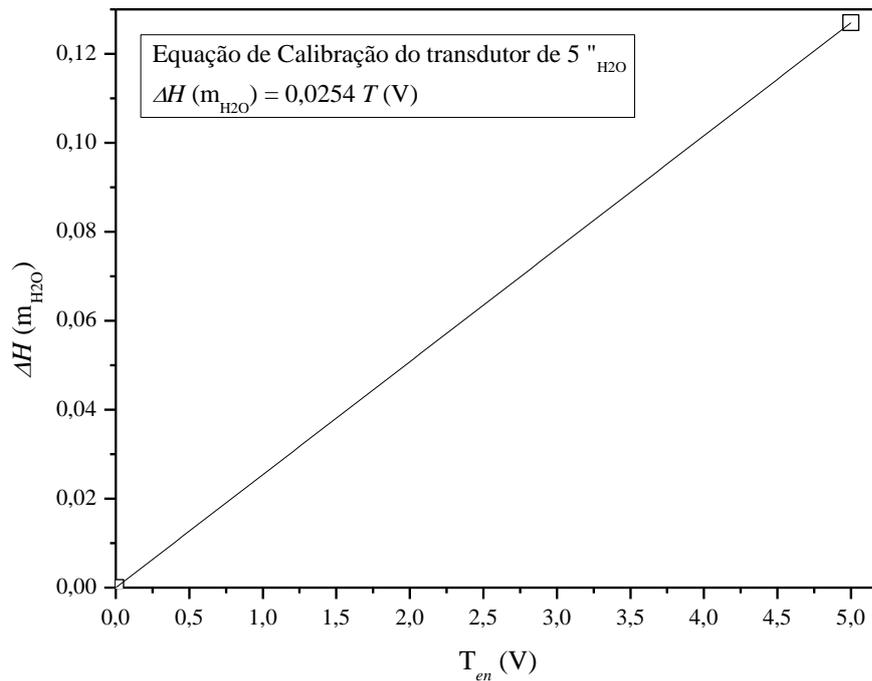
Fonte: Autor, 2016.

Para realização dos ensaios de secagem, fez-se uso dos componentes periféricos da unidade experimental ilustrada na Figura 3.9, apresentados em detalhes nos itens que se seguem.

Fornecimento de ar - o ar de secagem foi fornecido por um soprador radial da marca VOGES de 7,5 cV.

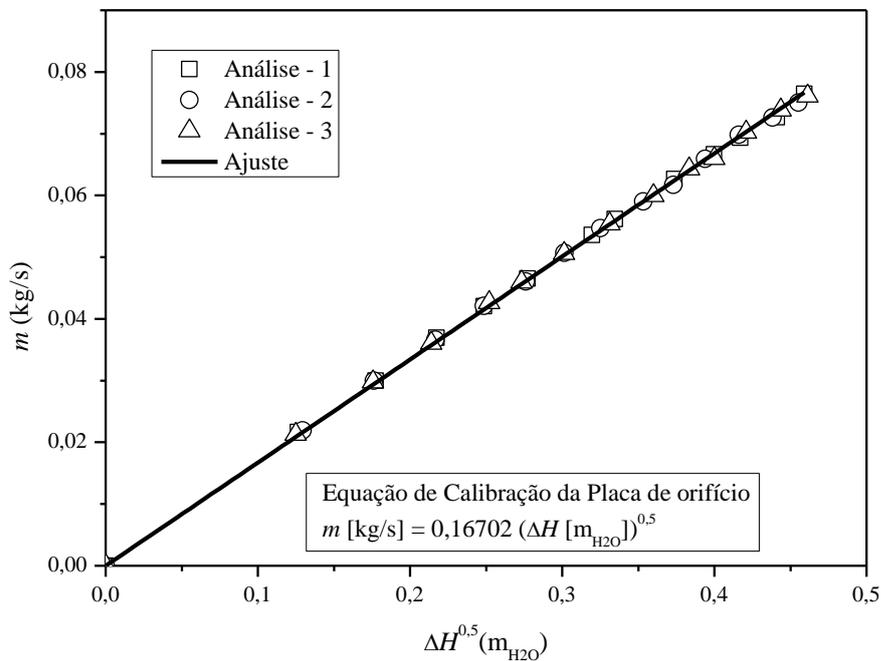
Ajuste da vazão do ar - o ajuste da vazão do ar de secagem foi realizado por um inversor de frequência acoplado ao soprador. Para medida da vazão do ar no túnel de secagem, foi utilizada uma placa de orifício de 40 mm de abertura apresentada na Figura 3.9 (10). Para a determinação da pressão causada na placa de orifício, fez-se uso de um transdutor de pressão apresentado na Figura 3.9 (3), associado a um indicador universal da Marca NOVUS referencia N480i. A placa de orifício foi calibrada por meio de um tubo de Pitot padrão. Nas Figuras 3.10 e 3.11 são apresentadas as curvas de calibração e equações para o transdutor de pressão e placa de orifício.

Figura 3.10 – Curva de calibração do transdutor de pressão 5 " H₂O.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 3.11 – Curva de calibração da placa de orifício de 40 mm.



Fonte: Autor, 2016.

Coleta de material para ensaio de umidade - para verificar a variação de umidade durante a secagem, foram realizados ensaios de umidade com amostras de sementes coletadas de forma intermitente em intervalos de tempo previamente definidos de 2,5 min nas primeiras 5

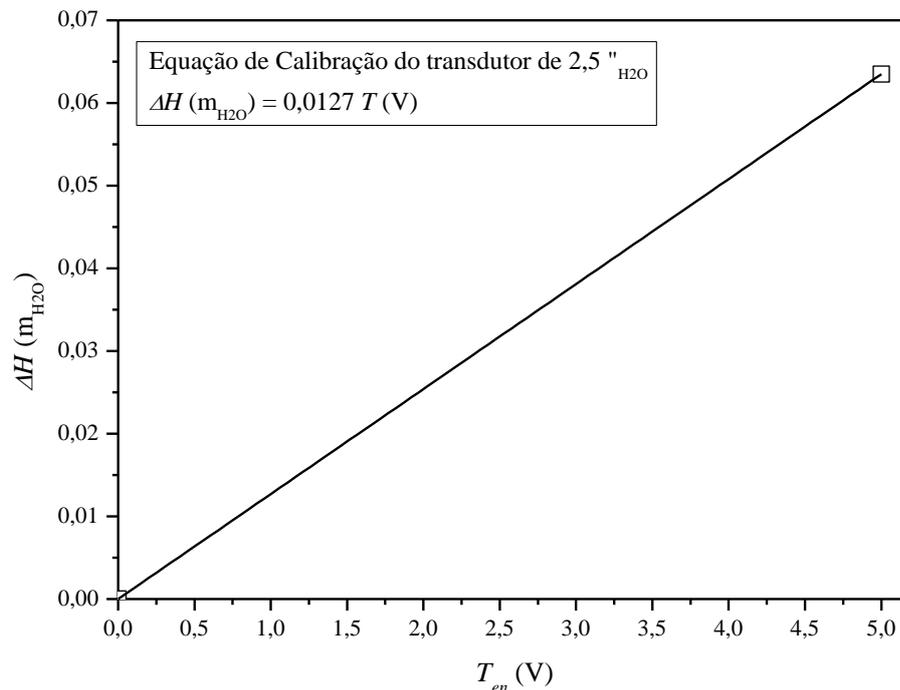
coletas, 5 min nas 3 coletas seguintes, e 10 min nas 3 coletas finais. O ensaio de umidade das amostras coletadas foi realizado seguindo o mesmo procedimento descrito na seção 3.1.

Medidas de temperatura - as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar na saída do leito e do ar ambiente foram obtidas pelo uso de termopares do tipo K, onde as leituras foram realizadas diretamente nos termômetros digitais mostrado na Figura 3.9 (7) e (8).

Aquecimento do ar - após passar pelo medidor de vazão o ar de secagem foi aquecido por um trocador de calor apresentado na Ilustração da Figura 3.9 (2), onde este é composto por duas resistências elétricas de louça de 600 W cada.

Câmara de secagem - a câmara de secagem consistiu em um leito fluidizado de base retangular, como visto na ilustração da Figura 3.8. Para medir a queda de pressão ocasionada no leito apresentado na Figura 3.9 (4), fez-se uso de um transdutor de pressão associado a um indicador universal da Marca NOVUS referencia N480. Na Figura 3.12 é apresentada a curva de calibração e equação para o transdutor de pressão do leito fluidizado.

Figura 3.12 – Curva de calibração do transdutor de Pressão 2,5 " H₂O, utilizado para medir a queda de pressão no leito.



Fonte: Autor, 2016.

3.4 Caracterização da unidade experimental

A caracterização da unidade experimental consistiu na obtenção de curvas fluidodinâmicas do leito fluidizado para as faixas de temperatura que foram empregadas no experimento de secagem. Estas curvas foram obtidas de acordo com a metodologia proposta por Kunii e Levenspiel (1991).

Foi utilizado 1500 g de sementes para realizar o estudo de fluidodinâmica, o que ocupou 0,1 m de coluna no leito. Para o estudo de fluidodinâmica do leito, o sistema foi ajustado para operar em regime de fluidização particulada ou bolha até a temperatura atingir o valor desejado em regime permanente. A partir deste instante, a vazão de ar foi interrompida rapidamente e na sequência aumentada gradativamente. Nesse período foram coletados os dados da vazão de ar e da queda de pressão no leito. Quando o regime de fluidização particulada ou bolha foi novamente estabelecido, realizou-se o processo inverso, ou seja, a vazão do ar no leito foi diminuída até ser zerada.

Também foram obtidas nesta etapa as velocidades de mínima fluidização e a queda de pressão máxima no leito para as faixas de temperatura empregadas nos experimentos de secagem. Estes dados foram determinados em triplicata.

3.5 Procedimento experimental de secagem

Com o leito fluidizado caracterizado em relação a sua fluidodinâmica, foi iniciado então os experimentos de secagem das sementes de cornichão. Para os ensaios de secagem, foi colocada na unidade experimental uma massa de sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) no valor de 1500g, previamente reumidificada, que correspondeu a uma altura de leito de 0,1 m no leito.

Esses experimentos foram realizados com o sistema operando sob condições de velocidade do ar de entrada, correspondentes a 10, 20 e 30 % acima da velocidade de mínima fluidização, e em três faixas de temperatura, 40, 50 e 60 °C, obtendo as resposta de Germinação (G) e umidade em base úmida (U_{BU}) a partir da influencia da variação dos níveis estabelecidos. Esses foram definidos com base em um planejamento experimental fatorial 2^2 com tréplica no ponto central, conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Matriz do planejamento fatorial 2² com tréplica no ponto central.

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)
1	40	1,10 U_{mf}
2	40	1,30 U_{mf}
3	60	1,10 U_{mf}
4	60	1,30 U_{mf}
5	50	1,20 U_{mf}
6	50	1,20 U_{mf}
7	50	1,20 U_{mf}

Fonte: Autor, 2016.

Para cada condição experimental mostrada na Tabela 3.1, além das coletas de material para ensaio de umidade já descrito nos itens anteriores, também foram medidas durante os experimentos a temperatura de bulbo seco (T_{BS}) e temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) do ar ambiente no início do processo e a temperatura do ar de secagem (T) e a temperatura de bulbo seco (T_{BS}) e temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) do ar de saída do leito a cada dois minutos de secagem. Com os valores das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente, foi possível encontrar a umidade absoluta do ar. De posse desse valor e da temperatura de secagem, foi encontrado o valor da umidade relativa da secagem e o valor da atividade de água do sistema para alimentar a equação da isoterma. A determinação das propriedades psicrométricas foi realizada através dos Aplicativos Android livres *Psychrometric* e *Air Calc*.

Além da análise das respostas advindas do planejamento experimental fatorial 2² com tréplica no ponto central, foi estudada também as curvas do adimensional de umidade livre ($(X_t - X_e)/(X_{t0} - X_e)$) em função do tempo (t). A partir dos dados do adimensional de umidade livre em função do tempo foram determinadas as difusividades efetiva de cada processo de secagem pelo ajuste dos dados aos modelos da Lei de Fick, Page, Henderson e, Midilli, modelos esses também usados por Kanaan (2014).

Todos os dados experimentais obtidos foram utilizados para ajuste e comparação do modelo desenvolvido, objetivando a estimação do coeficiente global de transferência de massa para cada condição de secagem estudada.

3.6 Modelo de Secagem para Sementes de Cornichão (*Lotus Corniculatus L.*)

Conforme exposto no item 2.8, existem na literatura diversos modelos que visam a modelagem e simulação do processo de secagem de sementes e/ou sólidos particulados em leito fluidizado. Após a análise desses modelos, optou-se por utilizar neste trabalho o modelo matemático simplificado proposto por Massarani e Silva Telles (1992) devido ao fato de este modelo apresentar resultados satisfatórios em estudos descritos na literatura e também por

permitir estimar o coeficiente global de transferência de massa através da analogia a Lei de Newton do resfriamento.

O modelo simplificado proposto por Massarani e Silva Telles (1992) analisa o processo de secagem considerando o sistema a duas fases e em regime não permanente. Para tal, apresenta como hipóteses simplificadoras as seguintes características:

1. as partículas são esféricas;
2. a vazão mássica de ar é constante;
3. o escoamento é unidimensional;
4. o diâmetro médio de partícula é constante;
5. as áreas de transferência de calor e de massa gás-partícula são idênticas, e
6. a fase sólida é uma mistura perfeita sem considerar a fase bolha.

Com base nessas hipóteses, as variações nas umidades das fases sólida e gás foram calculadas através dos balanços globais de conservação da massa, conforme Equações 3.12 e 3.13:

$$\frac{dY_s}{dt} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon)\rho_s} \quad (3.12)$$

$$\frac{dY_g}{dt} = \frac{f}{\varepsilon\rho_g} - \frac{G_g}{L_h\varepsilon\rho_g} (Y_g - Y_{g,L=0}) \quad (3.13)$$

onde Y_s é a fração mássica de água nos sólidos, Y_g é a fração mássica de vapor d'água na saída do leito fluidizado, $Y_{g,L=0}$ é a fração mássica de vapor d'água na entrada do leito fluidizado, t é o tempo, ε é a porosidade do leito de sólidos, L_h é a altura do leito de sólidos, G_g é fluxo mássico do gás, ρ_s é a massa específica dos sólidos e ρ_g é a massa específica do gás. Nas equações 3.12 e 3.23, f , que é o termo de ligação, descreve a taxa de transferência de massa do sistema através da analogia a Lei de Newton do resfriamento, conforme Equação 3.14.

$$f = K_p a_r (Y_s - Y_{eq}) \quad (3.14)$$

Na Equação 3.14, K_p é o coeficiente global de transferência de massa, Y_{eq} é a fração mássica de água no equilíbrio e a_r é a área específica dos sólidos, que é obtida pela relação da Equação 3.15:

$$a_r = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\phi d_m} \quad (3.15)$$

onde ϕ é a esfericidade dos sólidos e d_m é o diâmetro médio de partícula. Ainda na Equação 3.14, o coeficiente global de transferência de massa, K_p , foi a variável a ser investigada no

modelo, onde a mesma foi alterada até que os dados simulados se ajustem aos dados experimentais obtidos.

Já a variação nas temperaturas das fases sólida e gás foram calculadas através dos balanços globais de conservação da energia, conforme Equações 3.16 e 3.17:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q - \lambda f}{(1 - \varepsilon)\rho_s c_{ps}} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{Q}{\varepsilon c_{pg}\rho_g} - \frac{c_{pv}(T_g - T_s)f}{\varepsilon c_{pg}\rho_g} - \frac{c_{pv}G_g(T_g - T_{g,L=0})}{L\varepsilon c_{pg}\rho_g} \quad (3.17)$$

onde T_s é a temperatura do sólido, T_g é a temperatura do gás de secagem, $T_{g,L=0}$ é a temperatura do gás de secagem na entrada do leito fluidizado, λ é o calor latente de vaporização, c_{ps} é o calor específico do sólido, c_{pv} é o calor específico do vapor d'água e c_{pg} é o calor específico do gás. Nas equações 3.16 e 3.17, Q , descreve a taxa de transferência de calor do sistema através da Lei de Newton do resfriamento, conforme Equação 3.18.

$$Q = ha(T_g - T_s) \quad (3.18)$$

Na Equação 3.17, h é o coeficiente global de transferência de calor. Esta variável foi estimada através de equações empíricas propostas na referência Kunii e Levenspiel (1991) e Kettonring, Macerfield e Smith (1990), conforme apresentado na Equação 3.19.

$$h = \frac{K_g}{d_p} (0,0135(Re)^{1,3}) \quad (3.19)$$

A solução do modelo foi obtida através da integração numérica das Equações 3.11, 3.12, 3.17 e 3.18 pelo método de Runge-Kutta em uma rotina que será construída em modo MATLAB. As condições iniciais aplicadas em $t = 0$ foram $Y_s = Y_{s,t=0}$, $Y_g = Y_{g,t=0}$, $T_s = T_{s,t=0}$ e $T_g = T_{g,t=0}$, sendo $Y_{s,t=0}$ a fração mássica de água nos sólidos no tempo zero, $Y_{g,t=0}$ a fração mássica de vapor d'água na saída do leito fluidizado no tempo zero, $T_{s,t=0}$ temperatura do sólido no tempo zero e $T_{g,t=0}$ a temperatura do gás de secagem no tempo zero. O modelo proposto pode ser visto para condição de 40°C de temperatura de secagem no Apêndice A. Também fizeram parte deste modelo várias equações auxiliares, as quais algumas que não são apresentadas durante as seções deste trabalho podem ser vistas no Apêndice B.

Os ensaios experimentais permitiram a obtenção de variáveis importantes no processo de secagem, o qual estabeleceram as condições iniciais para o modelo simulado, tais como, temperatura ambiente, temperatura da parede externa do secador, umidade em base úmida inicial dos sólidos, umidade relativa do ar de secagem e temperatura de secagem. Porém, algumas variáveis necessárias para o modelo proposto, necessitaram de uma aproximação e

ajustes para com os dados experimentais, tendo por consequência a necessidade de análise de influencia no modelo de secagem. A análise utilizada para testar o modelo proposto e a influencia da variação destes parâmetros no processo de secagem foi uma análise de sensibilidade paramétrica.

Esta análise foi realizada para o coeficiente global de transferência de massa, devido ao fato de que o valor de K_p utilizado foi o valor atribuído no modelo que apresentou o melhor ajuste dos dados experimentais. Para o coeficiente global que se encontra na ordem de 10^{-5} , foram adicionados 5 valores que foram desde 1×10^{-5} a 9×10^{-5} .

Também foi realizada a análise de sensibilidade paramétrica sobre o valor do calor específico de sólido seco (C_{pss}) das sementes de cornichão. Este se deu, pelo fato do parâmetro inexistir na literatura, havendo a necessidade da aproximação de seu valor utilizando outra semente forrageira, a *Brachiaria brizantha* (Fumagalli et. al, 2007), com um valor de 428 J/kg.K. Para o calor específico do sólido seco foram adicionados 5 variações diferentes para este fator, os quais corresponderam desde 107 J/Kg.K a 856 J/kg.K.

Cabe destacar que tanto o valor do coeficiente global de transferência de massa, quanto o valor do calor específico de sólido seco, foram avaliados individualmente, ou seja, cada parâmetro se manteve constante conforme a variação do outro. As análises de sensibilidade paramétrica foram realizadas para a condição de 40°C e $1,3 U_{mf}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos e as respectivas discussões. Primeiramente são apresentados os dados da caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão. Após, apresentam-se os resultados da caracterização fluidodinâmica do leito fluidizado, bem como os resultados obtidos dos ensaios de secagem, como a cinética de secagem e os parâmetros obtidos através dos ajustes dos modelos cinéticos avaliados. Por fim é apresentado os resultados obtidos através do modelo proposto, bem como os resultados das análises de sensibilidade paramétrica do modelo para o coeficiente global de transferência de massa e calor específico de sólido seco.

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

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos no processo de caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão fornecidas pela Embrapa - Pecuária Sul. A Tabela 4.1 contém os resultados referentes à 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. Os resultados fornecidos pelo equipamento *Quantachrome Instruments*, ultrafoam1000e, modelo UPY-30F na análise da picnometria gasosa, encontram-se no Apêndice C.

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

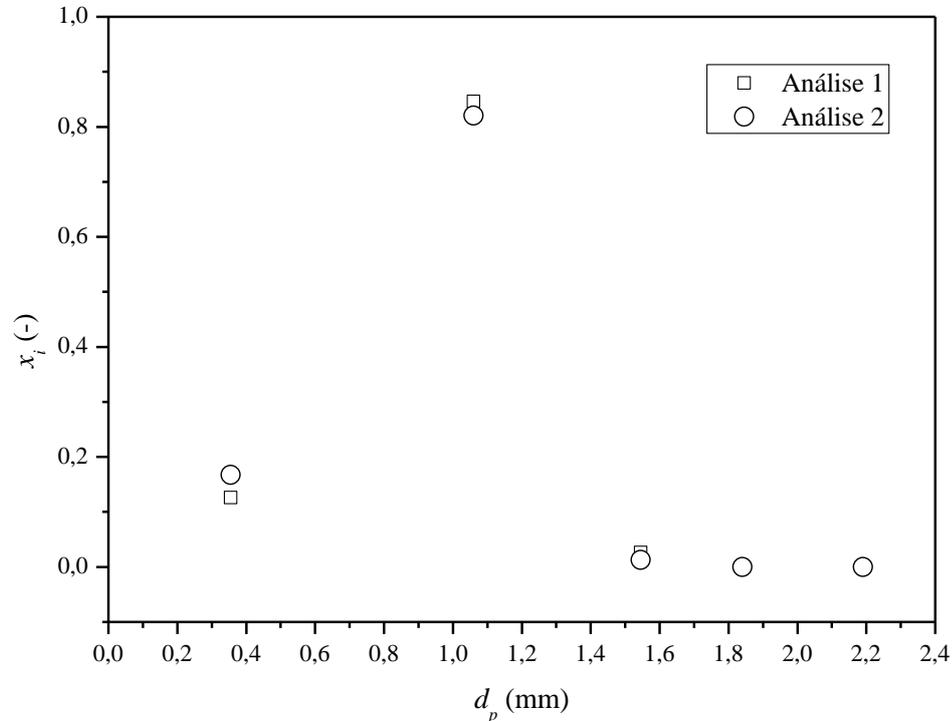
Propriedade	Valor
U_{BU} (%)	$10,00 \pm 0,07$
Φ	$0,99 \pm 0,01$
θ (°)	$27,21 \pm 1,54$
d_s (mm)	$1,27 \pm 0,03$
ρ_{bulk} (kg/m ³)	$846,1 \pm 0,01$
ρ_{real} (kg/m ³)	$1310,5 \pm 0,01$
ε	$0,35 \pm 0,01$
G_{total} (%)	$57,33 \pm 3,51$

Fonte: Autor, 2016.

Ao analisar a Tabela 4.1 verifica-se que o valor de U_{BU} obtido encontra-se em um valor muito próximo ao obtido por Kanaan (2014) e também na faixa indicada (10 a 12 %) para a comercialização de sementes (MACEDO et al., 1987). Ao comparar o resultado do diâmetro de *Sauter* com o obtido por Kanaan (2014) no estudo das sementes de cornichão é verificado valores também semelhantes, onde o autor encontrou um valor de d_s de 1,37 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, 2016.

Observa-se na Figura 4.1 que as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) apresentaram um comportamento típico de distribuição granulométrica diferencial, com formato de curva de distribuição normal (FOUST et al., 2008). Também nessa figura, é verificado que aproximadamente 85 % das sementes apresentaram um diâmetro de partícula de 1,10 mm. Novamente, o resultado obtido aqui possui valores e comportamento de curva muito semelhante ao encontrado por Kanaan (2014).

Os valores encontrados para ρ_{real} , ρ_{bulk} , ε , ϕ , e θ foram comparados com os obtidos por Kanaan (2014), onde o autor encontrou os valores de $1363,66 \text{ kg/m}^3 \pm 0,67$ para ρ_{real} , $858,28 \text{ kg/m}^3 \pm 5,30$ para ρ_{bulk} , $0,37 \pm 0,01$ para porosidade, $25,34 \pm 0,01^\circ$ para o ângulo de repouso e $0,98 \pm 0,01$ para esfericidade. Ao comparar esses valores com os obtidos no presente trabalho, é verificado que os mesmos estão muito próximos. Isto é justificado devido ao fato de se tratar da mesma semente e também de um mesmo lote. Outro aspecto importante desses resultados se refere à esfericidade, que define o quanto esférica é a partícula, sendo que para uma esfera perfeita a esfericidade assume o valor unitário. O valor de esfericidade apresentado na Tabela 4.1 para sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) permite

idealizar as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) como uma partícula esférica. Este fato é de suma importância, visto que isso facilita a fluidização das mesmas e também permite a utilização da simulação da sua secagem com o uso do modelo a duas fases de Massarani e Silva Telles (1992).

Ainda na Tabela 4.1, é possível verificar com o uso dos dados do ρ_{real} , ρ_g e d_s que as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) estão localizadas na interface dos grupos B e D, segundo Diagrama de Geldart (1973). O grupo B é característico de leitos borbulhantes e o grupo D é característico de leitos jorráveis. Este resultado mostra que as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) podem ser processadas tanto em leitos fluidizados como em leitos de jorro.

Para o ensaio de germinação das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) *in natura*, foi verificado um valor médio de $57,33 \pm 3,51$, o qual está próximo dos padrões exigidos comercialmente (SEAPA – Secretaria da Agricultura do Estado). Este resultado é, aproximadamente, 9 % inferior ao encontrado por Kanaan (2014). Este valor inferior que foi encontrado para o mesmo lote de sementes é justificado pelo tempo de armazenamento, onde as sementes possivelmente de deterioraram fisiologicamente com o tempo e com as condições de estocagem.

