



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE
TREVO VESICULOSO EM SECADOR TIPO LEITO FLUIDIZADO**

SABRINA BRESOLIN

PROF. Dr. TONI JEFFERSON LOPES

Orientador

PROF. Dr. ANDRÉ RICARDO FELKL DE ALMEIDA

Coorientador

PROF. Dr. CARLOS ALBERTO SEVERO FELIPE

Coorientador

RIO GRANDE - RS

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SEMENTES DE
TREVO VESICULOSO EM SECADOR TIPO LEITO FLUIDIZADO**

SABRINA BRESOLIN

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal do Rio Grande como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química.

PROF. Dr. TONI JEFFERSON LOPES

Orientador

PROF. Dr. ANDRÉ RICARDO FELKL DE ALMEIDA

Coorientador

PROF. Dr. CARLOS ALBERTO SEVERO FELIPE

Coorientador

RIO GRANDE - RS

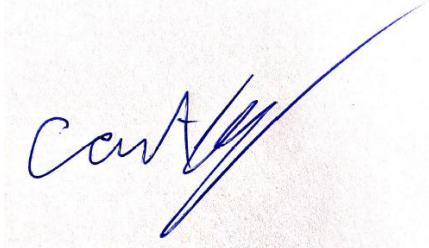
2020

APROVAÇÃO

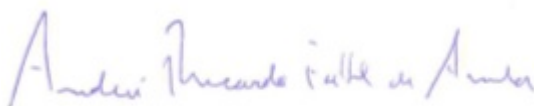
Dissertação defendida por Sabrina Bresolin e aprovada em 29 de junho de 2020, pela Comissão Examinadora constituída pelos doutores:



Dr. Toni Jefferson Lopes – FURG



Dr. Carlos Alberto Severo Felipe – FURG



Dr. André Ricardo Felkl – UNIPAMPA



Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto – FURG



Dr. João Carlos Pinto Oliveira – EMBRAPA

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jacinta e Jovenio Bresolin, por sempre apoiarem as minhas escolhas, pela luta para que eu pudesse aproveitar essa oportunidade e ter a formação que eles não tiveram. Sou eternamente grata por todo o esforço, educação, amor e dedicação, pois todas as minhas conquistas são deles também. A minha família, em especial aos meus nonos, Segundo e Maria Luiza Bonet, pelo carinho e preocupação.

À minha irmã, Sidônia Bresolin, pelo companheirismo, amor e suporte de todas as horas. Tu é meu maior orgulho e inspiração sempre.

À minha namorada, Júlia Portinho, pelo carinho, amor, paciência e companheirismo em todas as horas, mas principalmente nos momentos mais difíceis. Obrigada por trazer mais leveza ao meu dia-a-dia e ajudar no meu crescimento pessoal.

Ao Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida, pela oportunidade desde a graduação de iniciar em projetos de pesquisa, pela orientação e incentivo neste e todos os trabalhos que realizamos. Obrigada por aceitar esse desafio, pela dedicação, paciência e suporte no desenvolvimento deste trabalho. És um exemplo a ser seguido de excelente profissional.

Ao Prof. Dr. Toni Jefferson Lopes, pela orientação, esforço e paciência. Obrigada pelos conselhos, suporte e disponibilidade para conversar e compartilhar seu conhecimento com educação e humildade.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Felipe, pela orientação e amizade, por ter possibilitado essa parceria e pelas sugestões contribuídas.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Luiz Antonio de Almeida Pinto e João Carlos Pinto de Oliveira por todas as contribuições pertinentes de dois especialistas nos assuntos que envolvem este trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios da engenharia química da Unipampa, Cecília, Cibebe, Anderson, Aline e Ricardo pelo suporte e ajuda durante todos os experimentos.

À minha amiga, Maiara de Oliveira, por tudo que representa na minha vida, por se fazer presente sempre mesmo longe. Por sempre ter me encorajado e acreditado no meu potencial.

Ao meu amigo, Mauricio Zarnott, pela amizade, por toda a contribuição e por nunca medir esforços em ajudar. Obrigada, principalmente, pelas conversas nos momentos mais difíceis.

Aos amigos, Egon e Rafaela Vivian, pela confiança, amizade e ajuda em todos os momentos. Pela experiência incrível que foi o Mão Preta, que me trouxe uma evolução pessoal imensurável, amizades maravilhosas e um ambiente de energia leve que foi motivo de refúgio emocional durante esse mestrado.

Às minhas amigas Bia, Leti, Selena e Maia pela amizade sincera, suporte de sempre, pela troca de ideias, risadas, lágrimas, abraços, por tantos anos de *Make Love*. Sem a força de vocês eu jamais teria conseguido. Vocês são maravilhosas.

Às amigas que o mestrado me deu Vanessa, Sherlen, Amanda e Márcia, por toda a ajuda, por me proporcionarem momentos perfeitos nos nossos encontros no Cassino, nos nossos churrascos e aulas. Vocês são divertidíssimas e tornaram essa jornada muito agradável.