4.2 Processo de Reumidificação das Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

Para o processo de reumidificação das sementes de cornichão (*Lotus coniculatus* L.), a umidade inicial (U_{BUi}) e final (U_{BUf}) em base úmida, vigor (V), germinação (G) e a germinação total (G_{total}) referente às contagens do 4º dia (vigor) e 12º dia (germinação) das sementes de cornichão são apresentadas na Tabela 4.2. Nessa tabela os ensaios de 1 a 7 correspondem à preparação das sementes para os experimentos de secagem propostos na Tabela 3.1.

Tabela 4.2 – Umidade em base úmida das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) antes e após reumidificação.

Ensaio	U_{BUi} (%)	U_{BUf} (%)	V (%)	G (%)	G_{Total} (%)	Média
1	9,00	12,12	38	26	64	$65,33 \pm 5,13$ %
			34	27	61	
			45	26	71	
2	9,00	13,75	45	18	63	$64 \pm 1,00$ %
			43	21	64	
			43	22	65	

Continuação da Tabela 4.2

			33	21	54	
3	9,00	13,18	42	31	73	60,33 ± 10,97 %
			29	25	54	
4	9,00	13,29	31	14	45	43,66 ± 5,13 %
			34	14	48	
			27	11	38	
5	9,00	14,36	46	11	57	58,66 ± 1,53 %
			48	12	60	
			41	18	59	
6	9,00	14,10	28	18	46	48,34 ± 6,81 %
			39	17	56	
			30	13	43	
7	9,00	12,59	28	17	45	46,33 ± 3,12 %
			24	26	50	
			23	21	44	

Fonte: Autor, 2016.

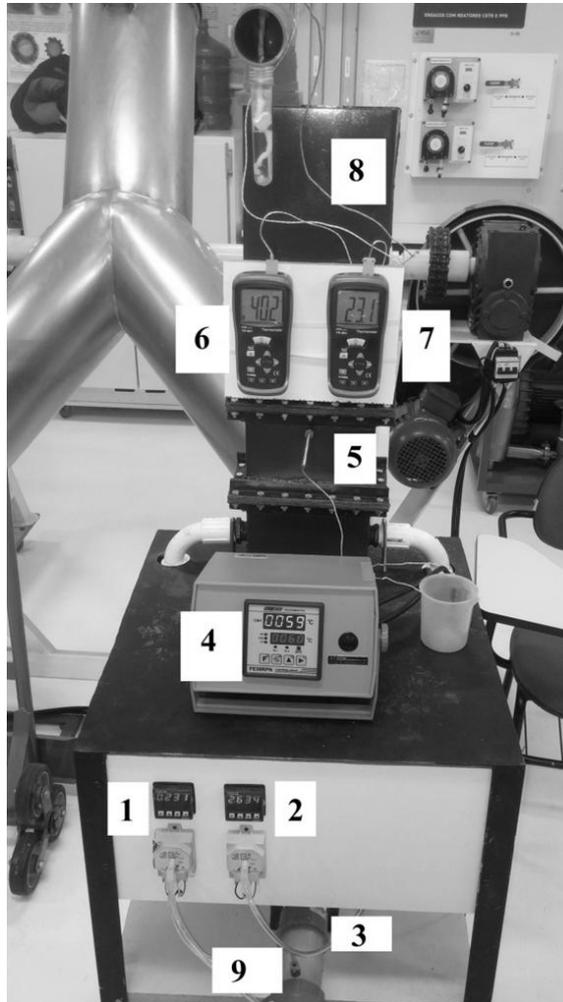
Através da Tabela 4.2 é possível verificar que o processo de reumidificação realizado na temperatura de 40 °C e no tempo de 24 h em ambiente saturado possibilitou elevar os teores de umidade das sementes de 9,00 % até valores compreendidos entre 12,12 a 14,36 % de umidade em base úmida. Nos estudos realizados por Kanaan (2014) o autor obteve como resultado uma elevação de valores de 10,00 % de umidade em base úmida para valores compreendidos entre 20,00 a 24,00 % de umidade em base úmida. Ao analisar os resultados obtidos neste estudo em comparação aos valores do autor, é verificado que os mesmos encontram-se inferiores aos obtidos pelo autor, porém, os resultados de reumidificação obtidos neste trabalho foram suficientes para o estudo de secagem das sementes de cornichão em leito fluidizado.

Ainda na Tabela 4.2 é verificado que os dados da germinação variaram de valores que foram desde 43,66 a 65,30 %, porém as condições de reumidificação foram as mesmas para todos os ensaios. Isto se justifica pelo fato de que o lote encontrava-se no final, contendo algumas impurezas e com maior contato com a parede do armazenamento, o que pode ter ocasionado algumas variações na qualidade da matéria prima.

4.3 Unidade experimental e caracterização fluidodinâmica

Fotografias ilustrativas do secador de leito fluidizado manufaturado e seus componentes periféricos são apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Secador de leito fluidizado manufacturado, utilizado nos ensaios de secagem. (1) e (2) Transdutores de pressão, (3) Fonte de Aquecimento, (4) Controlador de temperatura (5) Distribuição de ar do leito fluidizado, (6) Termopar para temperatura de bulbo seco, (7) Termopar para temperatura de bulbo úmido, (8) Leito de partículas, (9) Placa de orifício.

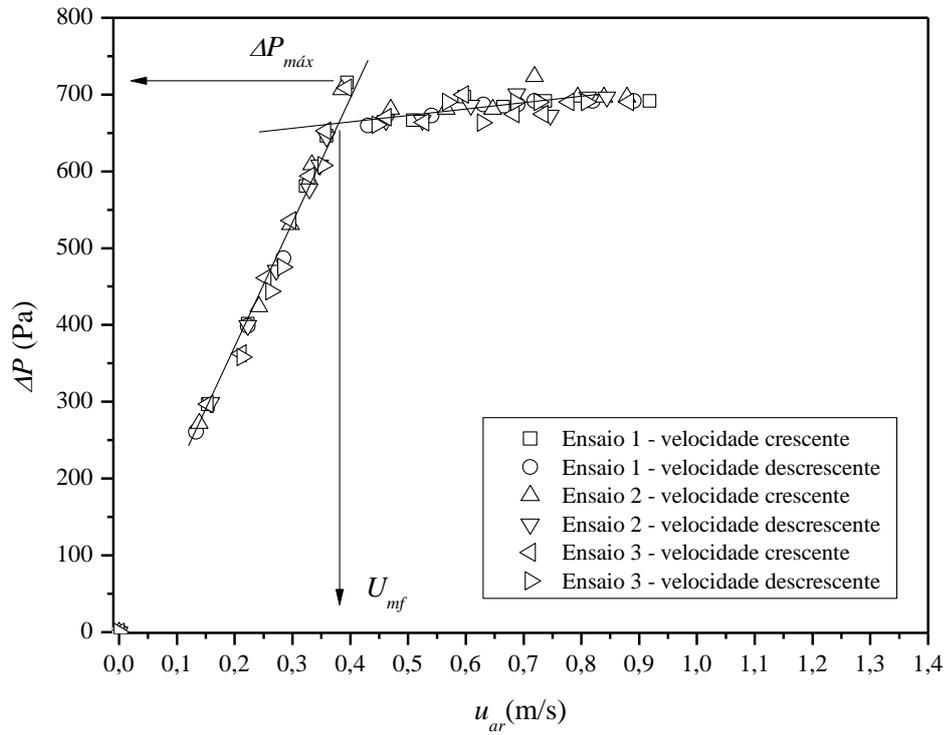


Fonte: Autor, 2016.

Como apresentado na seção de materiais e métodos e na Figura 4.2, a unidade experimental é composta por componentes periféricos de fornecimento de ar, ajuste da vazão de ar, medidas de temperatura, aquecimento do ar e controle da temperatura.

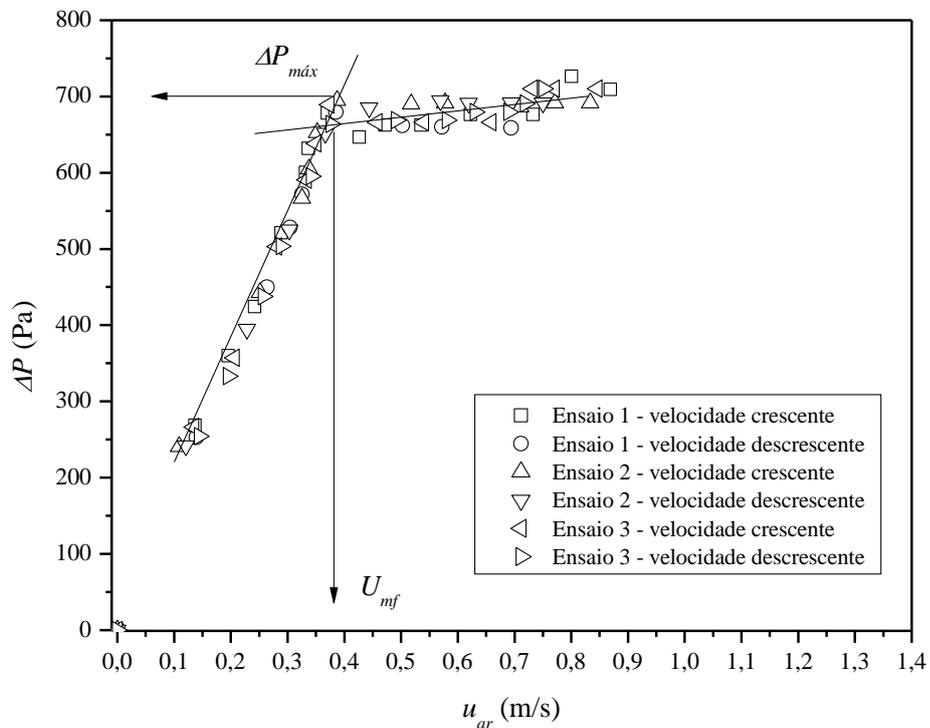
Na Figura 4.3 a 4.5 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar nas três temperaturas que foram usadas nos subsequentes experimentos de secagem.

Figura 4.3 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 40°C.



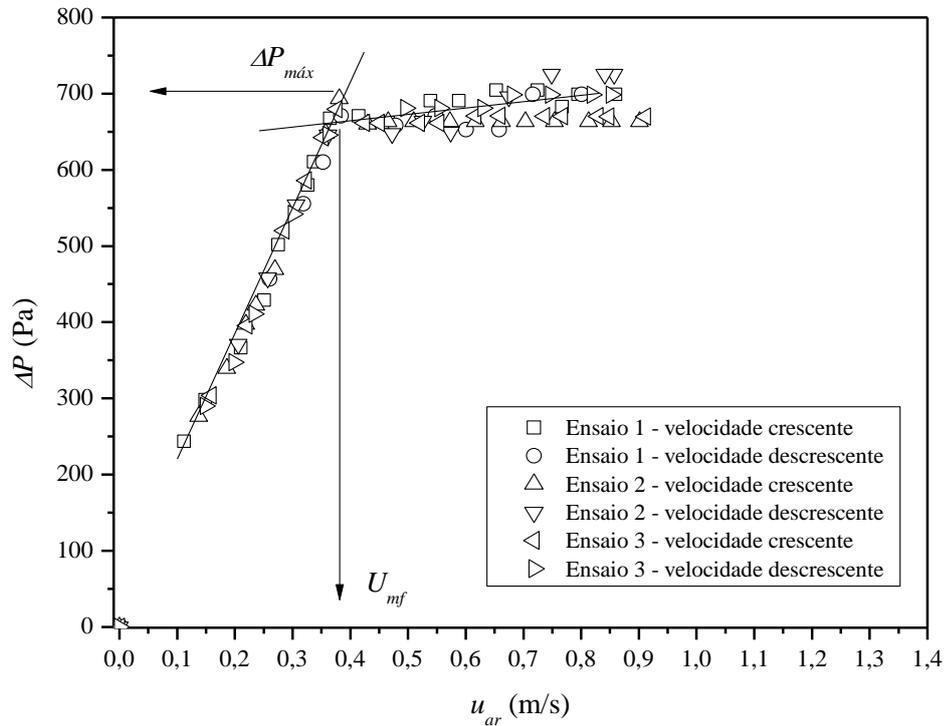
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.4 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 50°C.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.5 – Curva Fluidodinâmica da Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 60°C.



Fonte: Autor, 2016.

Pode-se observar pelas Figuras 4.3 a 4.5 que o aumento da velocidade do ar promove um aumento da queda de pressão do leito. Este fato ocorre até uma velocidade do ar de aproximadamente 0,37 a 0,38 m/s e corresponde a região do leito fixo. Para valores de velocidade do ar superiores a 0,37 a 0,38 m/s o leito de sólidos atinge a condição de fluidização, e a partir desta condição, a queda de pressão matem-se constante com um valor de aproximadamente 650 a 700 Pa. O Comportamento das curvas fluidodinâmicas experimentais obtidas neste trabalho é o característico de leitos fluidizados e está de acordo com o que é descrito por Kunii e Levenspiel (1991).

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores da queda de pressão máxima e da velocidade de mínima fluidização para as condições fluidodinâmicas estudadas neste trabalho.

Tabela 4.3 – Queda de pressão e velocidades de mínima fluidização para as temperaturas de secagem.

T (°C)	ΔP_{max} (Pa)	U_{mf} (m/s)
40	700,0	0,380
50	700,6	0,372
60	703,1	0,371

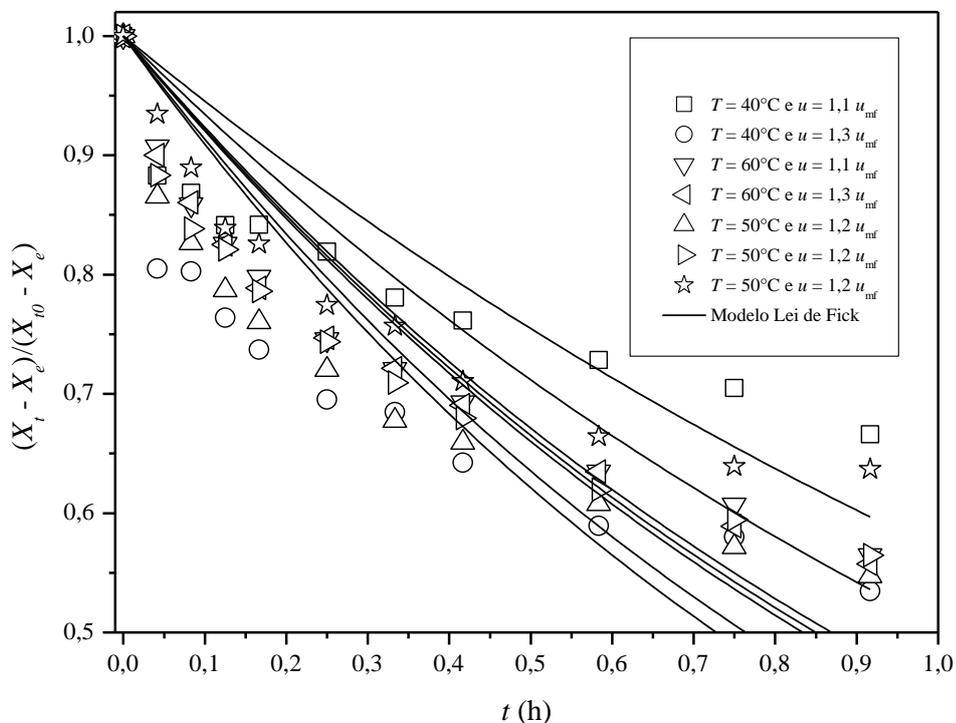
Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 4.3, observa-se que a queda de pressão máxima apresenta um valor de aproximadamente 700,0 Pa para as três temperaturas estudadas. Isto é justificado pelo fato da carga de sementes no leito serem sempre a mesma. Em relação à velocidade de mínima fluidização é possível observar uma diminuição no seu valor com o aumento da temperatura. Isto se dá, devido ao ar de secagem se tornar menos denso, reduzindo a força peso exercida pelas sementes, favorecendo a diminuição da velocidade de mínima fluidização. Este comportamento é o mesmo encontrado por outros autores, como é o caso de Nascimento (2001), onde o autor apresenta um estudo fluidodinâmico de misturas de diferentes sólidos em leito fluidizado.

4.4 Secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.)

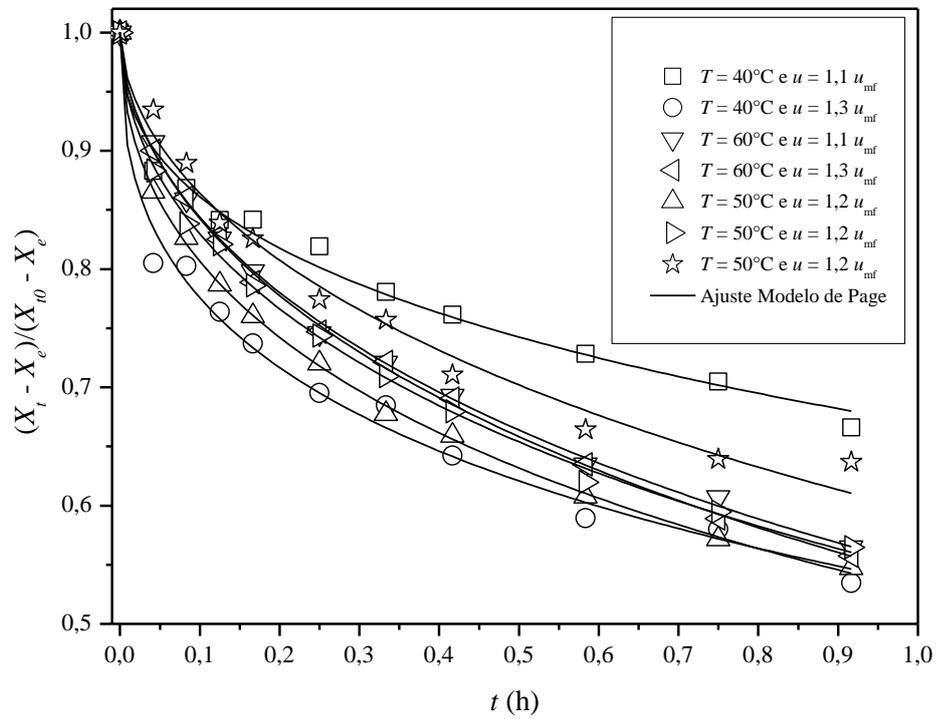
Nas Figuras 4.6 a 4.9 são apresentadas as curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo de secagem juntamente com os ajustes dos modelos cinéticos da Lei de Fick, de Page, Midilli e Henderson para as sementes de cornichão secas nas condições apresentadas na Tabela 3.1.

Figura 4.6 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo da lei de Fick.



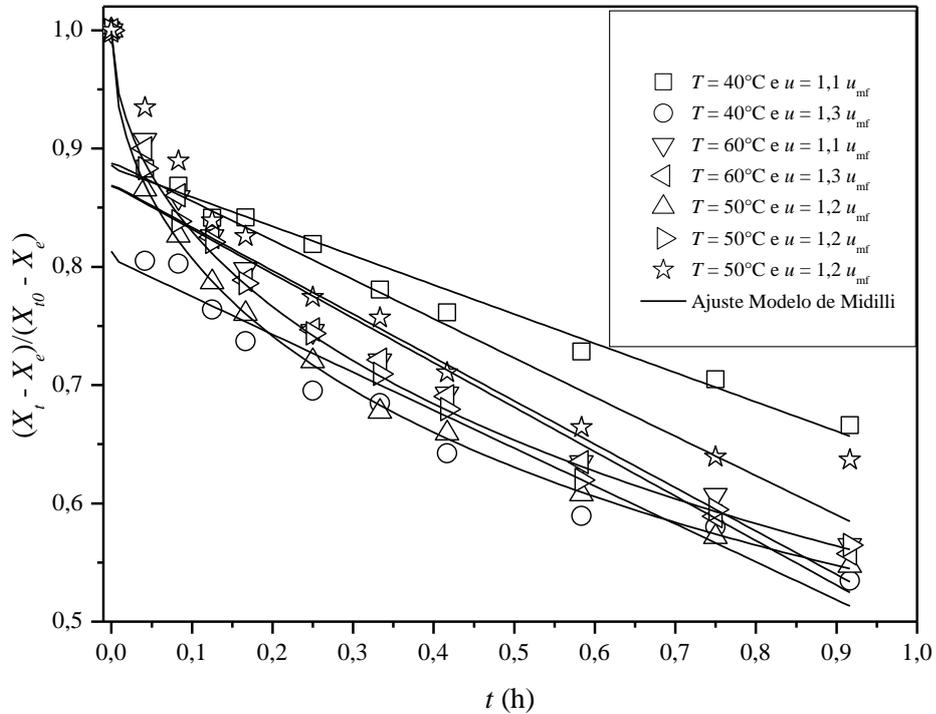
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.7 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Page



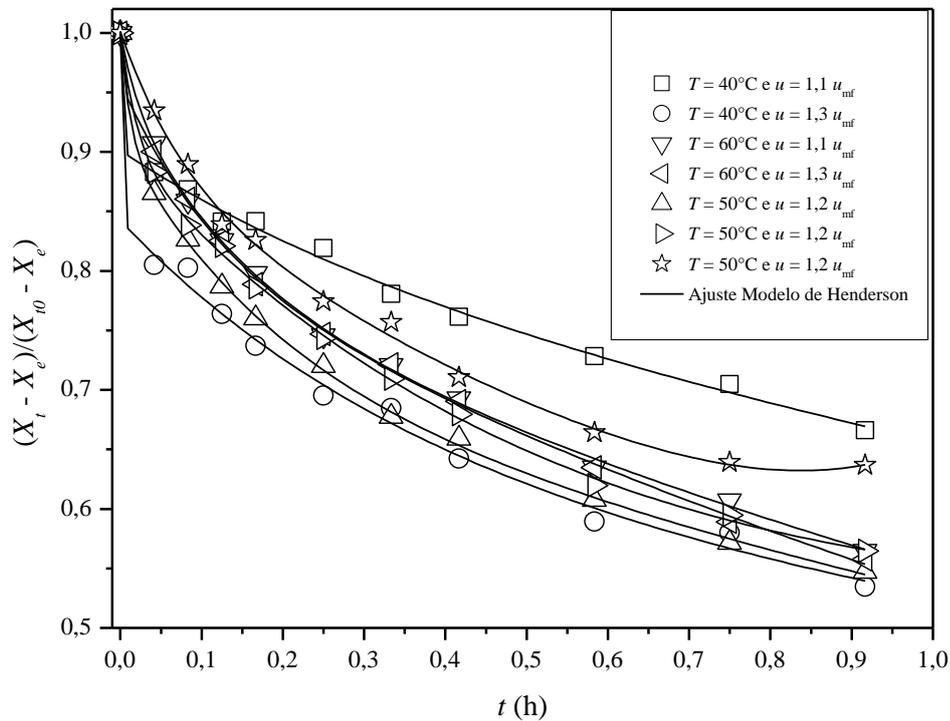
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.8 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Midilli.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.9 – Adimensional de umidade livre em função do tempo ajustadas ao modelo de Henderson.



Fonte: Autor, 2016.

Observa-se nas Figuras 4.6 a 4.9 que todas as curvas apresentaram um comportamento característico de secagem, com uma maior redução do teor de água livre em função do tempo com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem, exceção para a condição de 40°C e 1,3 U_{mf} . A explicação para essa exceção pode estar relacionada com as condições ambientes do dia de realização da secagem, que apresentou valor de umidade absoluta do ar ambiente inferior aos apresentados nas outras secagens. Para os demais experimentos, o comportamento de redução do teor de água livre em função do tempo com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem é justificado pela análise física do processo. Como a secagem é definida como uma operação que envolve a transferência simultânea de calor e de massa, é esperado que modificações nessas variáveis ocasionem mudanças nos valores das parcelas condutiva e convectiva dos balanços dos fenômenos de transferência para o regime não permanente do processo. 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 valor da umidade final. 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. 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. Já o aumento na velocidade do ar promove uma elevação no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), ocasionando um aumento na transferência de calor por convecção. Esse aumento na taxa de transferência de calor por convecção promove um aumento na força motriz do processo e conseqüentemente uma diminuição no valor da umidade final.

Os parâmetros dos ajustes cinéticos das curvas das Figuras 4.6 a 4.9 e os valores de difusividade efetiva, coeficiente de determinação 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 (%)	D_{ef} (m^2/h)					
1	0,56303	0,52488	7,41	$3,21 \times 10^{-6}$					
2	0,95221	0,41405	13,09	$5,43 \times 10^{-6}$					
3	0,79751	0,77398	8,00	$4,55 \times 10^{-6}$					
4	0,81548	0,78713	7,91	$4,65 \times 10^{-6}$					
5	0,90727	0,63301	10,87	$5,17 \times 10^{-6}$					
6	0,83070	0,71474	8,92	$4,73 \times 10^{-6}$					
7	0,68024	0,76191	7,13	$3,88 \times 10^{-6}$					
Ajuste do Modelo de Page									
Ensaio	k (h^{-1})	n	R^2	P (%)	D_{ef} (m^2/h)				
1	0,40038	0,42734	0,98638	1,00	$2,282 \times 10^{-6}$				
2	0,62521	0,39119	0,98807	1,54	$3,563 \times 10^{-6}$				
3	0,59846	0,54677	0,99848	0,50	$3,411 \times 10^{-6}$				
4	0,61389	0,55415	0,99893	0,46	$3,499 \times 10^{-6}$				
5	0,6367	0,47135	0,99926	0,43	$3,629 \times 10^{-6}$				
6	0,60536	0,5107	0,99807	0,59	$3,450 \times 10^{-6}$				
7	0,5178	0,54959	0,98467	1,62	$2,951 \times 10^{-6}$				
Ajuste do Modelo de Henderson									
Ensaio	a	b	c	k (h^{-1})	k_o (h^{-1})	k_I (h^{-1})	R^2	P (%)	D_{ef} (m^2/h)
1	0,086	0,099	0,815	3,167	3127,6	0,2220	0,993	0,62	$1,81 \times 10^{-5}$
2	0,619	0,224	0,158	0,188	2,7003	6993,7	0,991	1,22	$1,07 \times 10^{-6}$
3	0,792	0,160	0,048	0,367	6,8039	47,286	0,998	0,45	$2,09 \times 10^{-6}$

Continuação da Tabela 4.4

4	0,814	0,145	0,042	0,421	8,4377	$1,0 \times 10^5$	0,998	0,52	$2,40 \times 10^{-6}$
5	0,714	0,195	0,091	0,298	5,1536	81,772	0,999	0,43	$1,70 \times 10^{-6}$
6	0,491	0,409	0,100	1,667	-0,1276	48,124	0,998	0,48	$1,27 \times 10^{-5}$
7	0,877	0,122	0,002	0,529	12,603	-4,317	0,995	0,64	$3,01 \times 10^{-6}$
Ajuste do Modelo de Midilli									
Ensaio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k</i> (h ⁻¹)	<i>n</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i> (%)	<i>D</i> _{ef} (m ² /h)		
1	0,886	-0,24745	0,00247	$1,47 \times 10^{-9}$	0,76889	2,39	$1,408 \times 10^{-6}$		
2	0,813	-0,32055	0,00749	$1,88 \times 10^{-9}$	0,67243	4,87	$4,269 \times 10^{-8}$		
3	0,869	-0,36689	0,00155	$1,46 \times 10^{-8}$	0,76889	4,52	$8,834 \times 10^{-9}$		
4	0,868	-0,37615	0,00155	$1,49 \times 10^{-8}$	0,81789	4,23	$8,834 \times 10^{-9}$		
5	0,999	0,02232	0,67329	$4,92 \times 10^{-1}$	0,99916	0,42	$3,837 \times 10^{-6}$		
6	0,999	0,00771	0,61695	$5,20 \times 10^{-1}$	0,99753	0,60	$3,516 \times 10^{-6}$		
7	0,887	-0,33148	0,00152	$1,38 \times 10^{-8}$	0,76914	4,83	$8,663 \times 10^{-6}$		

Fonte: Autor, 2016.

É observado pela Tabela 4.4 que o modelo cinético de Page foi o que apresentou os melhores ajustes, considerando que o mesmo apresenta apenas dois parâmetros para descrever os dados e que os valores obtidos para o R^2 foram todos acima de 0,985 e o P_p variando entre 0,43 e 1,62%. Segundo Madamba et al., (1996), uma boa representação do fenômeno em estudo deve apresentar um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,98 e erro médio relativo (P_p) abaixo de 10 %. Para Kanaan (2014), em seu estudo de secagem em leito fixo, o modelo de Midilli foi o que obteve o melhor ajuste dos dados experimentais da secagem de cornichão, onde o autor realizou seus estudos com base nos mesmos modelos semi empíricos e empíricos deste trabalho.

Ainda analisando a Tabela 4.4, é possível verificar que os ajustes dos modelos analisados e os valores encontrados para difusividade efetiva (D_{ef}) aumentaram proporcionalmente ao fornecimento mais elevado de energia (aumento da temperatura de secagem). Isto é justificado devido ao aumento de energia no sistema acarretar um aumento da evaporação da água e menor resistência interna de secagem, logo maior velocidade de migração da água do interior para a superfície da semente. Segundo Madamba (2003), os valores da difusividade efetiva para materiais orgânicos devem estar entre 10^{-5} a 10^{-7} m²/h. No presente trabalho, os valores de difusividade efetiva encontram-se na faixa apresentada pelo autor.

Em uma análise física da Tabela 4.4, para a difusividade efetiva, observa-se que a mudança de temperatura no valor de 40 °C para 60 °C provocou um aumento no D_{ef} do processo, quando analisado nas melhores condições de ajuste do modelo, que foi o modelo de Page. Isto pode ser explicado devido a elevação da temperatura causar um aumento na força

motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema. Ao analisar os valores das difusividades efetiva em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi visto que a modificação no valor de $1,1 U_{mf}$ para $1,3 U_{mf}$ também provocou um aumento no D_{ef} , mesmo que esse de menor intensidade. Isto ocorreu pelo fato que essa elevação na velocidade do ar aumenta também a força motriz de secagem.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores da umidade inicial e final em base úmida (U_{BU}), vigor (V) referente às contagens do 4º dia, germinação total (G_{total}) referente às contagens somadas até o 12º dia e a variação da germinação comparada com a germinação das sementes de cornichão que passaram pela reumidificação antes de cada operação de secagem realizada nas diferentes condições experimentais estabelecidas (V_{GU}).

Tabela 4.5 – Respostas dos ensaios de secagem para semente de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).

Ensaio	U_{BU} (%) inicial	U_{BU} (%) final	V (%)	G_{total} (%)	V_{GU} (%)
1	12,12	10,08	$47 \pm 8,32$	$78 \pm 6,93$	13
2	13,75	10,54	$50 \pm 4,58$	$72 \pm 4,93$	8
3	13,18	9,04	$36 \pm 4,58$	$43 \pm 8,54$	-17
4	13,29	9,06	$37 \pm 11,9$	$43 \pm 16,6$	0
5	14,36	10,24	$40 \pm 4,93$	$51 \pm 6,66$	7
6	14,10	10,07	$32 \pm 5,29$	$53 \pm 8,08$	-5
7	12,59	10,01	$37 \pm 5,29$	$48 \pm 8,66$	-2

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se na Tabela 4.5 que a passagem da temperatura de 40 °C (Ensaio 1 e 2) para 60 °C (Ensaio 3 e 4) causou uma diminuição no valor da umidade final em base úmida das sementes de cornichão, uma vez que a umidade inicial encontrava-se na faixa de 12,12 a 14,36 %, bem como reduziu a germinação total das sementes. Em relação a umidade final pós-secagem, obteve-se valores na faixa de 9,04 a 9,06 % para os ensaios com a temperatura de 60 °C. Durante a operação de secagem, a remoção de umidade ocorre por conta da busca pelo equilíbrio termodinâmico entre o ar circundante e o material sólido (FUMAGALLI, 2007), logo as modificações na temperatura do ar de secagem causaram mudanças na umidade relativa do sistema (atividade de água), logo é esperado que em temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água é menor, o valor da umidade final da semente seja inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas.

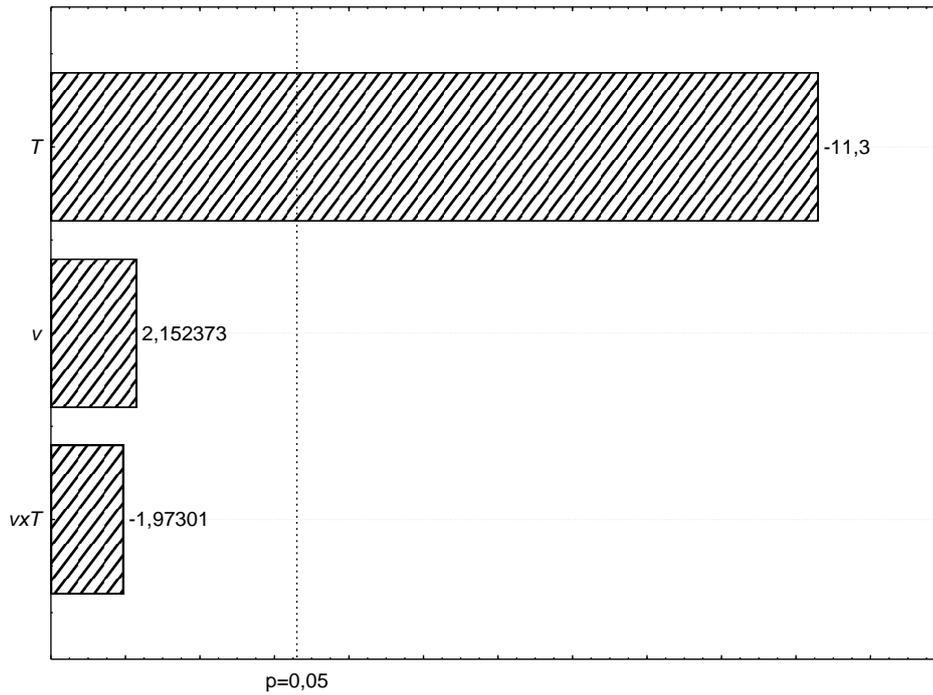
Ainda na Tabela 4.5 é possível observar que os melhores resultados para germinação estão na ordem de 72 a 78 % para sementes secas nas condições de temperaturas de 40°C, elevando as germinações, em relação ao produto reumidificado, em 13 e 8 % para os ensaios

1 e 2, respectivamente. Estes valores encontram-se superiores aos encontrados antes do processo de secagem e também ao valor de 70 % estabelecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Este aumento da germinação total das sementes de cornichão pode estar sendo ocasionado pelo processo de reumidificação realizada anteriormente a secagem. Este processo umidificou as sementes, aumentando sua quantidade de água, que por consequência pode ter estimulado o início da germinação e diminuindo a dormência das sementes, que logo depois de secas estacionam este processo, seguindo deste ponto de estagnação logo quando submetidas novamente à germinação. Segundo Dias et. al (2004), o funcionamento das atividades fisiológicas da germinação é dependente da capacidade de “embebição” da semente, pois a água é fator limitante no processo germinativo. Oliveira (2015) em seu estudo de secagem de sementes de cevadilha vacariana verificou um aumento de germinação com a reumidificação, elevando os valores de 58% para 88% quando reumidificadas, secas e germinadas. O autor justifica seu resultado com uma indicação de que as sementes reumidificadas possuem ligações mais fortes da molécula da água com o eixo embrionário da semente. Ainda segundo o autor a submissão das sementes ao processo de reumidificação pode ter acelerado o fenômeno biológico das sementes, retomando o crescimento do embrião, com subsequente rompimento do tegumento.

Ainda pela Tabela 4.5 observa-se que as demais condições não apresentaram uma conservação ou melhora nos índices de germinação. Isto pode ser justificado devido ao aumento da temperatura, ocasionando a degradação das sementes.

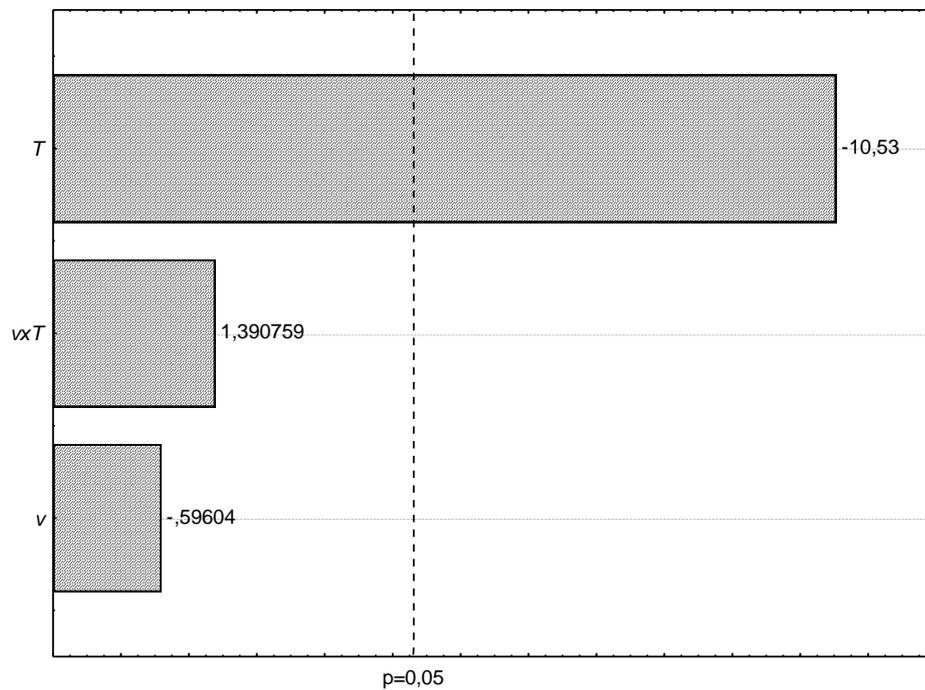
Para compreender melhor a discussão referente à umidade final e germinação das sementes de cornichão, são apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11 os diagramas de pareto referentes ao planejando experimental fatorial 2^2 com tréplica no ponto central. Nesse diagrama, a magnitude da influência dos efeitos principais e sua interação sobre a resposta umidade final em base úmida e germinação são apresentadas pelas colunas, enquanto que a linha transversal à coluna representa a magnitude dos efeitos com significado estatístico para $p=0,05$, ou seja, os fatores que são estatisticamente significativos ao nível de 95 % de confiança.

Figura 4.10– Diagrama de pareto para estudo da resposta umidade final (U_{BU} final).



Fonte: Autor, 2016

Figura 4.11 – Diagrama de pareto para estudo da resposta aumento da germinação (V_{GU}).



Fonte: Autor, 2016

A partir da Figura 4.10, para a resposta umidade final em base úmida, observa-se que a variável temperatura de secagem (T) foi o fator com significância ao nível de confiança a 95 % que influenciou a resposta de umidade final em base úmida das sementes de cornichão.

Para esta variável, o sinal negativo indica que o aumento na temperatura promoveu uma diminuição no valor da resposta umidade final. Este resultado condiz com as explicações efetuadas na Tabela 4.6, onde foi constatado que modificações na temperatura do ar de secagem de 40 para 60 °C causaram mudanças na umidade final das sementes. É observado que para temperaturas mais elevadas, onde a atividade de água é menor, o valor da umidade do produto final deve ser inferior ao encontrado em temperaturas mais baixas.

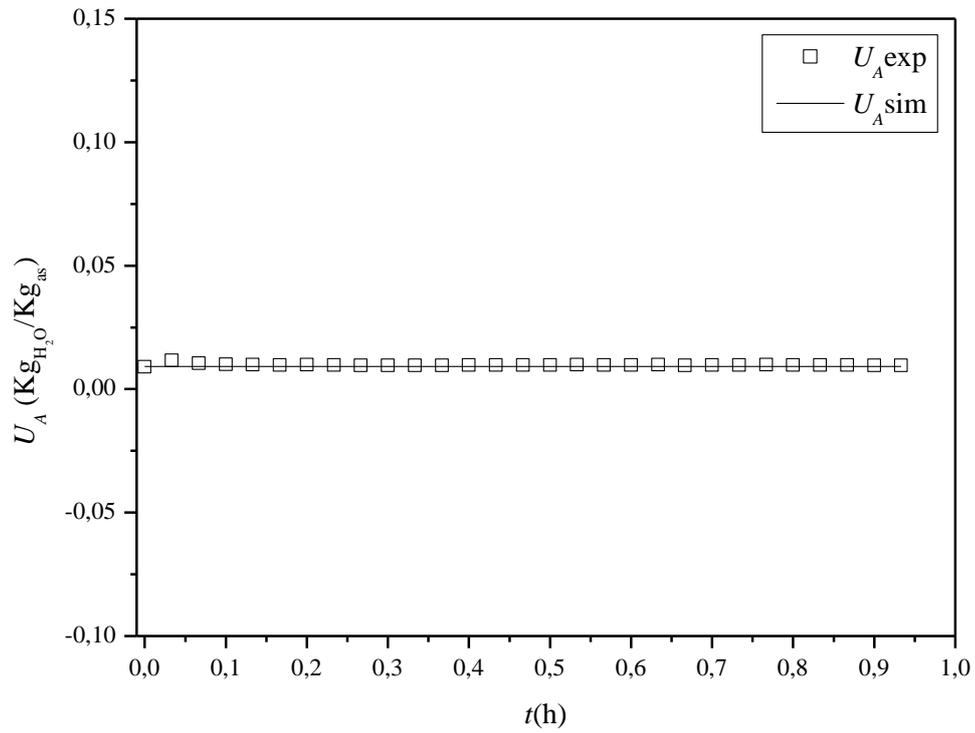
Pela Figura 4.11, para a resposta aumento da germinação, observa-se que o fator que teve uma magnitude do efeito com significado estatístico para $p=0,05$ também foi a temperatura do ar de secagem. Para essa análise também foi constatado uma magnitude de efeito negativo, resultante do aumento da temperatura do ar de secagem de 40 para 60 °C, ou seja, a passagem de 40 para 60 °C promoveu uma diminuição na resposta germinação dos ensaios estudados. Oliveira (2015) constatou o mesmo comportamento em seus estudos de secagem de cevadilha vacariana, bem como Kanaan (2014) para sementes de cornichão, onde ambos os autores trabalharam com leito fixo.

4.5 Modelo de Secagem para Sementes de Cornichão (*Lotus Corniculatus L.*)

As Figuras 4.12 a 4.16 apresentam os ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação à umidade absoluta (U_A), umidade relativa (U_R), temperatura do gás (T_g), temperatura do sólido (T_s), umidade em base úmida (U_{BU}) e umidade em base seca (U_{BS}) em função do tempo de secagem na condição de 40 °C e $1,1 U_{mf}$.

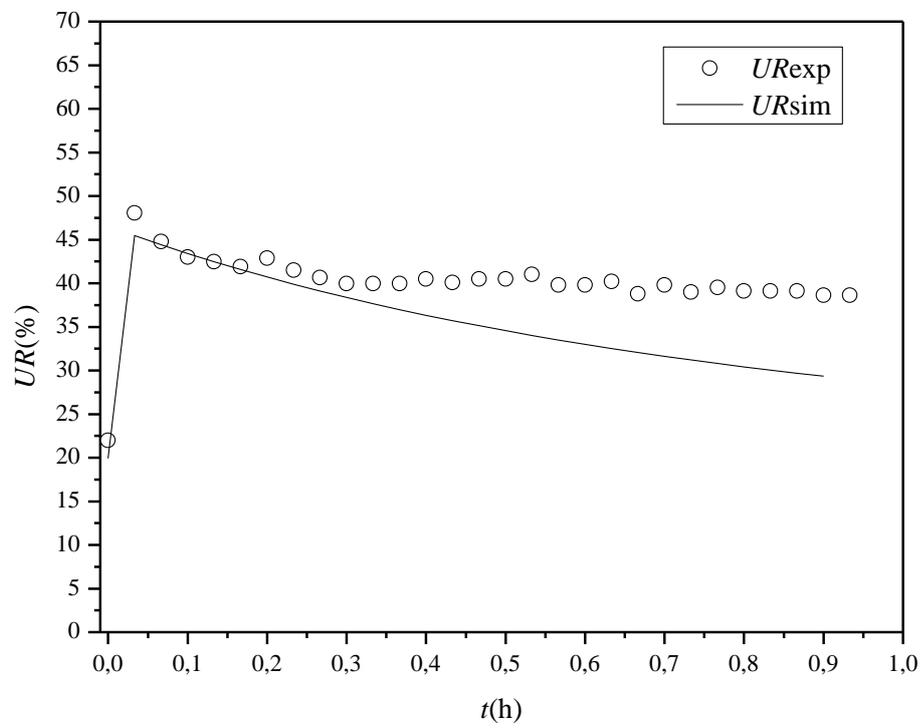
Por apresentarem um comportamento similar à condição apresentada nas Figuras 4.12 a 4.16, os ajustes para as demais condições estabelecidas encontram-se no Apêndice D.

Figura 4.12 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais com relação à U_A .



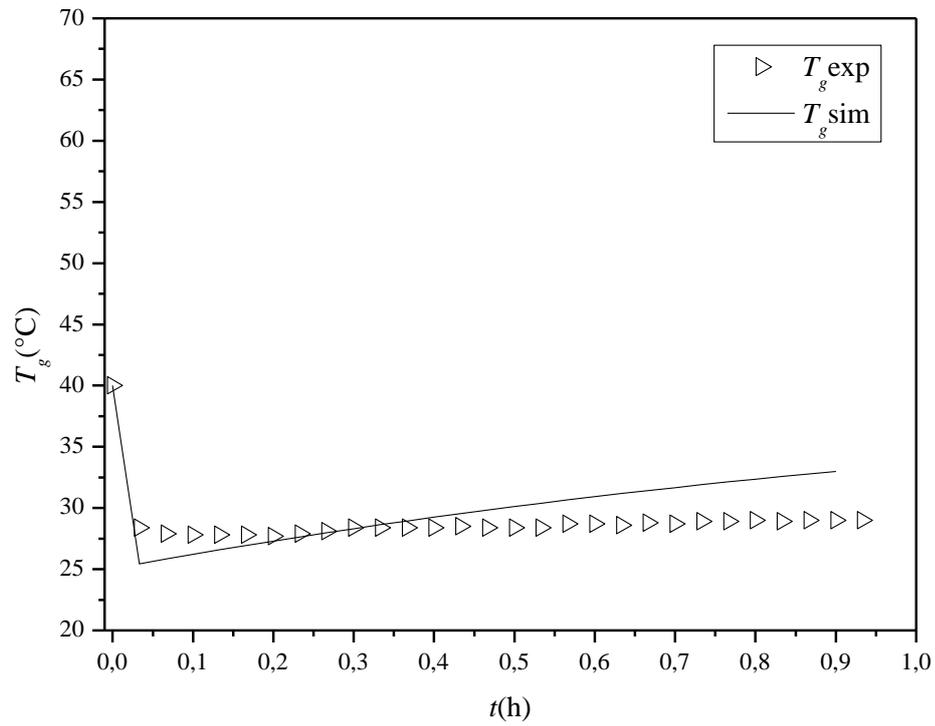
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.13 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais com relação a U_R .



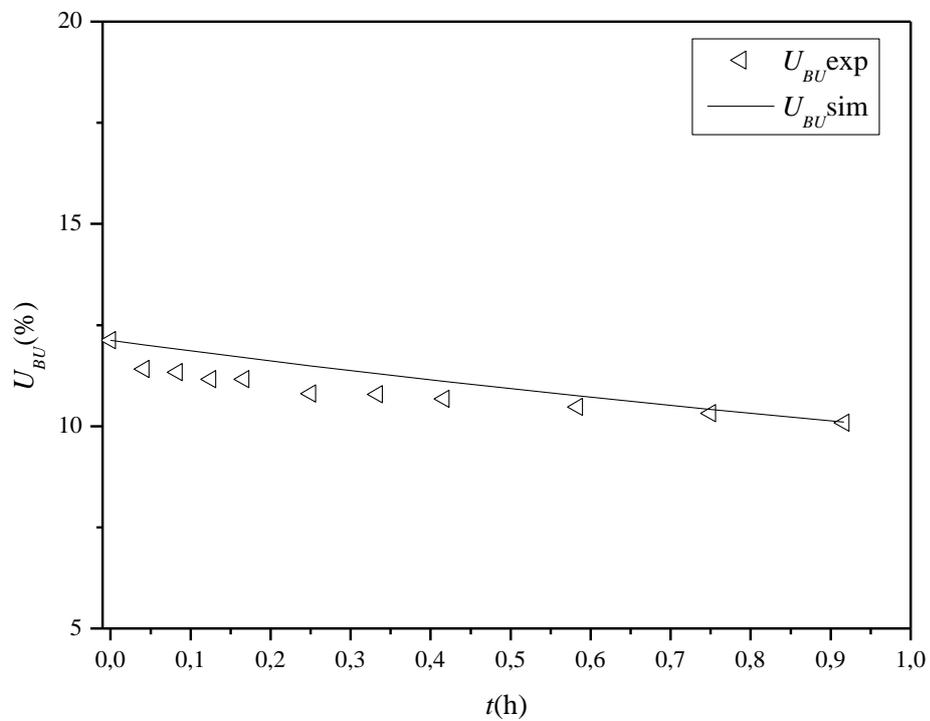
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.14 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais com relação a T_g .



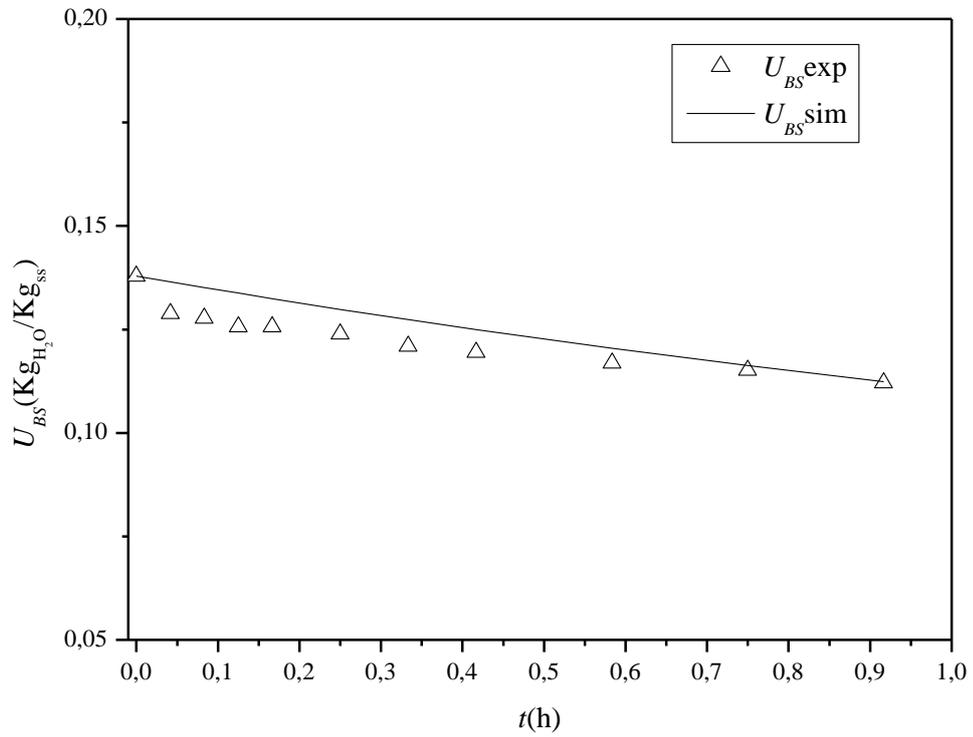
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.15 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais com relação a U_{BU} .



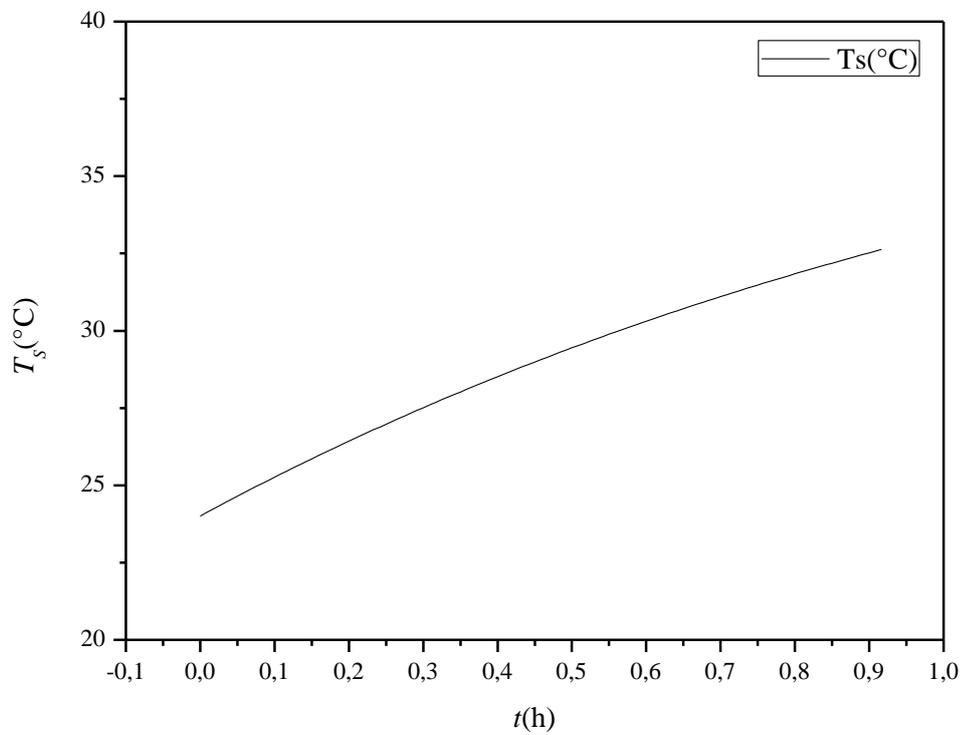
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.16 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais com relação a U_{BS} .



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.17 – Temperatura das sementes de cornichão durante o processo de secagem.



Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 4.12 é verificado que o valor de U_A praticamente não sofreu variação em função do tempo de secagem. Isto se justifica pelo fato das sementes apresentarem baixo teor de umidade, estando estas submetidas a grandes quantidades de ar em temperaturas superiores. Também na Figura 4.12 é observado que o modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais da U_A , descrevendo satisfatoriamente o comportamento dos dados experimentais.

Pode-se observar nas Figuras 4.13 e 4.14 um aumento da umidade relativa ao mesmo instante do decaimento da temperatura do gás no início da secagem. Isto se justifica pelo fato de o leito no instante inicial estar sem as sementes e com a entrada e circulação do gás a uma temperatura de 40°C, temperatura esta superior a das sementes, que logo após este instante, são depositadas no leito, alterando a U_R e T_g do gás. Esta alteração se dá pela diferença de temperatura entre o gás e as sementes, onde o gás nos instantes iniciais do processo transfere energia na forma de calor para as sementes seguindo a lei do resfriamento de Newton, onde a taxa da troca de calor será proporcional à diferença de temperatura entre as sementes e o ar seco. Após os instantes iniciais do processo esta taxa decai, tendendo a atingir o equilíbrio no sistema. Diferenciando-se deste trabalho, Oliveira Jr. (2003), constatou que o modelo de forma simplificada não se ajustou de maneira adequada ao comportamento do processo de secagem com relação a umidades do ar de secagem. Ainda sobre a Figura 4.14 observa-se que o ajuste do modelo em relação aos dados experimentais previu de forma satisfatória o processo de secagem para estas variáveis.

Pode-se observar na Figura 4.15 e 4.16 assim como descrito para as Figuras 4.13 e 4.14, que a taxa de transferência de energia ocasionada pela diferença de temperatura entre a semente e o ar de secagem diminui com o tempo, conseqüentemente diminuindo a taxa de secagem e retirada de água do material, tendendo ao equilíbrio se o processo fosse executado até o final, isto é, com o tempo tendendo ao infinito. Ainda na Figura 4.15 e 4.16 observa-se um comportamento satisfatório do modelo junto aos dados experimentais, onde a diminuição da umidade das sementes segue o comportamento indicado pela operação de secagem. Oliveira Jr. (2003) percebeu um comportamento muito similar em seus estudos de fluidodinâmica para partículas de alumina e sílica-gel em leito fluidizado e vibro fluidizado, ajustando os dados experimentais com o modelo simplificado de Massarani e Silva Telles (1992).

Devido à dificuldade de obtenção da temperatura do sólido experimentalmente, não foi possível obter o perfil de temperatura das sementes experimentalmente durante o processo de secagem, e sim apenas através do modelo proposto como apresentado na Figura 4.17.

Através da Figura 4.17 podemos observar um aumento da temperatura das sementes durante a secagem. Como a temperatura de secagem estava superior à temperatura das sementes, esta diferença gerou uma transferência de calor, onde a taxa de transferência diminuiu com o tempo de secagem até atingir um equilíbrio térmico na temperatura do ar de secagem. Ainda pela Figura 4.17 verifica-se que o comportamento simulado pode ser considerado satisfatório, dado à perfeita relação junto as Figuras 4.13 e 4.14.

A Tabela 4.6 apresenta os valores do coeficiente global de transferência de massa (K_p), vigor (V) relacionado ao 4º dia de contagem, a germinação total (G_{total}) relacionada a contagem total no 12º dia de análise e a variação da germinação após os ensaios de secagem em cada condição de secagem estabelecida.

Tabela 4.6 – Resultados do K_p em comparação a germinação das sementes de cornichão em cada condição estabelecida no estudo.

Ensaio	K_p (Kg/m ² .s)	V (%)	G_{total} (%)	V_{GU} (%)
1	$3,5 \times 10^{-5}$	$47 \pm 8,32$	$78 \pm 6,93$	13
2	$5,6 \times 10^{-5}$	$50 \pm 4,58$	$72 \pm 4,93$	8
3	$7,5 \times 10^{-5}$	$36 \pm 4,58$	$43 \pm 8,54$	-17
4	$8,1 \times 10^{-5}$	$37 \pm 11,9$	$43 \pm 16,6$	0
5	$7,85 \times 10^{-5}$	$40 \pm 4,93$	$51 \pm 6,66$	7
6	$7,2 \times 10^{-5}$	$32 \pm 5,29$	$53 \pm 8,08$	-5
7	$5,8 \times 10^{-5}$	$37 \pm 5,29$	$48 \pm 8,66$	-2

Fonte: Autor, 2016.

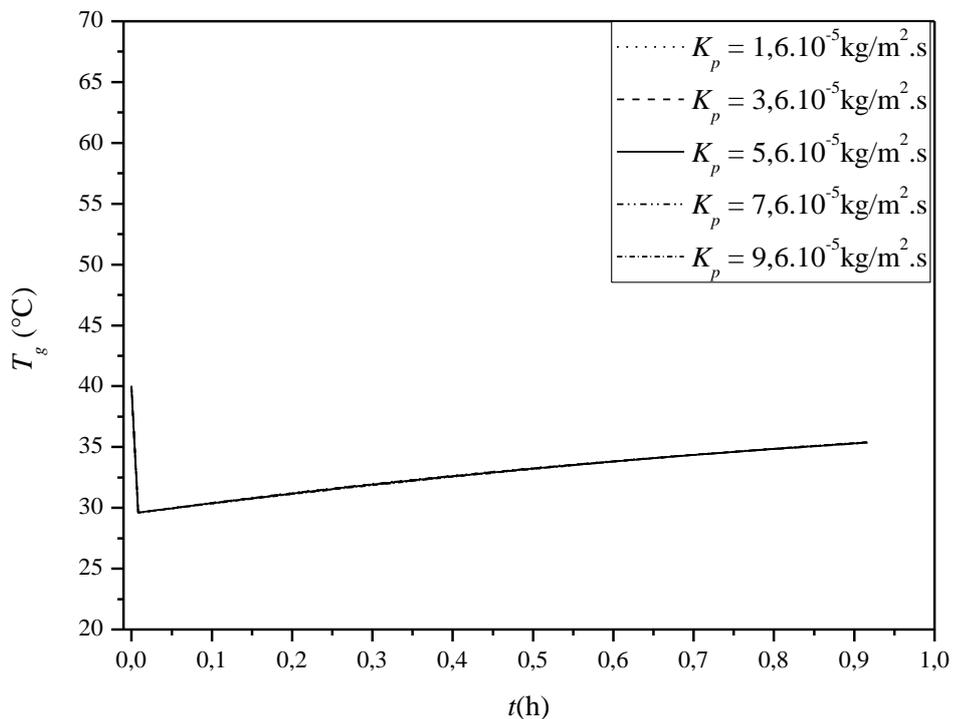
Verifica-se pela Tabela 4.6 que a mudança de velocidade do ar de secagem sob a mesma condição de temperatura de 40°C (Ensaio 1 e 2) ocasionou um aumento no valor de K_p de $3,5$ para $5,6 \times 10^{-5}$ kg/m².s. Este aumento no valor de K_p ocasionou uma pequena diminuição nos resultados de germinação das sementes, bem como reduziu o aumento da germinação quanto aos ensaios 1 e 2. Este comportamento pode ser observado também na variação de velocidade do ar na condição de temperatura de 60°C (Ensaio 3 e 4), onde o valor de K_p foi elevado de $7,5$ para $8,1 \times 10^{-5}$ kg/m².s.

Pode-se também observar pela Tabela 4.6 que a mudança de temperatura nas condições de velocidade de $1,1 U_{mf}$ (Ensaio 1 e 3) e $1,3 U_{mf}$ (Ensaio 2 e 4) elevaram de maneira mais significativa o valor de K_p , onde estes foram de $3,5$ para $7,5 \times 10^{-5}$ kg/m².s para os ensaios 1 e 3 e de $5,6$ para $8,1 \times 10^{-5}$ kg/m².s para os ensaios 2 e 4, o que levou a uma diminuição considerável da germinação das sementes.

Ainda pela Tabela 4.6 é possível observar um aumento mais significativo do K_p com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem juntos. A influência deste aumento nos resultados de germinação das sementes secas não é benéfica, diminuindo os valores de germinação de $78 \pm 6,93$ para $43 \pm 16,6$ %, o que reduziu a germinação em 17 % com relação às sementes reumidificadas. Este comportamento pode ser justificado pelo fato da transferência de massa ser uma transferência da matéria, onde a maior diferença de concentração ocasionada pelo aumento da temperatura e da velocidade do ar ocasiona no aumento dos processos envolvendo os mecanismos de transferência de massa (difusão e convecção). O aumento destes processos pode estar degradando a semente e impossibilitando sua germinação. Como discutido na seção de materiais e métodos, a obtenção do coeficiente global de transferência de massa deu-se através de ajuste do modelo com os dados experimentais, sendo importante realizar uma análise de sensibilidade paramétrica para o K_p a fim de observar seu comportamento em relação a variações próximas do K_p encontrado para cada condição de secagem.

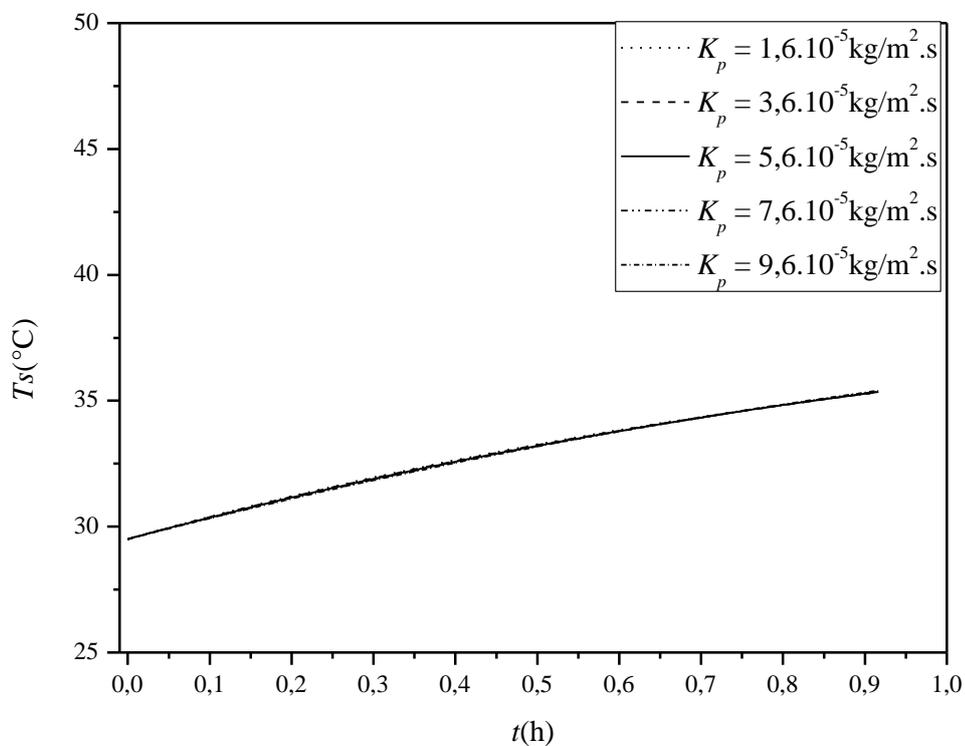
Em relação aos resultados da análise de sensibilidade paramétrica, foram analisadas as variações do K_p com relação à temperatura do gás (T_g), temperatura dos sólidos (T_s), umidade relativa (U_R), umidade absoluta (U_A), umidade em base úmida dos sólidos (U_{BU}) e umidade em base seca dos sólidos (U_{BS}), onde os resultados de cada variação encontra-se no Apêndice E. Os resultados para análise da variação do K_p são apresentados nas Figuras 4.18 a 4.23.

Figura 4.18– Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_g .



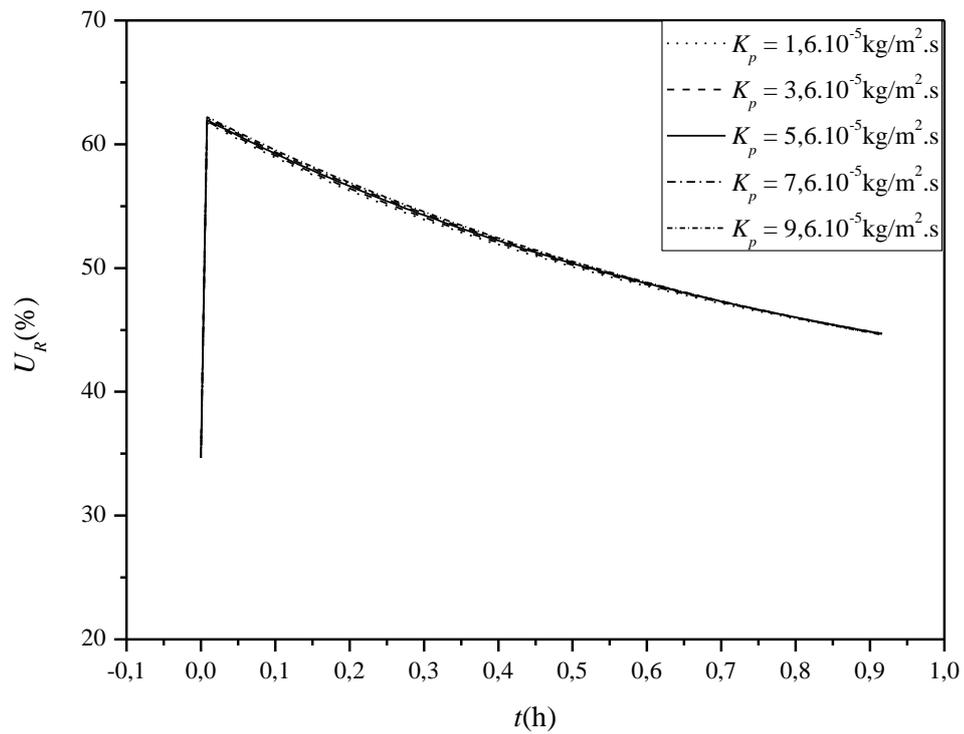
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.19– Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_s .



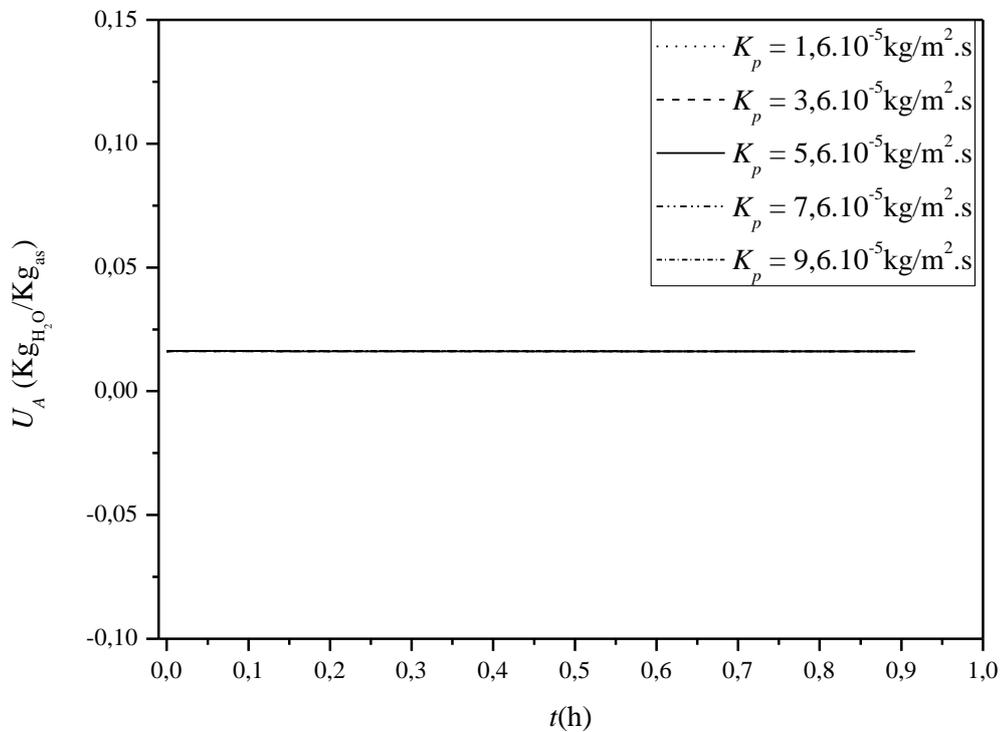
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.20– Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_R .



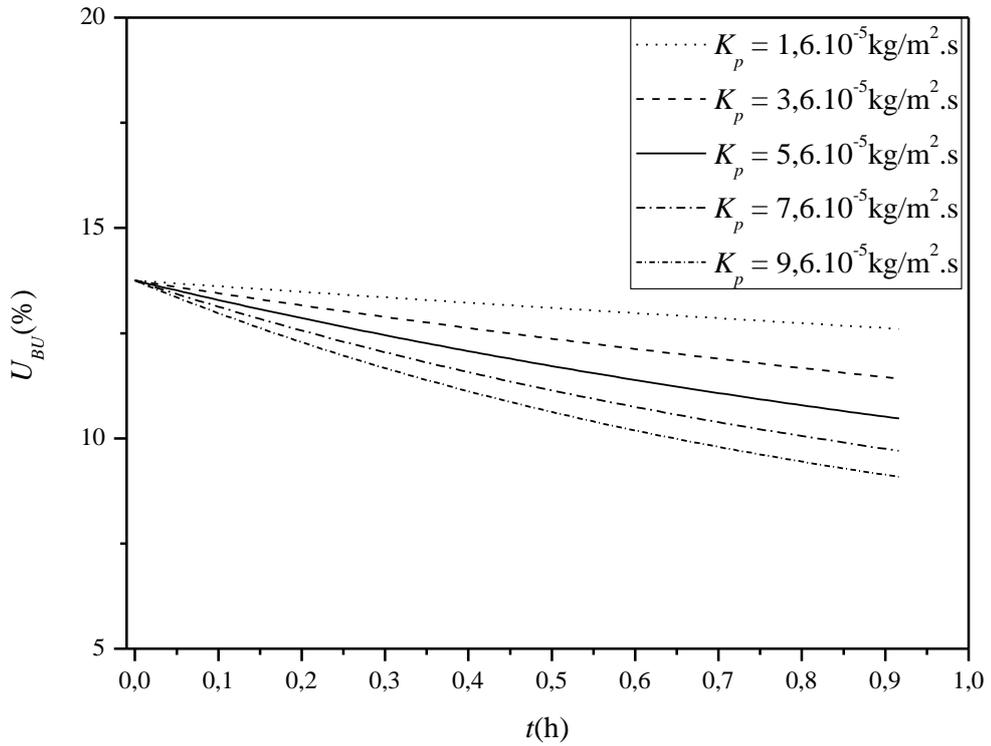
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.21 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_A .



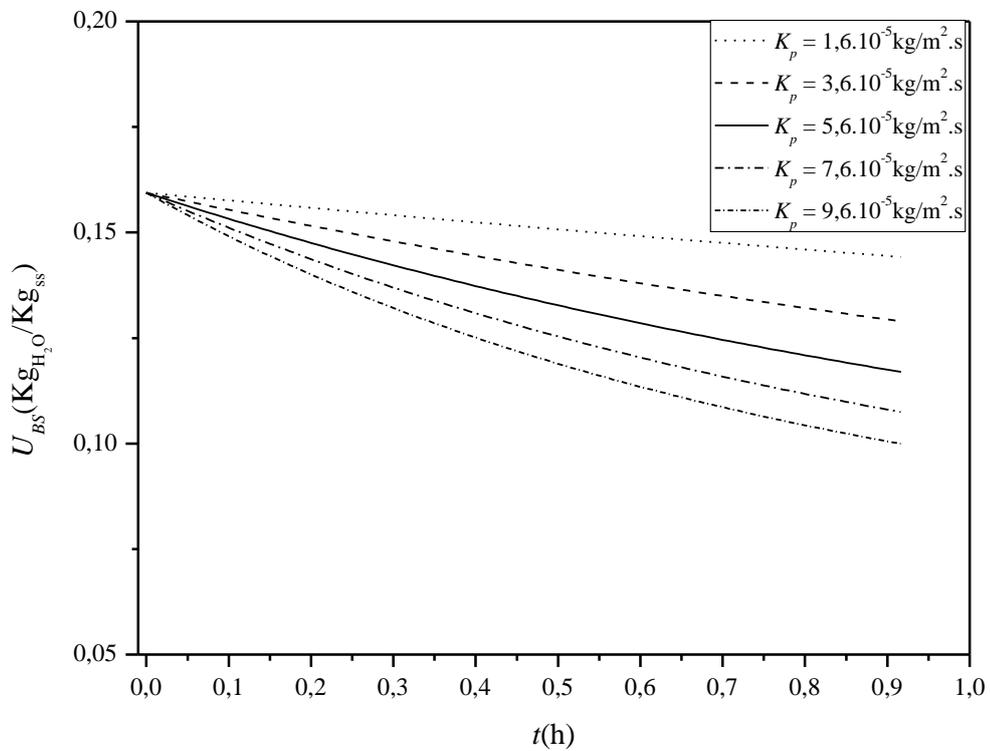
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.22– Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BU} .



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.23 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BS} .

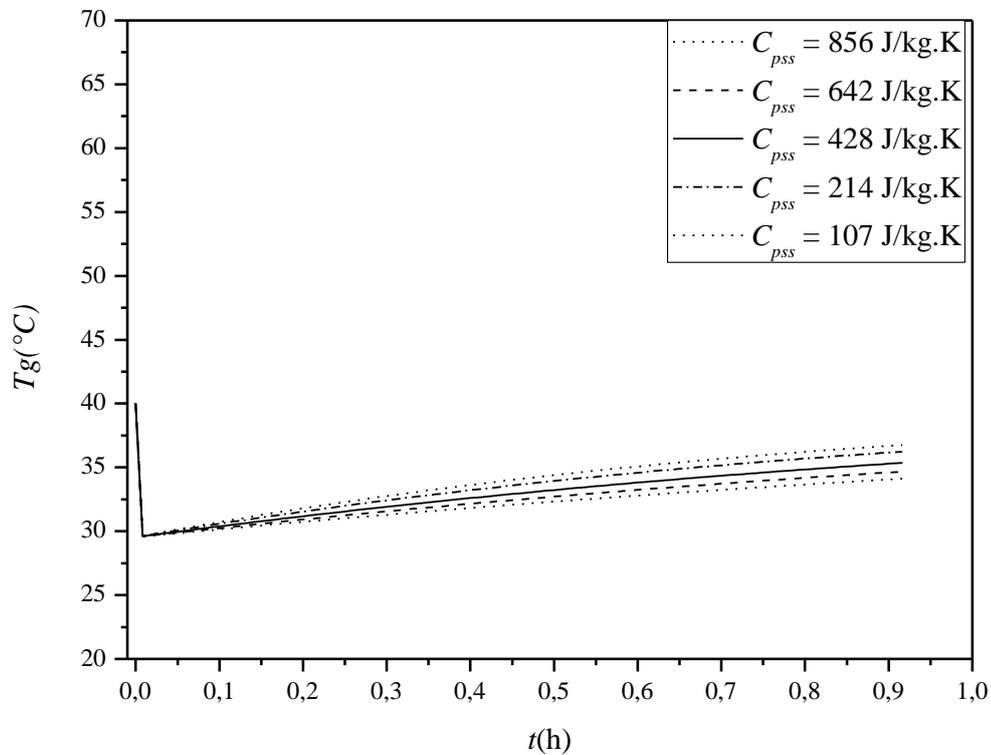


Fonte: Autor, 2016.

Podemos observar nas Figuras 4.18 a 4.23 que a mudança do K_p desde um baixo valor da ordem de 10^{-5} até um valor próximo a ordem de 10^{-4} apresentou mudança nos resultados de U_{BU} U_{BS} . Nestas figuras, o aumento ou a diminuição do coeficiente global de transferência de massa, acelera ou desacelera a operação de secagem, já que por definição, representa a parcela de umidade que migra do sólido por unidade de área a cada segundo. Ainda nas Figuras 4.18 a 4.23, o K_p não ocasiona grandes diferenças na T_g , T_s , U_A , e U_R .

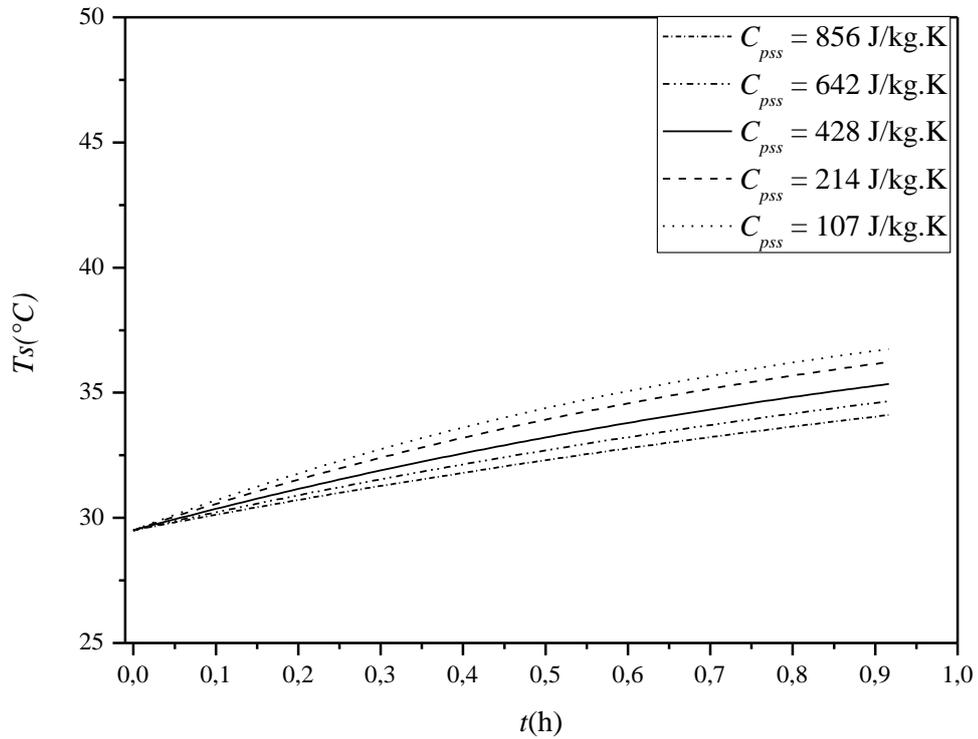
Assim como para o K_p , foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} devido a inexistência desta variável na literatura. Os resultados para análise da variação do C_{pss} são apresentados nas Figuras 4.24 a 4.29.

Figura 4.24 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_g .



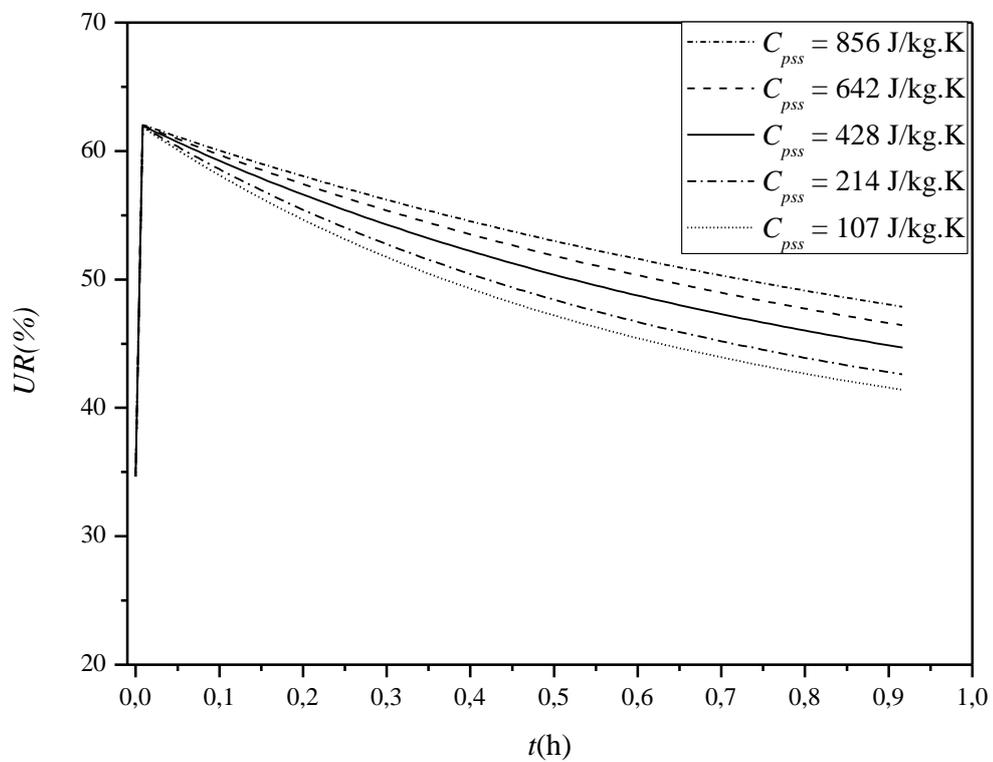
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.25 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_s .



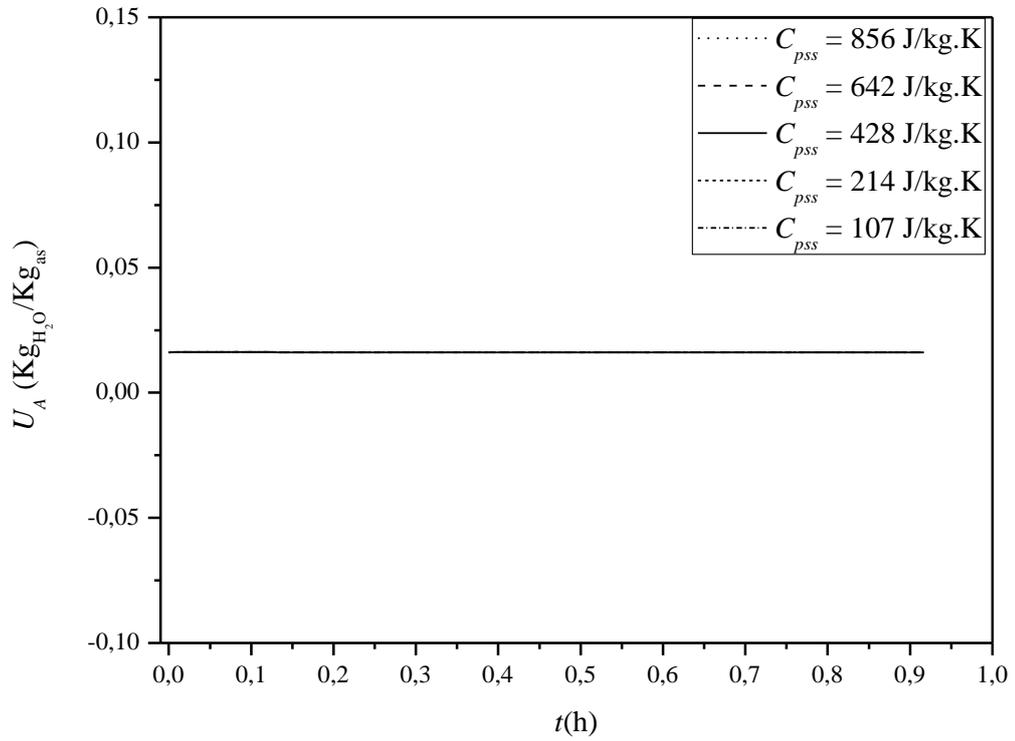
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.26 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_R .



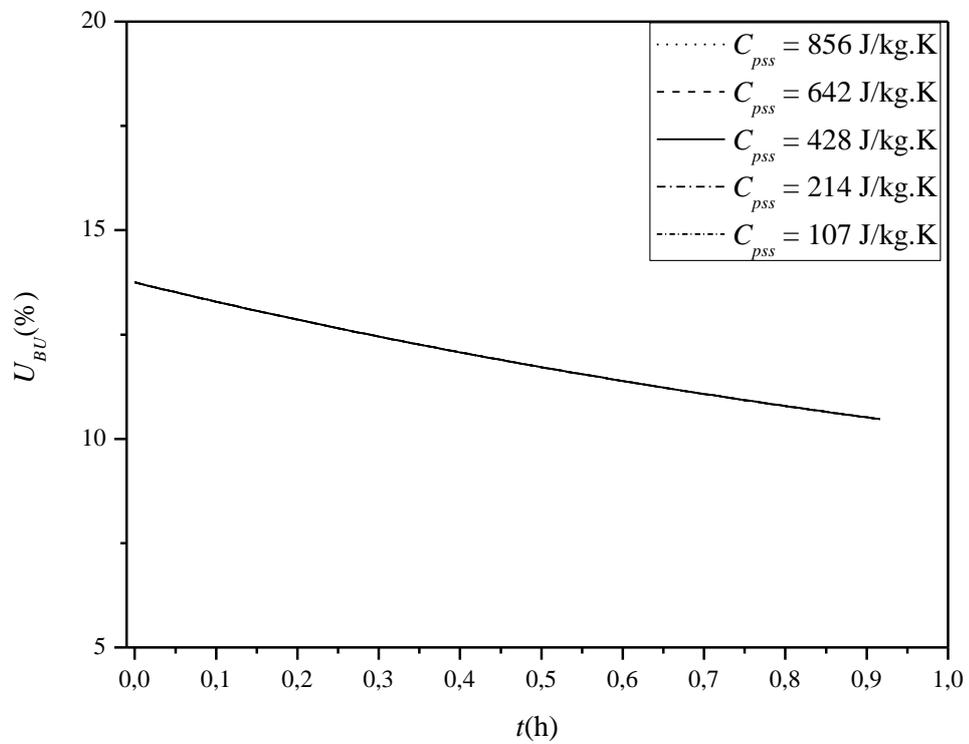
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.27 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_A .



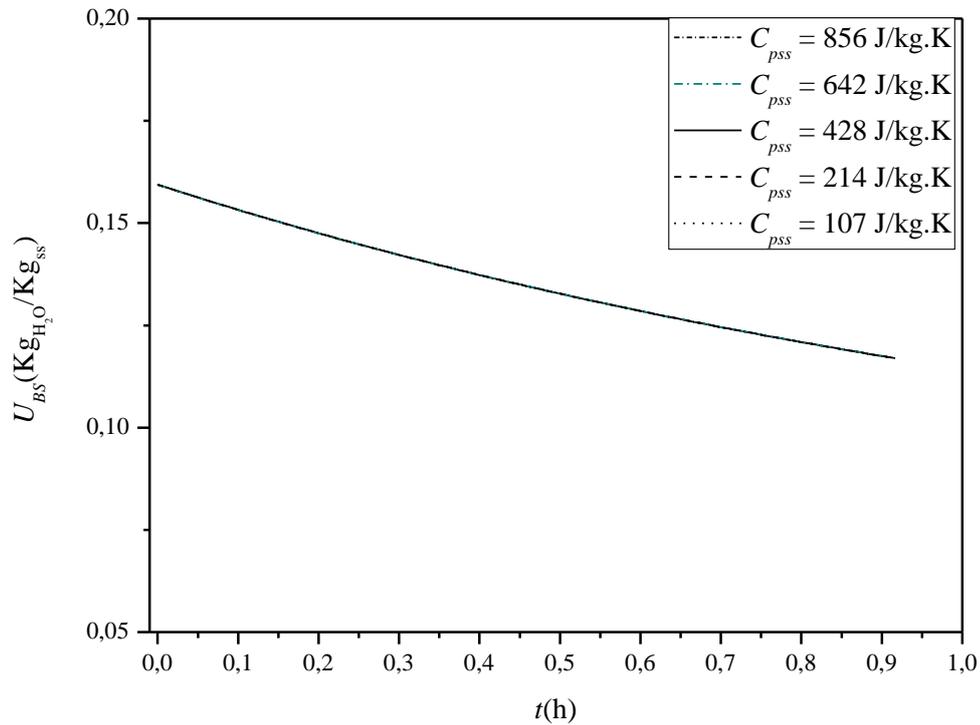
Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.28 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BU} .



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.29 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BS} .



Fonte: Autor, 2016.

É observado nas Figuras 4.24 a 4.29 que mesmo a redução até o valor de 107 J/kg.K utilizado para o C_{pss} e a elevação até o valor de 856 J/kg.K não acarretaram em nenhuma variação nos resultados para U_{BU} e U_{BS} do sólido e na U_A do ar de secagem. Já os valores de T_g , T_s e U_R variam de forma menos intensa. Isto ocorre, pelo fato de que a T_s depende diretamente do calor específico do sólido (C_{ps}) e este depende de C_{pss} . O mesmo ocorre com T_g , que conseqüentemente altera o valor de U_R , como visto na Equação 3.15 e 3.16. Os desvios sofridos pelo modelo com a variação do C_{pss} não são significativas, classificando o valor utilizado pelo C_{pss} como válido para o modelo.

6 CONCLUSÕES

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

Na caracterização física das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) fornecidas pela Embrapa foi possível obter-se um valor de umidade em base úmida de $10,00 \pm 0,07$ %, de diâmetro de *Sauter* de $1,27 \pm 0,03$ mm, de massa específica real de $1310,05 \pm 0,01$ kg/m³, de massa específica *bulk* de $846,10 \pm 0,01$ kg/m³, de porosidade do leito estático de $0,35 \pm 0,01$, de esfericidade de $0,99 \pm 0,01$, de ângulo de repouso de $27,21 \pm 1,54$ ° e de germinação de $57,33 \pm 3,51$ % para sementes *in natura*.

Para o estudo relacionado às curvas da cinética de secagem das sementes de cornichão conclui-se que as mesmas tiveram um comportamento típico de secagem. Na avaliação das curvas do adimensional de umidade em função do tempo conclui-se que o aumento na temperatura e na velocidade do ar de secagem acarretam um aumento na força motriz de secagem, conseqüentemente diminuem a umidade das sementes. Para o ajuste dos dados aos modelos cinéticos propostos observou-se que levando em consideração o menor número de parâmetros de ajuste ao modelo e os valores R^2 e P_p , o modelo de Page foi o mais satisfatório para os ensaios de secagem, com coeficiente de determinação acima de 0,991, erro médio relativo entre 0,42 e 1,22 %. Para a difusividade efetiva dos modelos analisados constatou-se que o aumento no nível das variáveis estudadas, proporcionaram um aumento no D_{ef} de todo o processo de secagem, sendo valores esses encontrados dentro da faixa para matérias orgânicas.

Em relação à análise de umidade final, conclui-se que temperatura foi a variável mais influente nas sementes de cornichão (*Lotus Corniculatus* L.). Em relação a germinação das sementes, constata-se através dos testes fisiológicos que as sementes secas tiveram boa representação para a temperatura de 40 °C, com um aumento de 13 % de germinação, e baixos valores de germinação para as temperaturas de 60 °C. Ambas as respostas foram comprovadas pela análise estatística através do diagrama de Pareto ao nível de 95 % de confiança. O resultado da germinação das sementes secas artificialmente para temperatura de 40 °C e velocidade do ar de 1,1 U_{mf} atingiu o valor de 78%.

No estudo comparativo entre o modelo proposto para secagem e os dados obtidos experimentalmente, conclui-se que a modelagem e a simulação previram de forma satisfatória a secagem de cornichão em leito fluidizado. Através do ajuste do modelo proposto foi

possível encontrar o valor do coeficiente global de transferência de massa para cada condição de secagem, onde conclui-se que o K_p cresce diretamente proporcional a temperatura e velocidade do ar de secagem, encontrando-se valores que foram de 3,5 a $8,1 \times 10^{-5}$ Kg/m².s.

No estudo da influencia do coeficiente global de transferência de massa com a germinação das sementes de cornichão, conclui-se que o aumento do K_p diminui o índice de germinação, levando estes para fora da faixa comercial estabelecida pela legislação. Ainda sobre a influencia do K_p no índice de germinação das sementes de cornichão, conclui-se que até o valor de $5,6 \times 10^{-5}$ kg/m².s encontrado na condição de 40°C e $1,3 U_{mf}$ não apresenta perdas na qualidade fisiológica das sementes de cornichão.

Por fim, no estudo comparativo dos valores do coeficiente global de transferência de massa e do calor específico de sólido seco para as sementes de cornichão, com suas variações na análise de sensibilidade paramétrica do modelo, conclui-se que o K_p encontrado é o melhor ajuste possível para previsão da operação de secagem de sementes de cornichão em leito fluidizado, bem como o valor do C_{pss} utilizado de outra leguminosa não influencia significativamente na simulação da operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ALBRECHT EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. Disponível em: <www.albrecht.com.br>. Acessado em: 04/09/2015.

ALMEIDA, A.R.F. *Análise da secagem de pastas em leite de jorro*. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos SP, 2009.

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.

BALL, D. M.; HOVELAND, C. S.; LACEFIELD, G. D. *Southern forages*. 4. ed. Lawrenceville, Georgia: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2007. 322 p.

BAUDET, L.M.L.; VILLELA, F.A.; CAVARIANI, C. *Princípios de secagem*. Seed News, Pelotas-RS, 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.

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

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

BRASIL. Instrução Normativa N°40, de 12 de junho de 2002. Brasília, DF, Diário oficial da união, 12 jun. 2002.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W., *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, An AVI Book published by Van Nostrand Reinhold, New York, 450 p., 1992.

BROOKER, D.B.; BAAKER-ARKEMA,F.W.;HALL,C.W. *Drying and Storage of Grain and Oilseeds* . New York. USA. 1992. 450p.

BRUIN, S.; LUYBEN, K. C. A. M. *Drying of food materials: a review of recents 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.

BRUNAUER, S. Emmett, P.H.; Taylor, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 60, 309-319, 1938.

CALADO, V.M.A. *Secagem de Cereais em Leito Fixo e Fluxos Cruzados*, Tese de D.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1993.

CALÇADA, L.A. Modelagem e Simulação de Secadores de Leito Fixo, Tese de M. Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.

CALÇADA, L.A., BISCAIA Jr. e MASSARANI, G. Modelagem e Simulação de Secadores em Leito Fixo, Anais do XXI ENEMP, Ouro Preto, MG, Vol 1,p.384-395, 1993.

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

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.

CELESTINO, S.M.C. Princípios de secagem de alimentos. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.— (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081 ; 276).

CHANDRAN, A. N., SUBBA RAO, S., VARMA, Y. B. G. “Fluidized Bed Drying of Solids”, Aiche Journal, 36 (1), pp. 29-38, 1990.

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.

CMAPTOOLS. Disponível em: www.cmap.ihmc.us. Acessado em: 19/08/2015.

CORTEZ, O.A. Estudo Fluidodinâmico e Cinético da Ustulação de Concentrados de Sulfeto de Zinco em Reator de Leito Fluidizado. Dissertação de mestrado: PUC RJ, 2002.

CRANK, J. (1975). The Mathematics of Diffusion, 2ª ed. S.I Claredon Press Oxford.

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

DALL'AGNOL, M.; NABINGER, C.; MONTARDO, D. P. et al. Estado atual e future da produção e utilização de leguminosas forrageiras na Zona Campos. In: Reunión de Grupo Técnico en Forrajas del Cono Sur Zona Campos, 19, 2002, Mercedes, Argentina. Anais... Mercedes : INTA, 2002. p. 83-90.

FARONI, L. R. *Fatores que influenciam a qualidade dos grãos armazenados*. Universidade federal de Viçosa, Viçosa/MG. 1998 p.1-15.

FARONI, L.R.D'A; SILVA J.S. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas: Manejo de pragas no ecossistema de grãos armazenados. Cap.15, pag. 345-382. Campina Grande PB, 1998.

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.5, 2011.

FLORES, C. G.; HAMM, J. B. S.; ALMEIDA, A. R. F. de.; OLIVEIRA, J. C. P. Estudo do processo de reumidificação de sementes de azevém (*Lolium multiflorum L.*). **Anais... XXV CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2013**. Passo Fundo, 2013.

FONTANELLI, R.S. Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul-Brasileira. 2. ed. - Brasília, DF : Embrapa, 2012. 544 p.

FOUST, A.S., et al. Princípios das Operações Unitárias. 2ª Ed, Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 1982.

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

GAVA, Altanir Jaime; SILVA, Carlos Alberto Bento da; FRIAS, Jenifer Ribeiro Gava. Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações. São Paulo: Nobel, 2009.

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

GEANKOPLIS, C. J. *Transport Process and Unit Operations*, 3ª edição, Prentice-Hall, 1993.
GELDART, D. *Types of Gas Fluidization*. Postgraduate School of Powder Technology. University of Bradford. Yorks, Gt. Britain, p.285, 1972.

GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. *Caracterização e isothermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó*. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 4, nº 02, 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.

GRACE, J.R. *Circulating Fluidized Beds*. Springer; 1997 edition (September 20, 2011), 608p.
HENDERSON, J. M., HENDERSON, S. M., *A computational procedure for deep-bed drying analysis*, *J. Agric. Eng. Res.*, Vol. 13, p.87-95, 1968.

HENDERSON, S. M., *A basic concept of equilibrium moisture*, *Agricultural Engineering*, p.29-32, 1952.

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.

JUNIOR, A. R. Secagem de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em leito fluidizado. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do São Carlos, São Carlos, 2008.

JUNIOR, E.A.J; MENEGHELLO, G.E; MELO, P.T.B.S; MAIA, M.S. Tratamentos para superação de dormência em sementes de cornichão anual. Revista Brasileira de Sementes vol.26 no.2 Pelotas RS, 2004.

KANAAN, A.F. Análise da secagem de cornichão (*lotus corniculatus* L.) em leito fixo com escoamento de ar paralelo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharias. Universidade Federal do Pampa, Alegrete RS, 2014.

KANNAN, C. S., THOMAS, P. P. & VARMA, B.G., Drying of solids in fluidized beds, Ind. Eng. Chem. Res. Vol.34, p.3068-3077, 1995.

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.

KUNII, D. Fluidization Engineering. 2ª edição, editora: Butterworth-Heinemann, 1991. 491p.
KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. *Obtenção de isotermas 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*. In: Food Technol. [s.n.], 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 isotermas*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 10, n° 1, p. 83-94, 2008.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v.13, n.5, p.427-432, 1921.

LIMA, O. A. “Estudo da Secagem do Polihidroxibutirato em Leito Fluidizado”, Dissertação de Mestrado, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

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, nº 3, p.29-37, 1987.

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

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

MANCINI, M.C. Transferência de Massa em Secadores de Grãos. Tese de Doutorado. Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.

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

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, nº 3, p.301-306, 2007.

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.

MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. “Aspectos da Secagem de Material Sólido Particulado”, In FREIRE, J. T., SARTORI, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem, Vol. 1, DEQ/UFSCar, São Carlos/SP, pp. 1-39, 1992.

MAYTA, M.S.A. Estudo de Coeficiente de Transferência de Massa na Secagem de Grãos em Leito Deslizante e Fluxos Cruzados , Tese de M. Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.

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

MELO, P.T. B. S; BARROS, A. C. S. A. Situação da produção de sementes de trevo branco (*trifolium repens* l.), cornichão (*lotus corniculatus* l.) E lotus anual (*lotus subbiflorus* lag.) no Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agrociencia, v.11, n.1, p.13-18, 2005.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. A new model for single-layer drying. Drying Technology, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MIRANDA, L.C.; DA SILVA,W.R.;CAVARIANI,C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. Pesq agropec bras, Brasília, v.34, n.11, p.2097-2108, 1999.

MORAES, M.L.B de. Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz. 2000. 50f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) -UFPEl.

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.

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.

NABINGER, C. Manejo e produtividade das pastagens nativas do subtropico brasileiro. In: Simpósio de forrageiras e produção animal, 1, 2006, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre:UFRGS, 2006. p.25-76.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E. Planejamento e Otimização de Experimentos. São Paulo: Editora da UNICAMP. 1996.

OLIVEIRA, J.C.O.; PAIM, N.R. Teste de progênie em linhas de seleção materna de duas espécies do gênero Lotus. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.25, n.3, p.461-467, 1990.

OLIVEIRA, J.C.P.; PAIM, N.R.; FRIES, L.A. Comparação entre três procedimentos na seleção de plantas individuais em Lotus spp. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.25, n.7, p.955-961, 1990.

OLIVEIRA, L.C. Estudo da secagem de sementes de cevadilha vacariana (*bromus auleticus trinius*) em secador de leito fixo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharias. Universidade Federal do Pampa, Alegrete RS, 2015.

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.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. 1949. Thesis (M.Sc.) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

PALANCZ, B. “A Mathematical Model for Continuous Fluidized Bed Drying”, *Chemical Engineering Science*, 38 (7), pp. 1045-1059, 1983.

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

PESKE, S.T.; LUCCA FILHO, O.A.; BARROS, A.C.S.A. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. 2.ed., Pelotas: Ed. Universitária/UFPEL, 2006, p.16-59.

PESKE. S; ROSENTHAL. M; ROTA. G. R. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. Pelotas – RS, 2003.p. 13 – 15.

PGW Sementes. Acesso em: <www.pgwsementes.com.br>. Acessado em: 01/04/2015.

PORPINO, K. K. P. *Biossorção de ferro (ii) por casca de caranguejocides cordatus*. Universidade Federal da Paraíba (Mestrado), p. 22-24, 2009.

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.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; BAIER, A. C.; TOMM, G. O. Principais forrageiras para integração lavoura-pecuária, sob plantio direto, nas Regiões Planalto e Missões do Rio Grande do Sul. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 142 p.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S. Leguminosas forrageiras perenes de inverno. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. Cap.11.

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.

SEAPA, Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação. Disponível em: <<http://www.agricultura.rs.gov.br/>>. Acessado em: 15/05/2016.

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.

SKONIESKI, F. R.; VIEGAS, J.; BERMUDEZ, R. F. Composição botânica e estrutural e valor nutricional de pastagens de azevém consorciadas. . *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.40, p.550-556, 2011.

SYAHRUL, S., HAMDULLAHPUR, F., DINCER, I. “Thermal Analysis in Fluidized Bed Drying of Moist Particles”, *Applied Thermal Engineering*, 22, pp. 1763-1775, 2002.

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.

TEIXEIRA NETO, R.O.; QUAST, D.G. *Isotermas de adsorção de umidade em alimentos*. Campinas: ITAL, v.8, p.141-197, 1993.

THOBER, C.W.A. *Fluidodinamica do leito fluidizado circulante para partículas do grupo b*. Tese de doutorado, CAMPINAS, 1995.

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.

ÜLKÜ, S., UÇKAN, G. “Corn Drying in Fluidized Beds”, In: MUJUMDAR, A. S. (ed.), Drying '86, v. 2, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1986.

USTRA, L.A.R. Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2005.

WIELEWICKI, A.P.; LEONHARDT, C.; SCHLINDWEIN, G.; MEDEIROS, A.C.S. 2006. Proposta de padrões de germinação e teor de água para sementes de algumas espécies florestais presentes na região sul do Brasil. Revista Brasileira de Sementes, v.28, n.3, p.191-197.

APÊNDICE A

Escrita do programa para simulação da secagem de cornichão (*Lotus Corniculatus* L.) em linguagem MatLab na condição de 40°C para a temperatura de secagem.

```
function df = fSLF(t,var)
%-----
%-----
%Transposição de variáveis:
%-----
%-----
global Kp ros E fi dp k2 k3 n1 n2 Patm UAe Gg L Ubu Ubs Tse Tge lambda cps
...
PMagua PMar hatm Tparede Tamb h a b c mug Kg rog Yge Yse ar AL As
Eparede ...
vg Re cpal cps cpar cpav Q UA Pvs Pv aw Xe Yseq f
%-----
%-----
%Variáveis:
%-----
%-----
Ys=var(1);
Yg=var(2);
Ts=var(3);
Tg=var(4);
%-----
%-----
%Equações:
%-----
%-----
cpal=(75.4/PMagua)*(1/0.001); %Calor específico da água líquida
(J/kg K)->Himmelblau(1998)
cps=Ys*cpal+(1-Ys)*cps; %Calor específico dos sólidos (J/kg
K)
cpar=((28.94)... %Calor específico do ar seco (J/kg
K)->Himmelblau(1998)
+(0.4147e-2*(Tg-273.15))... %OBS: *(1/0.001) - conversão de J/g
K para J/kg K
+(0.3191e-5*((Tg-273.15)^2))...
-(1.965e-9*((Tg-273.15)^3))/PMar)...
*(1/0.001);
cpav=((33.46)... %Calor específico da água vapor
(J/kg K)->Himmelblau(1998)
+(0.6880e-2*(Tg-273.15))... %OBS: *(1/0.001) - conversão de J/g
K para J/kg K
+(0.7604e-5*((Tg-273.15)^2))...
-(3.593e-9*((Tg-273.15)^3))/PMagua)...
*(1/0.001);
Q=h*ar*(Tg-Ts); %Taxa de transferência de calor
(W/m3)
f=Kp*ar*(Ys-Yseq); %Taxa de transferência de massa
(kg/m3s)
%-----
%-----
% Derivadas:
```

```

%-----
%-----
dYs=(-f)/((1-E)*ros);
dYg=(f/(E*ros))-((Gg*(Yg-Yge))/(L*E*rog));
dTs=(Q-(lambda*f))/((1-E)*cps*ros);
dTg=- (Q/(E*cpar*rog))-((cpav*(Tg-Ts)*f)/(E*cpar*rog))...
      -(Eparede/(E*cpar*rog))-((cpav*Gg*(Tg-Tge))/(L*E*cpar*rog));
%-----
%-----
% Respostas:
%-----
df=[dYs dYg dTs dTg]';
%-----
% FIM



---



%Secagem de Cornichão em Leito Fluidizado.
%-----
%-----
%Limpa a tela:
%-----

clear all
clc
%-----

%Transposição de variáveis:
%-----

global Kp ros E fi dp k2 k3 n1 n2 Patm UAe Gg L Ubu Ubs Tse Tge lambda cps
...
PMagua PMar hatm Tparede Tamb h a b c mug Kg rog Yge Yse ar AL As
Eparede ...
vg Re cpal cps cpar cpav Q UA Pvs Pv aw Xe Yseq f
%-----

%Formato para impressão:
%-----

format short g
%-----

%Dados de entrada:Exp 5 Akel
%-----

t=3600.0;           %Tempo de secagem (s)
Kp=0.001;          %Coeficiente global de transferência de massa (kg/m2s)
ros=1363.66;       %Massa específica dos sólidos (kg/m3)
E=0.370;           %Porosidade do leito de sólidos (-)
fi=0.98;           %Esfericidade dos sólidos (-)
dp=0.00137;        %Diâmetro médio dos sólidos (m)
k2=0.088;          %T=40C %Parametro do modelo de PELEG (-) DEPENDE DA Tg0
k3=0.117;          %T=40C %Parametro do modelo de PELEG (-) DEPENDE DA Tg0
n1=0.231;          %T=40C %Parametro do modelo de PELEG (-) DEPENDE DA Tg0
n2=4.511;          %T=40C %Parametro do modelo de PELEG (-) DEPENDE DA Tg0

```

```

Patm=101.321;          %Pressão atmosférica (kPa)
UAe=0.01600;         %Umidade absoluta do gás na entrada (kg H2O / kg ar
seco)
Gg=4.89/60;          %Vazão mássica do gás (kg/s)
L=0.1;               %Altura do leito de sólidos (m)
Ubu=15.85/100;       %Umidade dos sólidos em BU (-)
Tse=25.0+273.15;     %Temperatura dos sólidos em t=0 (K)
Tge=40.0+273.15;     %Temperatura do gás em t=0 (K)
lambda=1.2142e4;     %Calor latente de vaporização (J/kg) - Perry e4 ou e6?
cpss=428.0;          %Calor específico do sólido seco (J/kg K) - Medir DSC
PMagua=18.0;         %Peso molecular da água (kg/kg mol)
PMar=29.0;           %Peso molecular do ar (kg/kgmol)
hatm=10.0;           %Coeficiente global de TC natural do Leito Fluidizado
(Wm2K)
Tparede=30.0+273.15;%Temperatura da parede externa do Leito Fluidizado (K)
Tamb=25.0+273.15;    %Temperatura ambiente (K)
a=0.2;               %Largura do leito fluidizado (m)
b=0.1;               %Espessura do leito fluidizado (m)
c=0.5;               %Altura do leito fluidizado (m)
mug=17.4e-6;         %Viscosidade do gás a 0C (Pa s)
Kg=0.024;            %Condutividade térmica do gás a 0C (W/m K)
%-----
%-----
%Equações auxiliares:
%-----
%-----
Ubs=(Ubu/(1-Ubu));   %Umidade dos sólidos em BS (kg H2O / kg
sólido seco)
rog=(273.15/Tge)*1.293047; %Massa específica do gás na entrada
(kg/m3)
Yge=UAe/(1+UAe);     %Fração mássica de água no gás em t=0 (-)
Yse=Ubs/(1+Ubs);     %Fração mássica de água nos sólidos em t=0
(-)
Pvs=exp((-7511.52/Tge)... %Pressão de vapor na saturação (KPa)
+(89.63121)+(0.02399897*Tge)...
-(1.1654551e-5*(Tge^2))...
-(1.2810336e-8*(Tge^3))...
+(2.0998405e-11*(Tge^4))...
-(12.150799*(log(Tge))));
Pv=(UAe*Patm)/(0.62198+UAe); %Pressão de vapor (KPa)
aw=(Pv/Pvs);         %Atividade de água (-)
Xe=(k2*(aw^n1)+(k3*(aw^n2))); %Umidade de equilíbrio (kgágua/kgss) -
PELEG
Yseq=Xe/(1+Xe);      %Fração mássica de água no sólido no
equilíbrio (-)
ar=(6*(1-E))/(fi*dp); %Área específica dos sólidos (m-1)
AL=2*(c*b+a*c);      %Área lateral do leito Fluidizado (m2)
As=a*b;               %Área superficial do leito Fluidizado (m2)
Eparede=hatm*AL*(Tparede-Tamb); %Taxa de calor perdido na parede (J/s)
vg=Gg/(rog*As);      %Velocidade do gás na entrada (m/s)
Re=(dp*vg*rog)/mug;  %Reynolds de partícula (-)
h=(Kg/dp)*(0.0135*(Re^1.3)); %Coeficiente de transferência de calor
(W/m2 K) - Kettonring, Macerfield e Smith (1990)
%-----
%-----
%Parâmetros de integração:
%-----
%-----
tspan=[0:30:t];      %Intervalo de tempo na integração (s)

```

```

Ys0=Yse; %Condição inicial de umidade do sólido(-)
Yg0=Yge; %Condição inicial de umidade do gás (-)
Ts0=Tse; %Condição inicial de temperatura do
sólido(K)
Tg0=Tge; %Condição inicial de temperatura do gás(K)
var_t=[Ys0 Yg0 Ts0 Tg0];
[t,var]=ode23s('fSLF',tspan,var_t);
%-----
% Respostas:
%-----
UAsim=var(:,2)./(1-var(:,2)); %Umidade absoluta do gas na
saída (kg H2O / kg ar seco)
Pvssim=exp((-7511.52./var(:,4))... %Pressão de vapor na saturação
(KPa)
+(89.63121)+(0.02399897.*var(:,4))...
-(1.1654551e-5.*(var(:,4).^2))...
-(1.2810336e-8.*(var(:,4).^3))...
+(2.0998405e-11.*(var(:,4).^4))...
-(12.150799.*(log(var(:,4)))));
Pvsim=(UAsim.*Patm)./(0.62198+UAsim); %Pressão de vapor (KPa)
URsim=(Pvsim./Pvssim).*100; %Umidade relativa do ar na
saída (%)
Ubssim=var(:,1)./(1-var(:,1)); %Umidade dos sólidos em BS (kg
H2O / kg sólido seco)
Ubusim=(Ubssim./(1+Ubssim))*100; %Umidade dos sólidos em BU (%)
%load('SBBEF_ysexp_40C_50MF.txt');
%Yexp=SBBEF_ysexp_40C_50MF(:,1);
%ysexp=SBBEF_ysexp_40C_50MF(:,2);
Resposta=[t UAsim URsim Ubssim Ubusim var(:,3)-273.15 var(:,4)-273.15]
fid=fopen('teste.txt','w');
fprintf(fid,'%6.2f %6.5f %6.3f %6.3f %6.3f %6.3f %6.3f\n',Resposta);
fclose(fid);
%-----
%Gráficos:
%-----
figure('name','Umidade Absoluta');
plot(t,UAsim);
%axis([0 0.7 0.001 0.0127]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UA(kg H2O/kg Ar Seco)');

figure('name','Umidade Relativa');
plot(t,URsim);
%axis([0 0.7 0 30]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UR(%)');

figure('name','Umidade do Produto (BS)');
plot(t,Ubssim);
%axis([0 0.7 0 30]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UBS (kgH2O/kgss)');

figure('name','Umidade do Produto (BU)');

```

```
plot(t,Ubusim);
%axis([0 0.7 0 30]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UBU (%)');

figure('name','Temperatura do Sólido');
plot(t,var(:,3)-273.15);
%axis([0 0.7 0 55]);
xlabel('t (s)');
ylabel('Ts (C)');

figure('name','Temperatura do Gás');
plot(t,var(:,4)-273.15);
%axis([0 0.7 0 55]);
xlabel('t (s)');
ylabel('Tg (C)');
%-----
-----
%FIM
```

APÊNDICE B

Lista com algumas equações auxiliares ao modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) que não são apresentadas durante as seções deste trabalho..

$$\rightarrow Y_{s,eq} = \frac{X_e}{1 + X_e} - \text{Fração mássica de água no sólido no equilíbrio}$$

$$\rightarrow X_e = K_2 a_w^{n_1} + K_3 a_w^{n_2} - \text{Umidade de Equilíbrio em Base seca (Peleg)}$$

$$\rightarrow a_w = \frac{U_R}{100} = \frac{P_v}{P_{Vs}} - \text{Atividade de água}$$

$$\rightarrow P_v = \frac{U_A P_{atm}}{0,62198 + U_A} - \text{Pressão de vapor (Wilhem, 1976)}$$

$$\rightarrow P_{Vs}$$

$$= e^{\left(\frac{-7511,52}{T_g} + 89,63121 + 0,02399897 T_g - 1,1654551 \cdot 10^{-5} T_g^2 - 1,2810336 \cdot 10^{-8} T_g^3 + 2,0998405 \cdot 10^{-11} T_g^4 - 12,150799 \cdot \ln(T_g) \right)}$$

– Pressão de Vapor na Saturação

$$\rightarrow U_A = \frac{Y_g}{(1 - Y_g)} - \text{Umidade Absoluta}$$

$$\rightarrow Y_{g,0} = \frac{U_{Ae}}{1 + U_{Ae}} - \text{Fração mássica de água no gás no tempo zero}$$

$$\rightarrow Y_{s,0} = \frac{U_{BS}}{1 + U_{BS}} - \text{Fração mássica de água no sólido no tempo zero}$$

Digite a equação aqui.

APÊNDICE C

Figura C1 – Resultados encontrados para a ρ_{real} através da picnômetria gasosa.

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapyc 1200e V4.01
Analysis Report

Thu Apr 23 15:36:43 2015
User ID: UNIPAMPA

Sample Parameters

Sample ID: CORNI-RE
Weight: 27.3982 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 80.7206 cc
V Cell: 58.2468 cc
Analysis Temperature: 20.3 C
Target Pressure: 18.0 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: 0.0115 %
Average Volume: 20.8995 cc
Volume Std. Dev.: 0.0026 cc
Average Density: 1.3110 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0002 g/cc
Coefficient of Variation: 0.0125 %

----- Run Data -----		
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	20.9207	1.3096
2	20.9099	1.3103
3	20.9051	1.3106
4	20.9111	1.3102
5	20.9010	1.3109
6	20.9015	1.3108
7	20.8971	1.3111
8	20.9020	1.3108
9	20.8959	1.3112
10	20.9006	1.3109

Fonte: Autor, 2015.

APENDICE D

Resultados da simulação da secagem de cornichão em leito fluidizado para as condições de secagem apresentadas na Tabela D1.

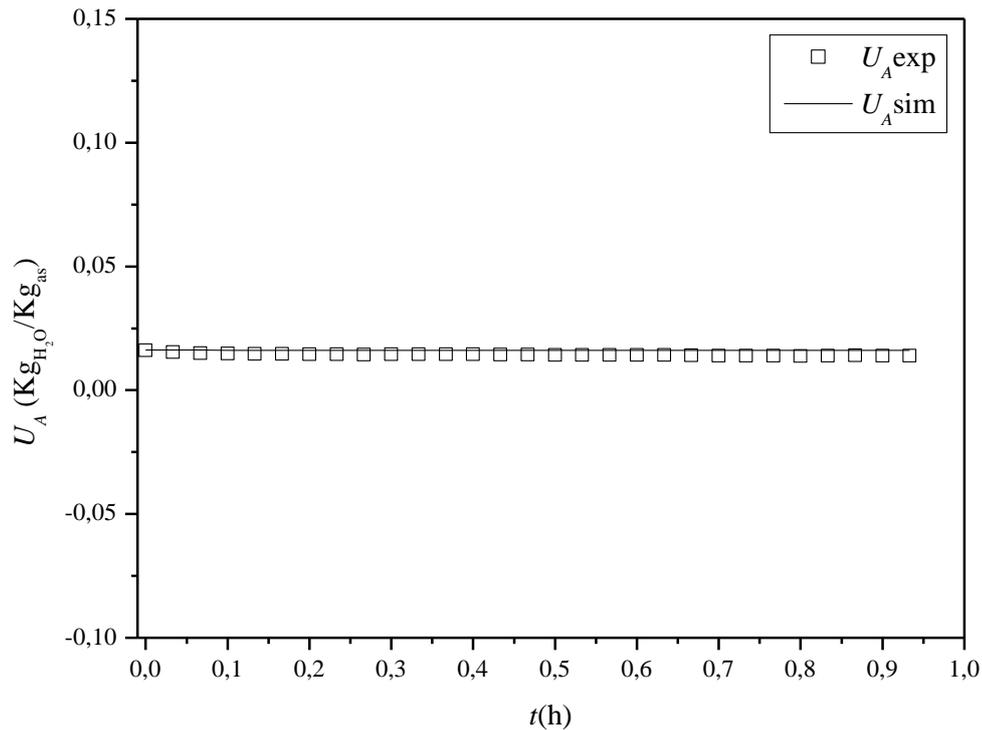
Tabela D1 – Condições de secagem para as Figuras D1 a D20 do comportamento do modelo aos dados experimentais

$T(^{\circ}\text{C})$	$u_{ar} (\% U_{mf})$
40	1,1
60	1,1
60	1,3
50	1,2

Fonte: Autor, 2016.

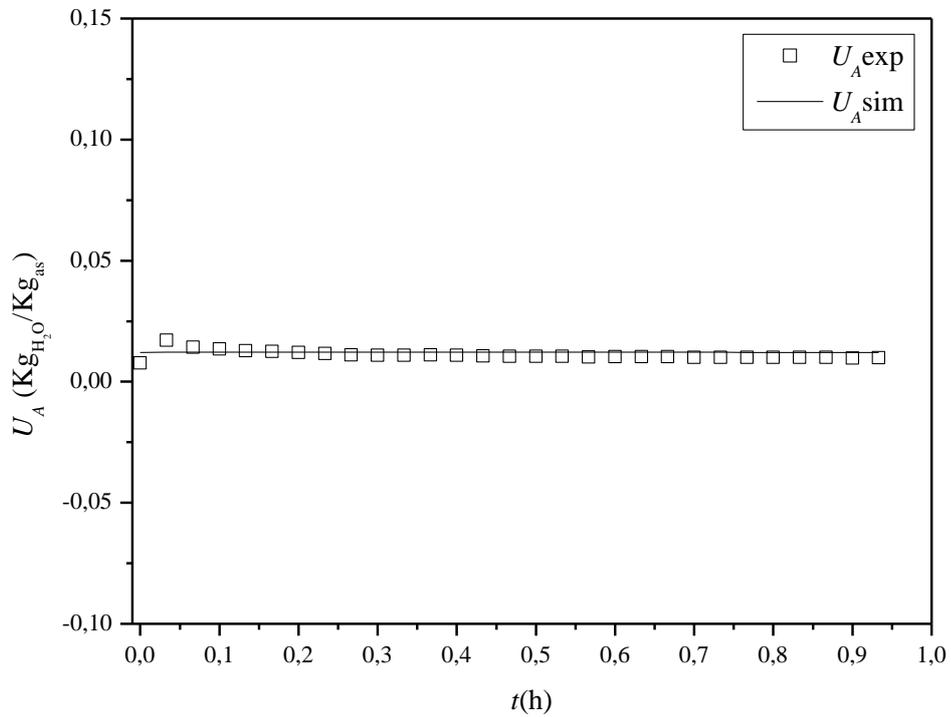
As Figuras D1 a D24 apresentam os ajustes da umidade absoluta (U_A), umidade relativa (U_R), temperatura do gás (T_g), umidade em base úmida (U_{BU}) e umidade em base seca (U_{BS}) em função do tempo de secagem nas condições apresentadas na Tabela D1.

Figura D1 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_A em função do tempo de secagem na condição de 40°C e $1,3 U_{mf}$.



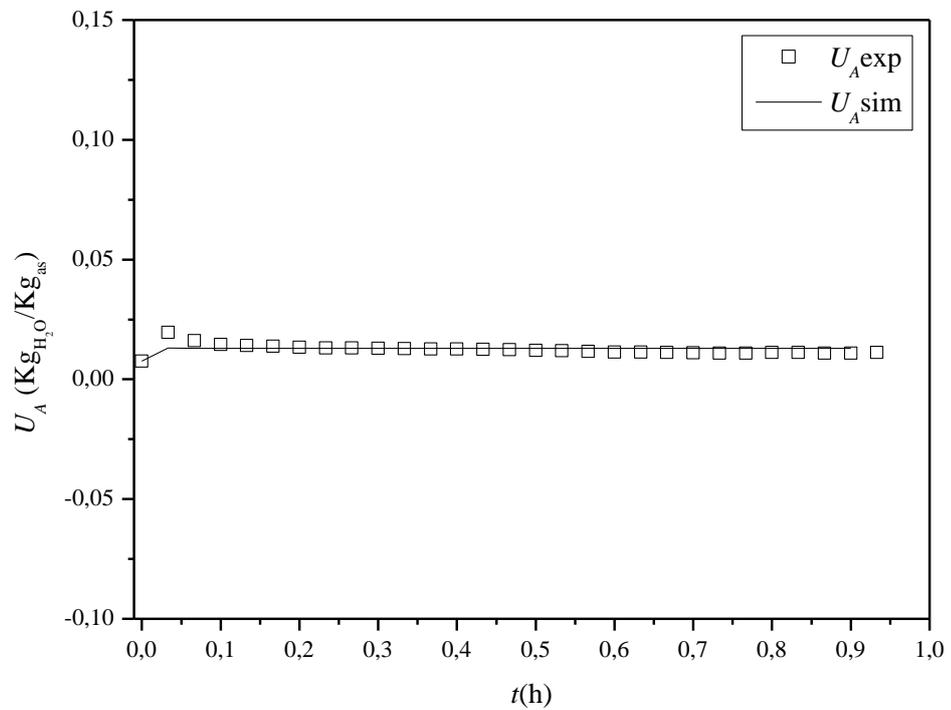
Fonte: Autor, 2016.

Figura D2 - Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_A em função do tempo de secagem na condição de 60°C e 1,1 U_{mf} .



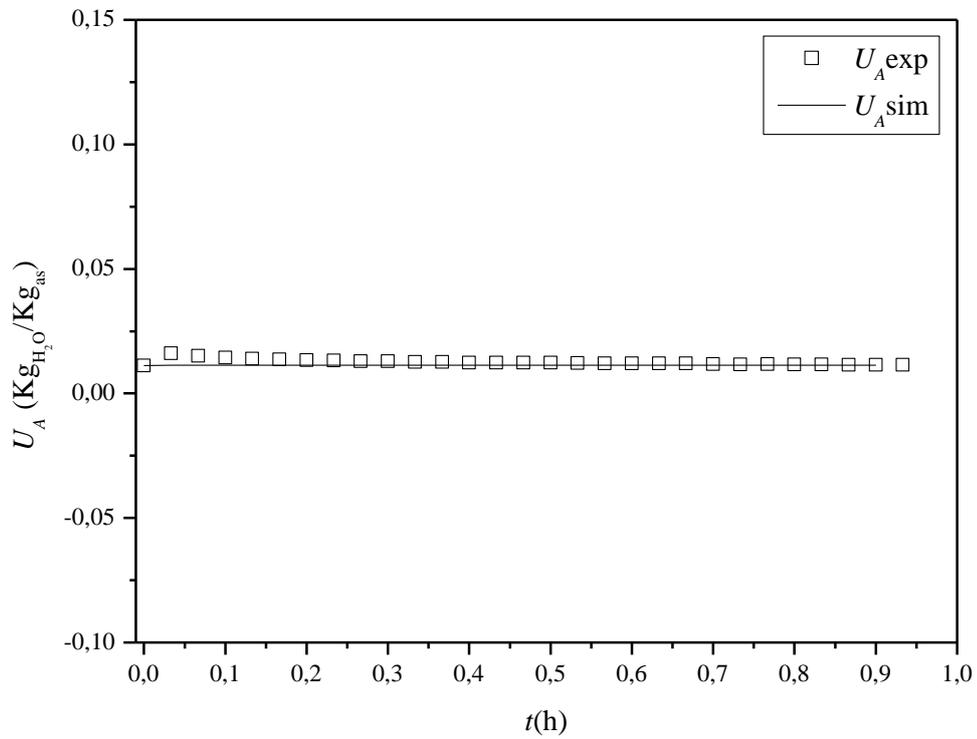
Fonte: Autor, 2016.

Figura D3 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_A em função do tempo de secagem na condição de 60°C e 1,3 U_{mf} .



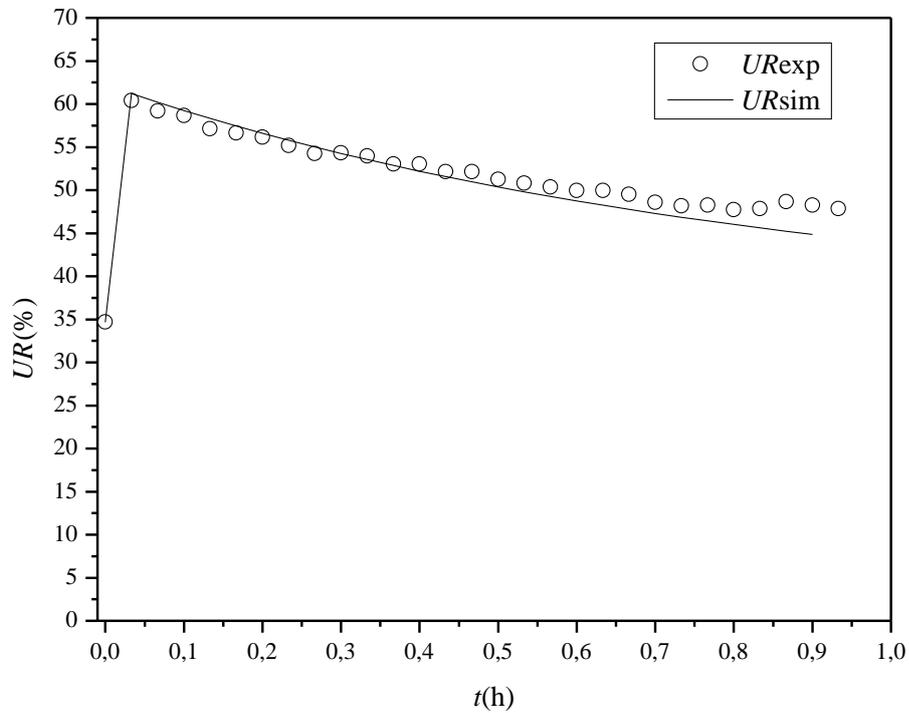
Fonte: Autor, 2016.

Figura D4 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_A em função do tempo de secagem em um dos ensaios na condição de 50°C e 1,2 U_{mf} .



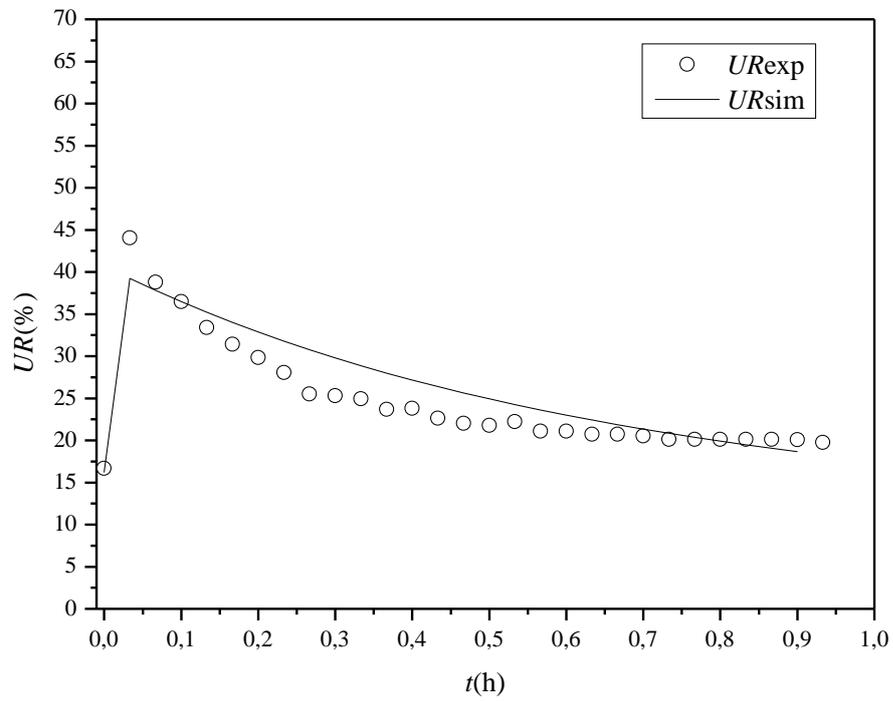
Fonte: Autor, 2016.

Figura D5 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_R em função do tempo de secagem na condição de 40°C e 1,3 U_{mf} .



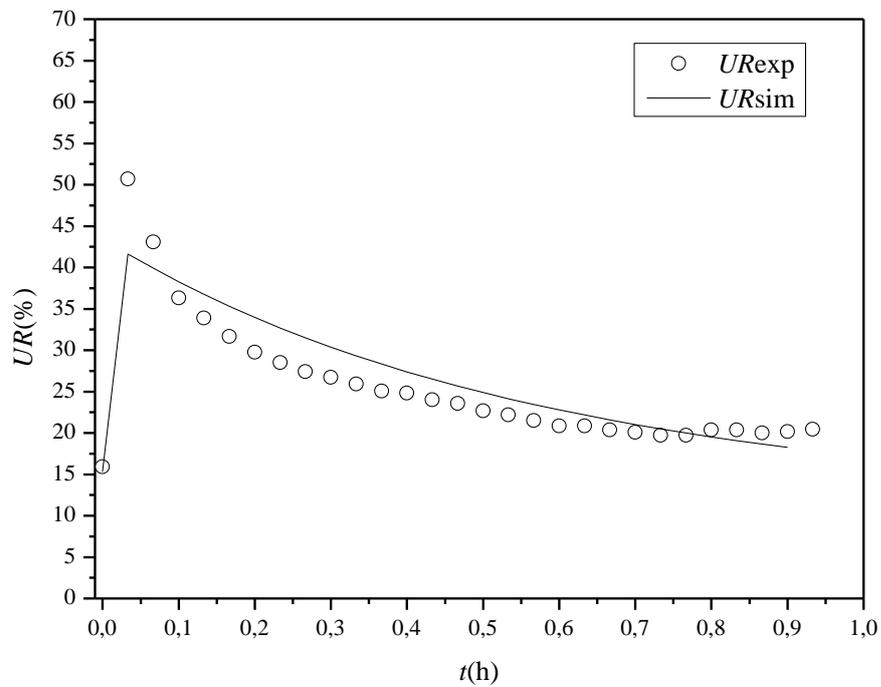
Fonte: Autor, 2016.

Figura D6 - Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_R em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,1 U_{mf}$.



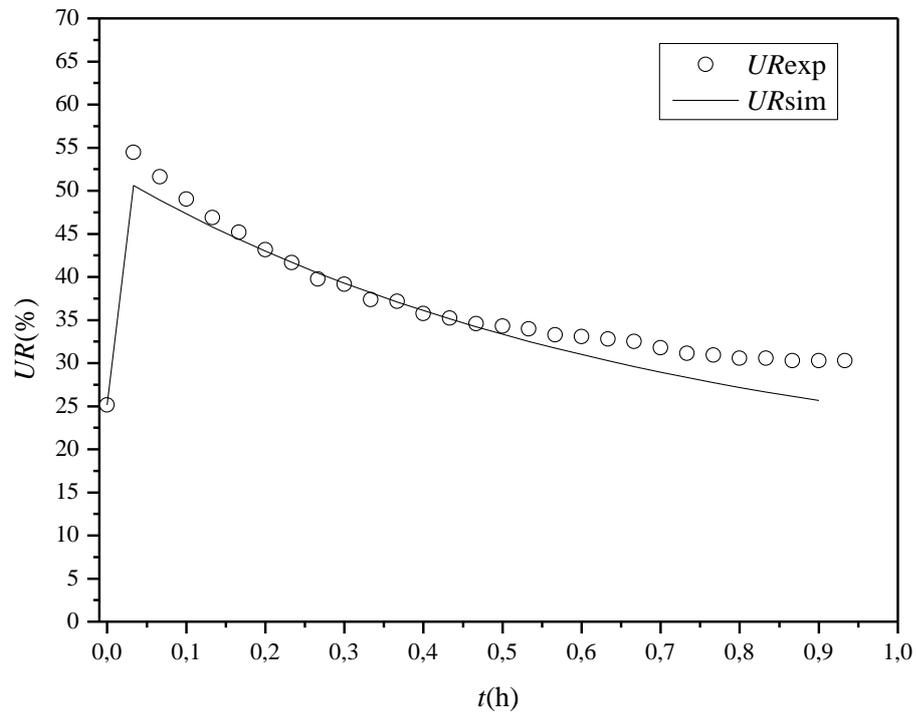
Fonte: Autor, 2016.

Figura D7 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_R em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,3 U_{mf}$.



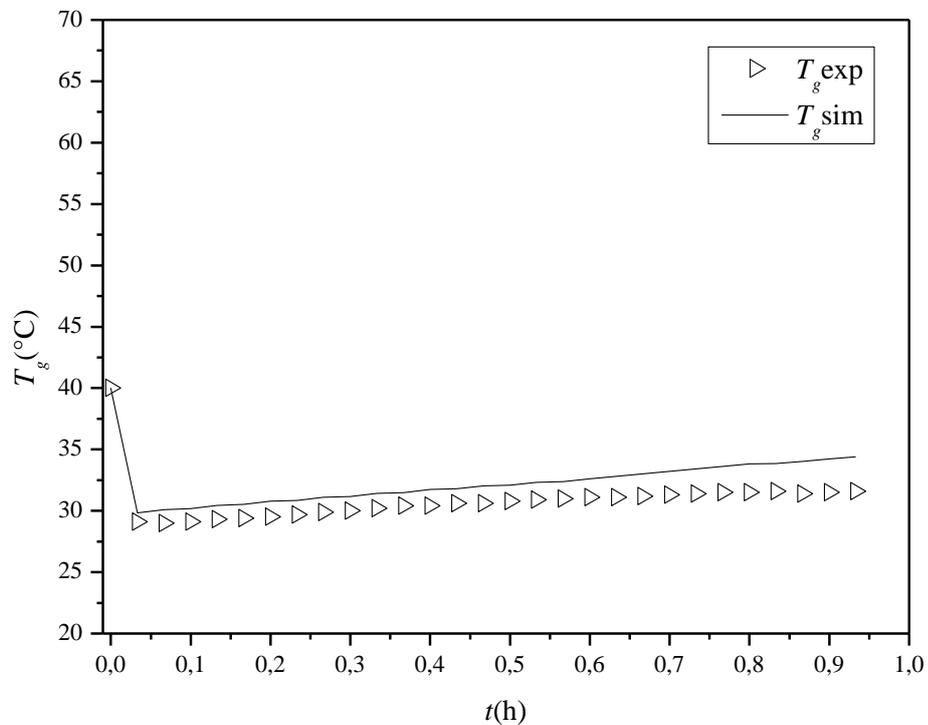
Fonte: Autor, 2016.

Figura D8 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_R em função do tempo de secagem em um dos ensaios na condição de 50°C e $1,2 U_{mf}$.



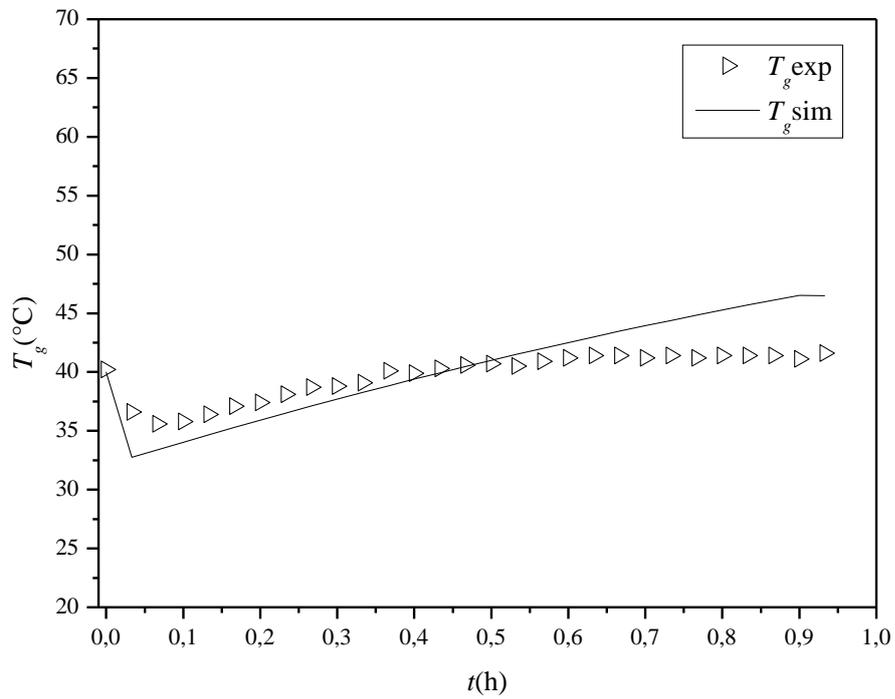
Fonte: Autor, 2016.

Figura D9 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a T_g em função do tempo de secagem na condição de 40°C e $1,3 U_{mf}$.



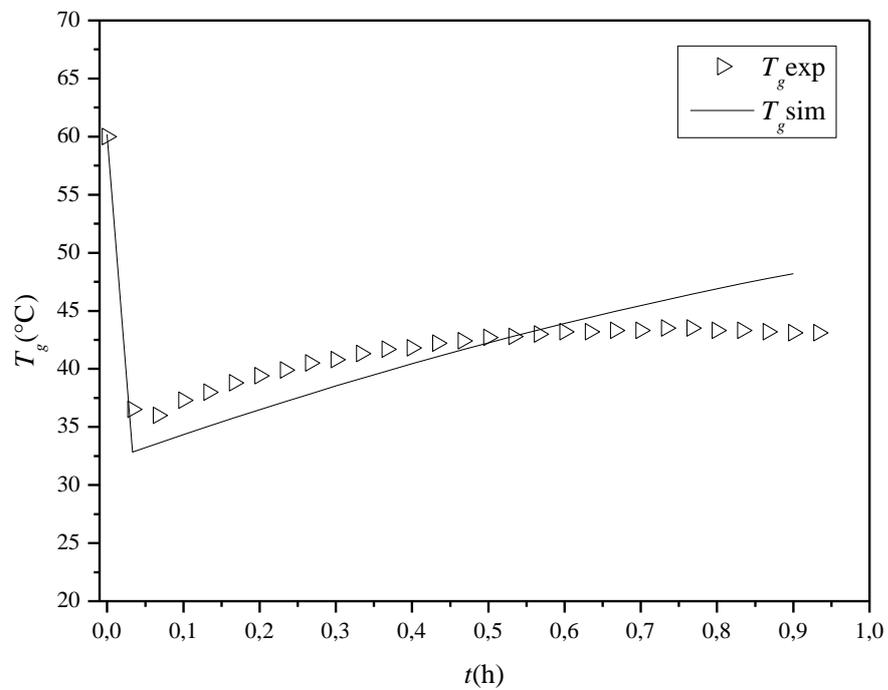
Fonte: Autor, 2016.

Figura D10 - Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a T_g em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,1 U_{mf}$.



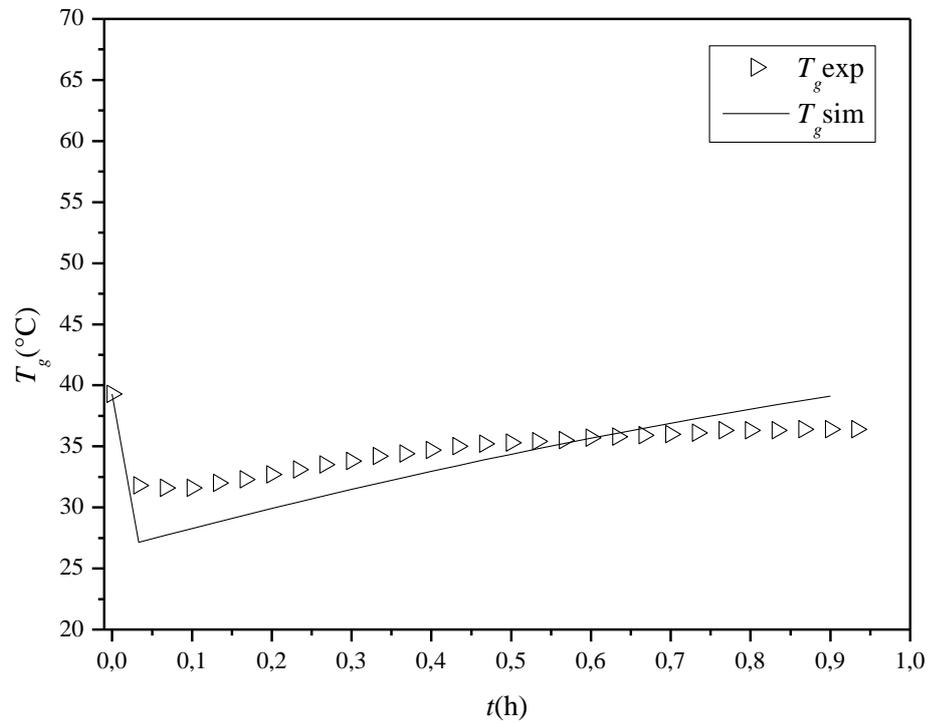
Fonte: Autor, 2016.

Figura D11 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a T_g em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,3 U_{mf}$.



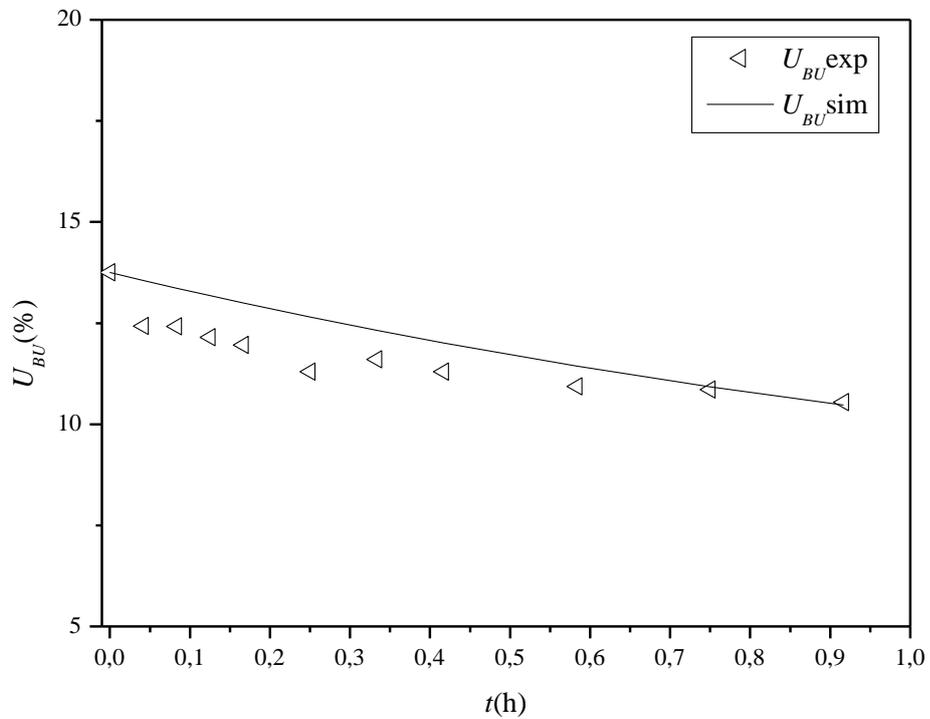
Fonte: Autor, 2016.

Figura D12 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a T_g em função do tempo de secagem em um dos ensaios na condição de 50°C e 1,2 U_{mf} .



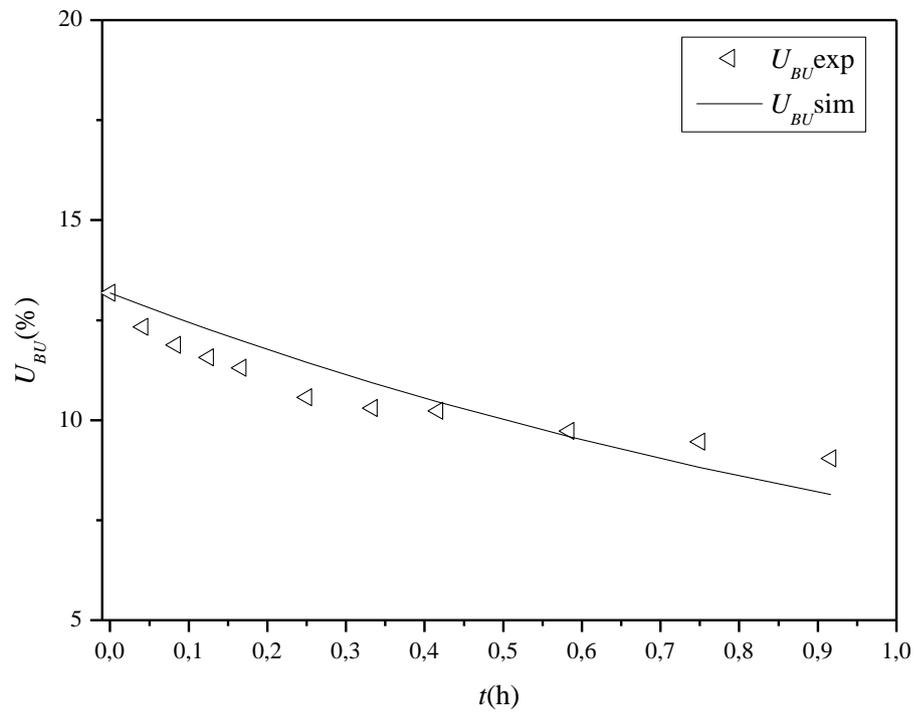
Fonte: Autor, 2016.

Figura D13 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BU} em função do tempo de secagem na condição de 40°C e 1,3 U_{mf} .



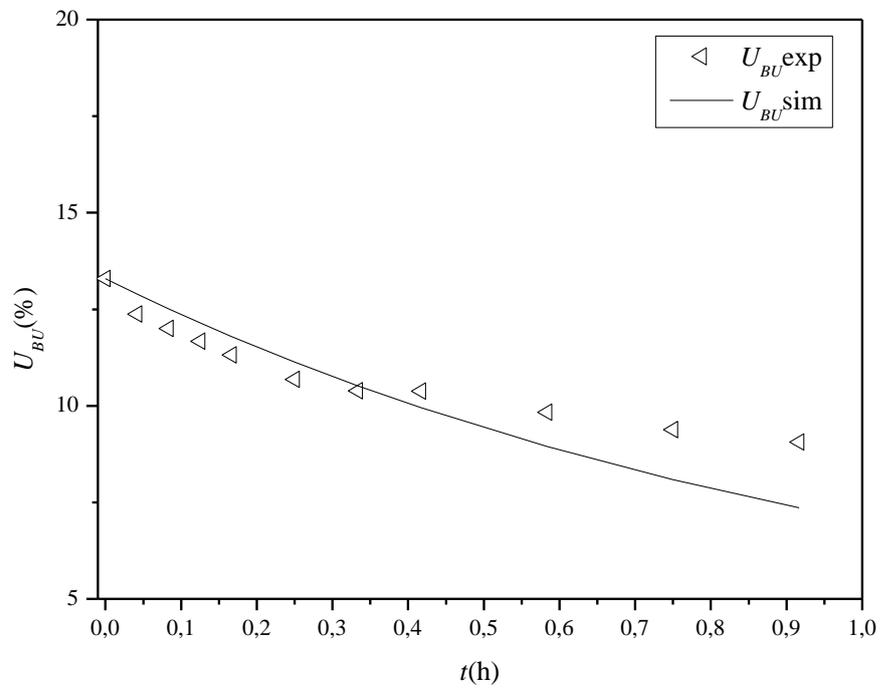
Fonte: Autor, 2016.

Figura D14 - Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BU} em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,1 U_{mf}$.



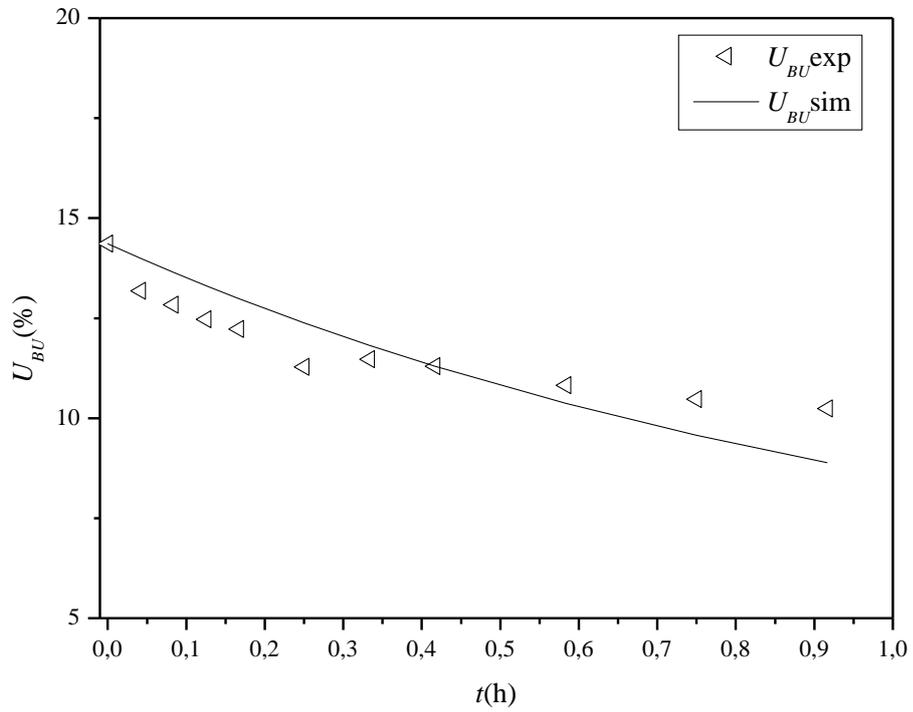
Fonte: Autor, 2016.

Figura D15 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BU} em função do tempo de secagem na condição de 60°C e $1,3 U_{mf}$.



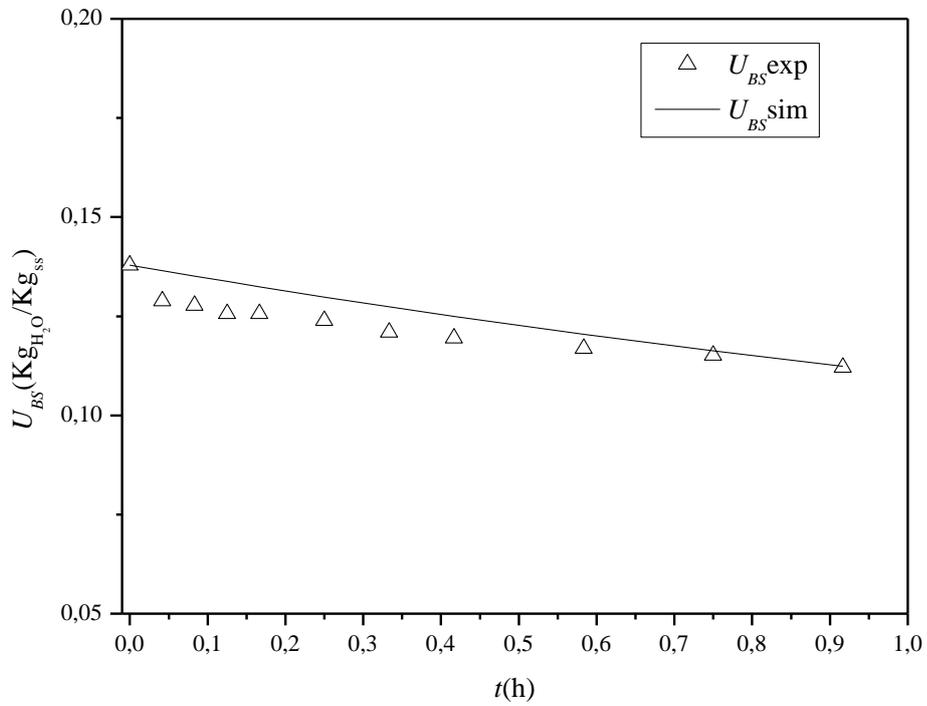
Fonte: Autor, 2016.

Figura D16 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BU} em função do tempo de secagem em um dos ensaios na condição de 50°C e $1,2 U_{mf}$.



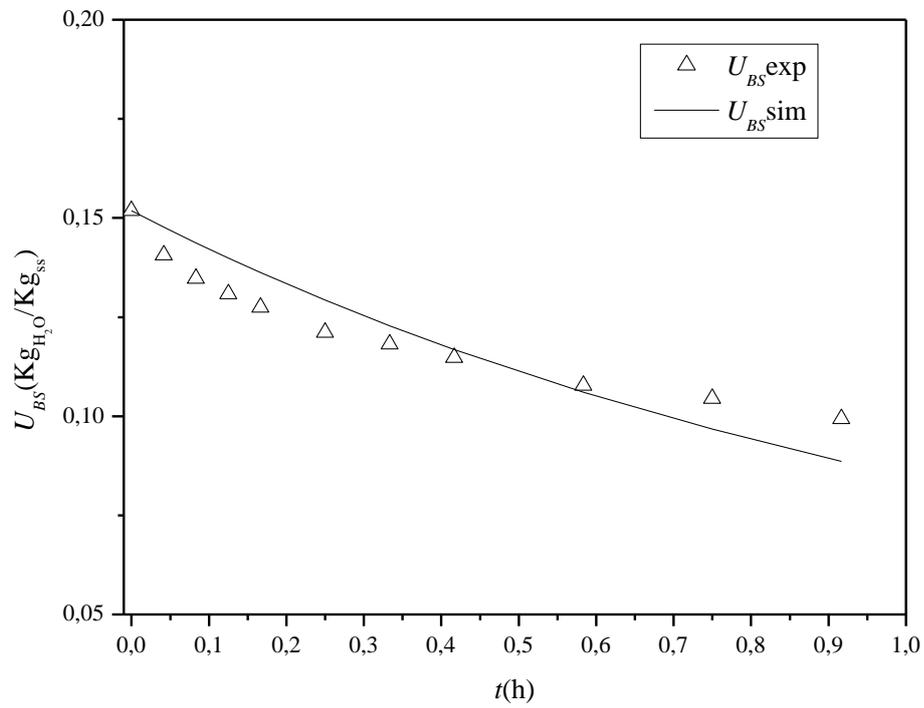
Fonte: Autor, 2016.

Figura D17 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BS} em função do tempo de secagem na condição de 40°C e $1,1 U_{mf}$.



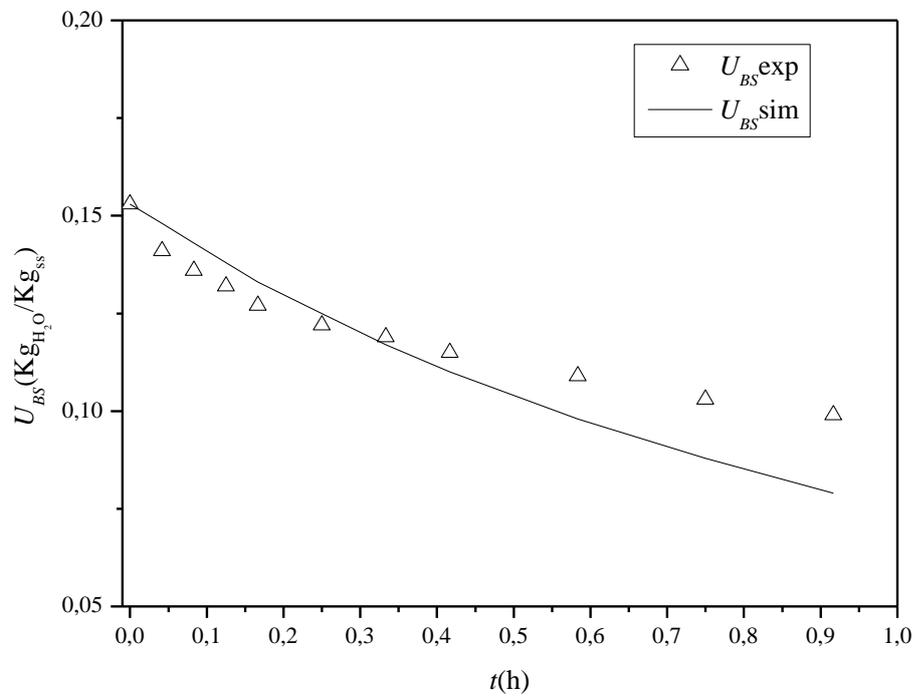
Fonte: Autor, 2016.

Figura D18 - Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BS} em função do tempo de secagem na condição de 60°C e 1,1 U_{mf} .



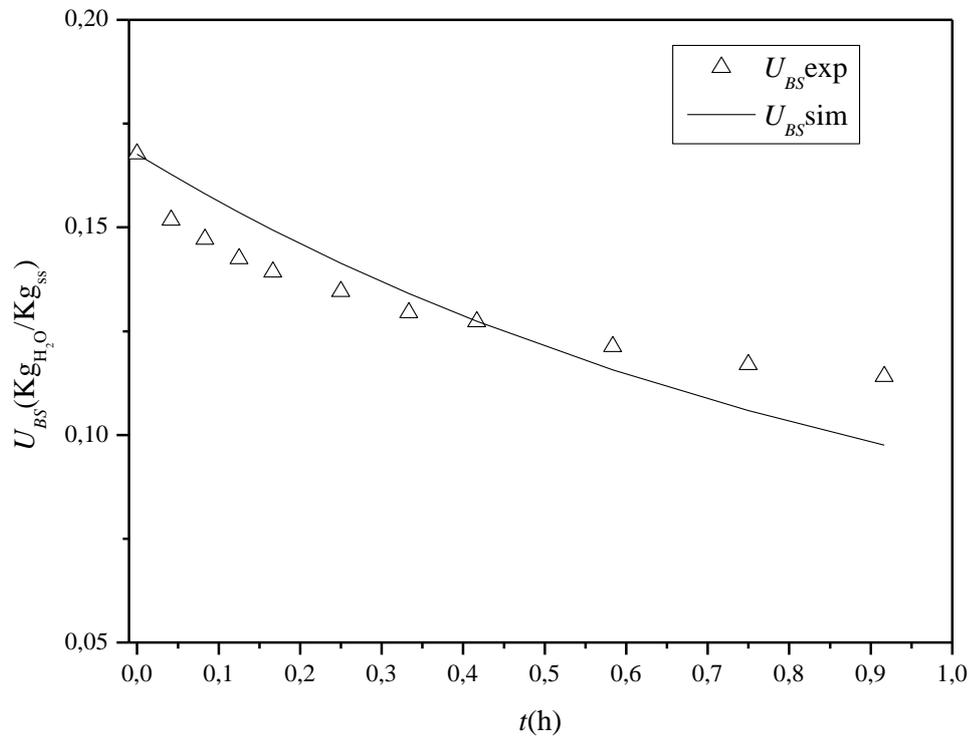
Fonte: Autor, 2016.

Figura D19 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BS} em função do tempo de secagem na condição de 60°C e 1,3 U_{mf} .



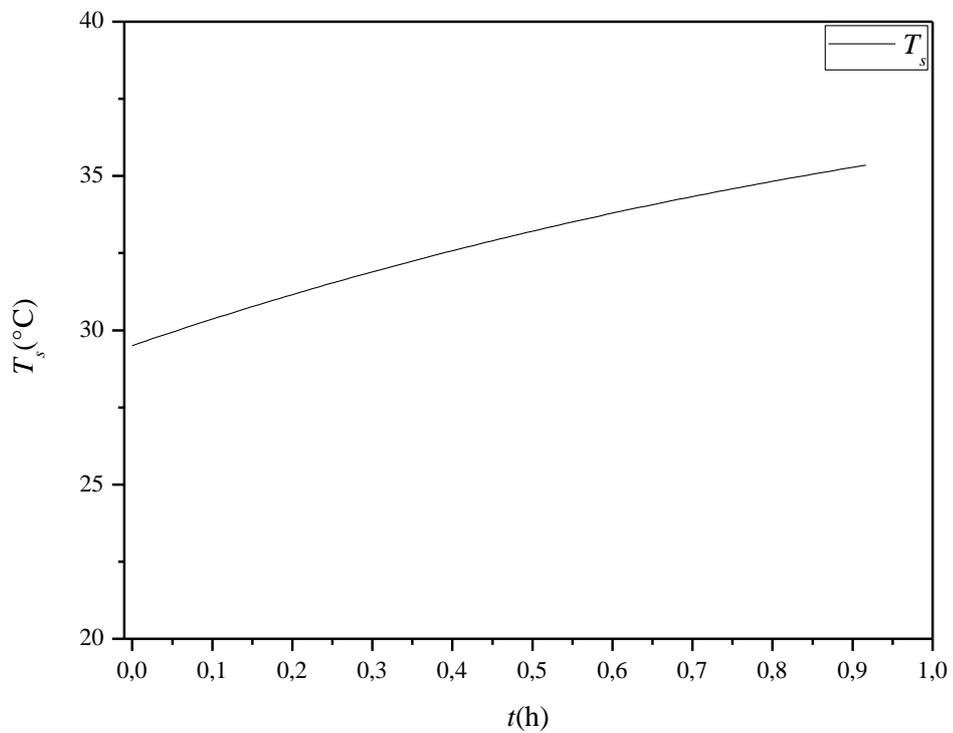
Fonte: Autor, 2016.

Figura D20 – Ajustes do modelo em relação aos dados experimentais, com relação a U_{BS} em função do tempo de secagem em um dos ensaios na condição de 50°C e $1,2 U_{mf}$.



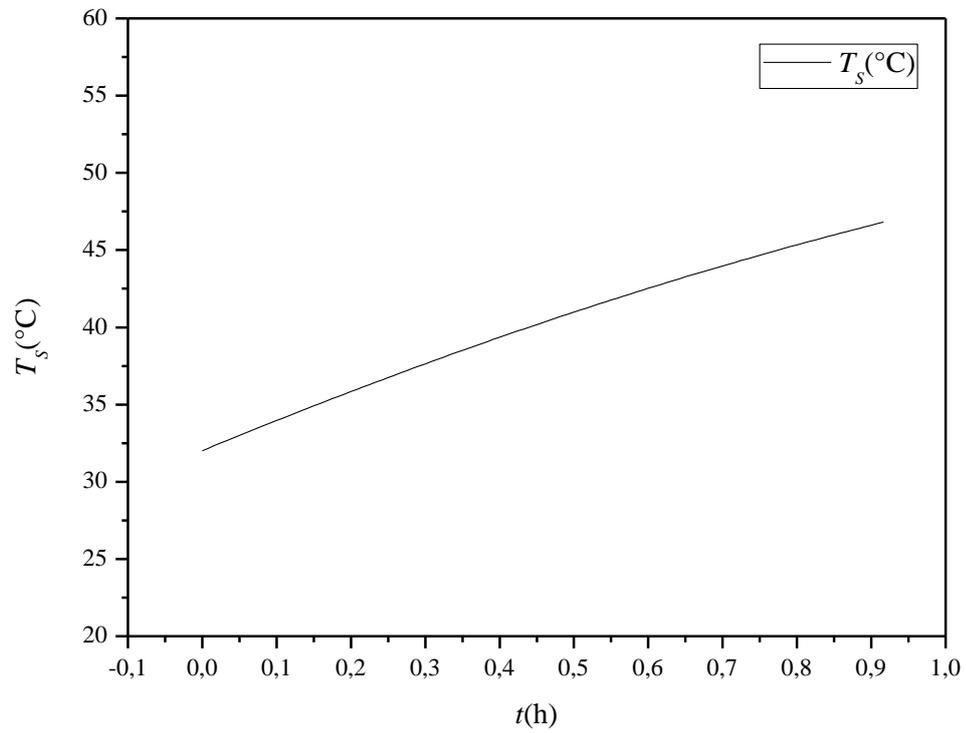
Fonte: Autor, 2016.

D21 – Temperatura das sementes durante a secagem nas condições de 40°C e $1,3 U_{mf}$



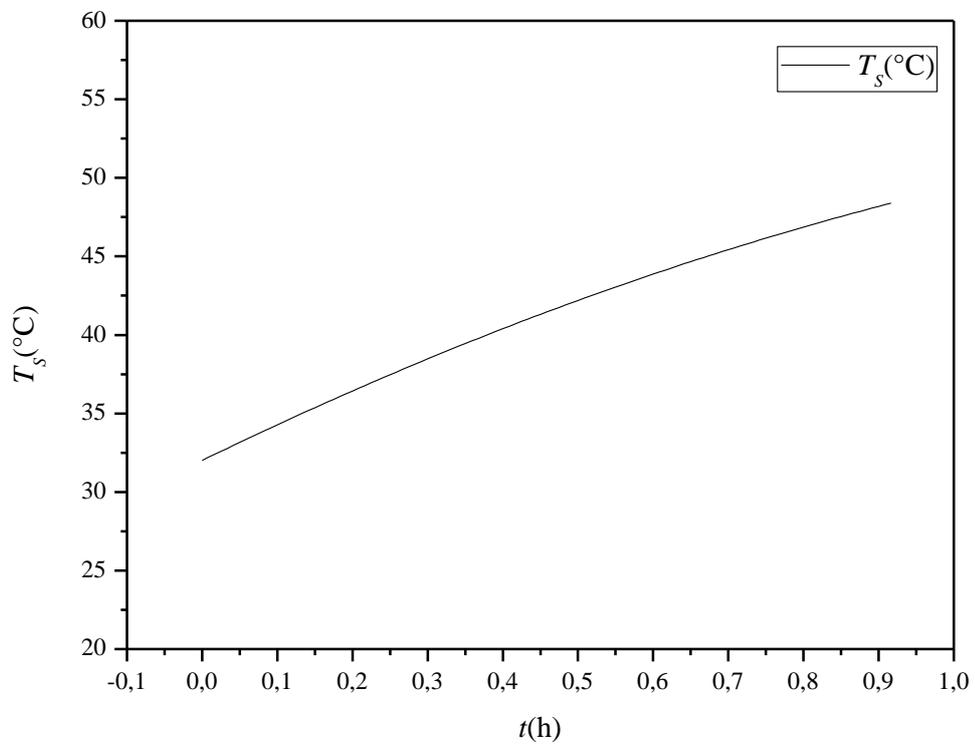
Fonte: Autor, 2016.

D22 –Temperatura das sementes durante a secagem nas condições de 60°C e 1,1 U_{mf}



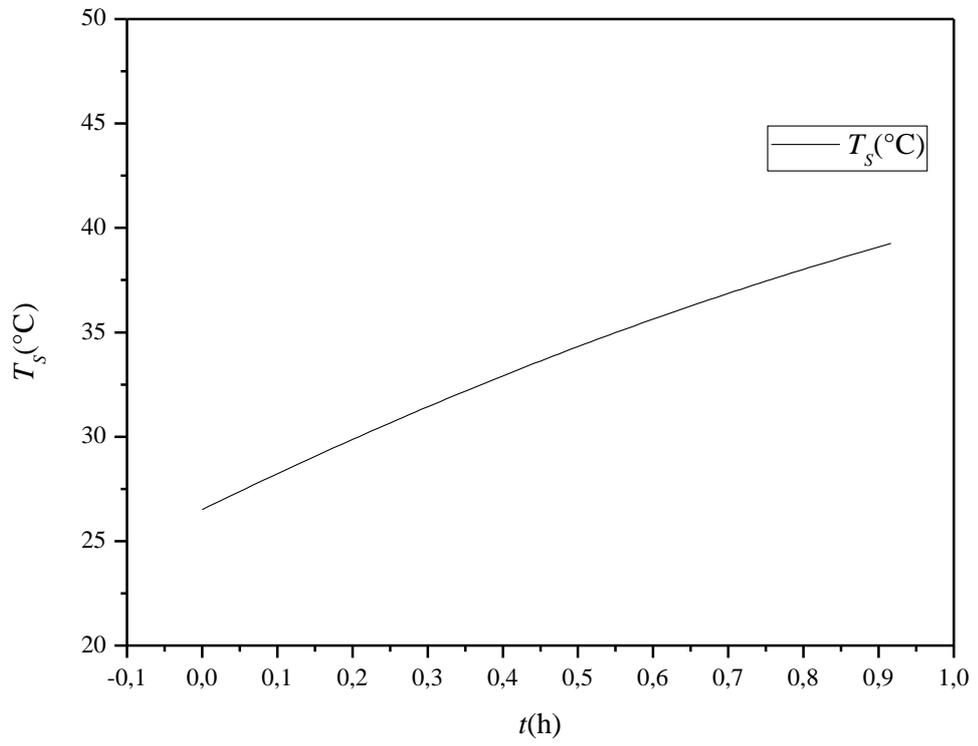
Fonte: Autor, 2016.

D23 –Temperatura das sementes durante a secagem nas condições de 60°C e 1,3 U_{mf}



Fonte: Autor, 2016.

D24 –Temperatura das sementes durante a secagem nas condições de 50°C e $1,2U_{mf}$



Fonte: Autor, 2016.

APENDICE E

Tabela E1 – Comparação de valores entre T_g , T_s e U_R na análise de sensibilidade paramétrica com variação de $\frac{1}{4} C_{pss}$ (107 J/kg.K) até $2C_{pss}$ (856 J/kg.K).

$U_R(\%)_{(1/4C_{pss})}$	$U_R(\%)_{(2C_{pss})}$	$T_g(^{\circ}C)_{(1/4C_{pss})}$	$T_g(^{\circ}C)_{(2C_{pss})}$	$T_s(^{\circ}C)_{(1/4C_{pss})}$	$T_s(^{\circ}C)_{(2C_{pss})}$
34,65565	34,65565	40	40	29,5	29,5
61,85833	62,05254	29,63442	29,57997	29,61135	29,55676
61,49216	61,8632	29,73708	29,63252	29,71424	29,60943
61,13165	61,6756	29,83892	29,68485	29,81631	29,66188
60,77633	61,48933	29,93992	29,73696	29,91754	29,71411
60,42612	61,30438	30,0401	29,78885	30,01795	29,76612
60,08099	61,12079	30,13946	29,84053	30,11754	29,81791
59,74092	60,93864	30,23801	29,89199	30,21631	29,86949
59,40574	60,75787	30,33577	29,94324	30,31429	29,92086
59,07539	60,57847	30,43272	29,99427	30,41147	29,972
58,74981	60,40041	30,52888	30,04508	30,50785	30,02294
58,42892	60,22369	30,62424	30,09569	30,60343	30,07365
58,11267	60,04831	30,71881	30,14607	30,69821	30,12416
57,80099	59,87425	30,81257	30,19624	30,79219	30,17444
57,49382	59,70151	30,90554	30,2462	30,88537	30,22452
57,1911	59,53007	30,99771	30,29595	30,97775	30,27437
56,89278	59,35992	31,08908	30,34547	31,06933	30,32401
56,59881	59,19107	31,17965	30,39479	31,16011	30,37344
56,30908	59,02348	31,26943	30,44389	31,25009	30,42265
56,02344	58,85714	31,35846	30,49278	31,33932	30,47165
55,74184	58,69204	31,44673	30,54145	31,42779	30,52044
55,46421	58,52817	31,53424	30,58992	31,51551	30,56902
55,19052	58,36553	31,62101	30,63818	31,60247	30,61739
54,92071	58,2041	31,70701	30,68623	31,68867	30,66555
54,65474	58,04388	31,79226	30,73407	31,77411	30,7135
54,39255	57,88486	31,87676	30,7817	31,8588	30,76124
54,1341	57,72702	31,9605	30,82912	31,94273	30,80877
53,87935	57,57038	32,04348	30,87634	32,02591	30,85609
53,62827	57,4149	32,1257	30,92333	32,10832	30,9032
53,38076	57,2606	32,20718	30,97013	32,18998	30,95009
53,13668	57,10743	32,28795	31,01671	32,27094	30,99679
52,89599	56,95539	32,3680	31,06309	32,35117	31,04327
52,65865	56,80449	32,44735	31,10927	32,4307	31,08956
52,42461	56,6547	32,52599	31,15524	32,50952	31,13563
52,19385	56,50602	32,60391	31,20101	32,58762	31,18151
51,96631	56,35844	32,68112	31,24657	32,66501	31,22717
51,74197	56,21196	32,75763	31,29193	32,74169	31,27264
51,52079	56,06657	32,83342	31,33709	32,81766	31,31789
51,30273	55,92226	32,90851	31,38204	32,89291	31,36295
51,08778	55,77902	32,98287	31,42678	32,96745	31,40779
50,87585	55,63686	33,05654	31,47132	33,04128	31,45244
50,66681	55,49573	33,12954	31,51566	33,11445	31,49688

50,46063	55,35564	33,20187	31,55981	33,18695	31,54112
50,25727	55,21658	33,27354	31,60375	33,25878	31,58517
50,05671	55,07854	33,34455	31,6475	33,32995	31,62901
49,85891	54,94151	33,41489	31,69104	33,40046	31,67266
49,66385	54,8055	33,48457	31,73439	33,47029	31,71611
49,47149	54,67049	33,55358	31,77754	33,53947	31,75935
49,28181	54,53647	33,62193	31,82049	33,60797	31,8024
49,09478	54,40345	33,68962	31,86324	33,67581	31,84525
48,91039	54,27141	33,75663	31,90579	33,74298	31,8879
48,72858	54,14034	33,82298	31,94814	33,80948	31,93035
48,5492	54,01023	33,88872	31,9903	33,87537	31,9726
48,37225	53,88107	33,95384	32,03227	33,94064	32,01467
48,19769	53,75284	34,01835	32,07404	34,00529	32,05654
48,0255	53,62555	34,08223	32,11563	34,06933	32,09821
47,85565	53,49919	34,1455	32,15701	34,13274	32,1397
47,68813	53,37376	34,20815	32,19821	34,19553	32,18099
47,52291	53,24924	34,27018	32,23921	34,2577	32,22208
47,35997	53,12563	34,33159	32,28002	34,31926	32,26299
47,19928	53,00294	34,39239	32,32064	34,38019	32,3037
47,04086	52,88114	34,45256	32,36106	34,4405	32,34421
46,88462	52,76024	34,51212	32,40129	34,5002	32,38454
46,73046	52,64021	34,57111	32,44134	34,55932	32,42467
46,57835	52,52105	34,62953	32,4812	34,61788	32,46462
46,42828	52,40275	34,68738	32,52087	34,67585	32,50438
46,28022	52,2853	34,74465	32,56035	34,73326	32,54396
46,13417	52,16871	34,80136	32,59965	34,7901	32,58334
45,99009	52,05296	34,85749	32,63876	34,84636	32,62255
45,84798	51,93805	34,91305	32,67769	34,90205	32,66156
45,70781	51,82398	34,96804	32,71642	34,95716	32,70039
45,56958	51,71074	35,02246	32,75498	35,01171	32,73903
45,43327	51,59833	35,0763	32,79334	35,06567	32,77748
45,29885	51,48674	35,12958	32,83152	35,11907	32,81574
45,16618	51,37595	35,18233	32,86951	35,17194	32,85383
45,03527	51,26595	35,23455	32,90733	35,22428	32,89173
44,90609	51,15674	35,28625	32,94497	35,2761	32,92945
44,77864	51,04832	35,33743	32,98243	35,32739	32,967
44,65289	50,94067	35,38807	33,0197	35,37816	33,00436
44,52884	50,8338	35,4382	33,0568	35,4284	33,04154
44,40647	50,7277	35,4878	33,09371	35,47811	33,07854
44,28576	50,62237	35,53687	33,13045	35,52729	33,11536
44,16671	50,5178	35,58542	33,16701	35,57595	33,152
44,04932	50,41399	35,63343	33,20338	35,62407	33,18846
43,93354	50,31094	35,68093	33,23958	35,67168	33,22474
43,81926	50,20861	35,72794	33,2756	35,7188	33,26084
43,70648	50,10702	35,77447	33,31145	35,76544	33,29677
43,59519	50,00614	35,82053	33,34712	35,8116	33,33253
43,48537	49,90599	35,8661	33,38262	35,85728	33,36811
43,37701	49,80655	35,91119	33,41795	35,90247	33,40351

43,2701	49,70782	35,9558	33,4531	35,94719	33,43875
43,16464	49,6098	35,99993	33,48808	35,99142	33,47381
43,0606	49,51248	36,04358	33,52289	36,03517	33,50869
42,95799	49,41587	36,08675	33,55752	36,07844	33,54341
42,85681	49,31995	36,12943	33,59198	36,12121	33,57794
42,75701	49,22473	36,17164	33,62626	36,16352	33,6123
42,6585	49,13017	36,21341	33,66038	36,20538	33,6465
42,56127	49,03628	36,25474	33,69433	36,24681	33,68053
42,46532	48,94306	36,29563	33,72811	36,28779	33,71439
42,37063	48,85049	36,33609	33,76173	36,32834	33,74808
42,27719	48,75858	36,37611	33,79518	36,36845	33,78161
42,18501	48,66733	36,41569	33,82846	36,40812	33,81497
42,09406	48,57672	36,45483	33,86158	36,44736	33,84816
42,00434	48,48677	36,49354	33,89453	36,48615	33,88118
41,91585	48,39745	36,5318	33,92731	36,52451	33,91404
41,82858	48,30878	36,56963	33,95992	36,56242	33,94673
41,74249	48,22074	36,60703	33,99237	36,5999	33,97925
41,65754	48,13331	36,64402	34,02466	36,63698	34,01161
41,57372	48,04651	36,6806	34,05678	36,67365	34,04381
41,49101	47,96032	36,71678	34,08874	36,7099	34,07584
41,40941	47,87474	36,75254	34,12054	36,74575	34,10772

Fonte: Autor, 2015.