À minha amiga Paolla que foi a melhor companhia que eu tive durante muitas tardes, proporcionando as melhores conversas e os melhores mates. Agradeço ao destino por ter me agraciado com a tua presença em minha vida.

À minha amiga Ethielle que foi um presente da graduação e por tantos anos firma uma amizade verdadeira e tão especial.

Ao meu amigo de longa data Cristian da Luz por sempre acreditar em mim e pela amizade sincera de mais de dez anos.

Aos amigos que tenho no SOS caixeral, por todos os momentos de lazer, viagens, adrenalina e felicidade durante esses dois anos. Em especial à Querlen que foi um presente da vida, a pessoa mais parceira que eu poderia conhecer, fundamental nos momentos de conversas e descontração. Espero que possamos manter essa amizade para sempre.

À minha amiga Leilane por ser tão incrível, alto astral, contagiante, pelo apoio fornecido e amizade sincera de anos.

À Capes pelo apoio financeiro.

À Deus e todos que direta ou indiretamente emanam boas energias em tudo o que eu faço.

RESUMO

As espécies forrageiras desempenham um papel importante na atividade pecuária, representando o maior recurso utilizado para a produção de bovinos de corte. Neste sentido, há a necessidade cada vez maior do uso de espécies adaptadas em diferentes condições de clima e solo. O trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) é uma leguminosa forrageira que se destaca por sua versatilidade de adaptação e resistência ao frio, elevado valor nutritivo e produção de forragem. As sementes de trevo devem apresentar padrão de qualidade similar ao exigido para sementes e faz-se necessária uma fase de beneficiamento adequada. Nas etapas de beneficiamento, a secagem é considerada a etapa limitante devido ao fato de a mesma envolver a remoção da umidade das sementes através da transferência simultânea de calor e de massa. Nesse sentido, a secagem tem em sua essência a finalidade de assegurar a conservação do produto por meio da redução da sua atividade de água. Nos materiais orgânicos, como é o caso do trevo vesiculoso, a redução no teor de água livre deve ser efetuada de forma eficiente para inibir o desenvolvimento microbiano. O emprego de um secador de leito fluidizado para a secagem de sementes está relacionado com eficiente contato entre o material e o fluido, proporcionando altas taxas de transferência de calor e de massa, bem como redução no tempo de secagem pela rapidez na remoção de umidade. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem de sementes de trevo vesiculoso em leito fluidizado. Foram utilizadas neste estudo sementes de trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), que foram devidamente caracterizadas quanto suas dimensões, massa específica, porosidade, umidades iniciais e isotermas de dessorção. Além disso, as sementes passaram por um processo de reumidificação, aumentando sua umidade inicial para aplicação em ensaios de secagens e isotermas. O estudo da cinética de secagem foi realizado em secador de leito fluidizado com geometria retangular. A análise da fluidodinâmica do sistema foi realizada para a determinação das condições operacionais do equipamento. A partir dos resultados, os experimentos de secagem foram conduzidos nas temperaturas de 40, 50 e 60°C e velocidades do ar de 10, 20 e 30% acima da velocidade de mínima fluidização. A esses dados foram ajustados os modelos cinéticos da Lei de Fick, Page, Henderson e Midilli para a estimativa de parâmetros da secagem. Outro tipo de estudo realizado foi a simulação dos dados experimentais de secagem através de um modelo global dos fenômenos da transferência de calor e da massa. Os resultados do estudo de secagem ficaram na faixa de 7 a 8 % em relação a umidade final em base úmida. No que se refere a germinação os valores encontrados ficaram na ordem de 75 a 78 % para as amostras secas artificialmente. Para estas duas respostas, a temperatura foi a variável de maior influência. O estudo da simulação apresentou-se eficaz para a secagem das sementes de trevo em leito fluidizado, onde concluiu-se que o K_p cresce com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem.

Palavras-chaves: Leito de fluidizado. Reumidificação. Trevo vesiculoso. Secagem.

ABSTRACT

Forage species play an important role in livestock activity, representing the largest resource used for beef cattle production. In order to supply the demand of this pasture there is an increasing need of species that adapt to different soil and weather conditions. Vesicular clover (*Trifolium vesiculosum*) is a forage legume that stands out for its versatility of adaptation and resistance to cold, high nutritional value and forage production. Clover seeds must have a similar quality standard to that required for seeds and an appropriate beneficiation phase is required. In the processing steps, drying is considered a limiting step due to the fact that it involves the removal of moisture from the seeds through the simultaneous heat and mass transfer. Thus, drying has the purpose of ensuring the product's conservation by reducing its water activity. In organic materials, like Vesicular clover (*Trifolium vesiculosum*), the reduction in the free water content should be sufficiently high to inhibit microbial development. The use of a fluidized bed dryer for the seeds drying is associated to efficient contact between the material and the fluid, providing high rates of heat and mass transfer, as well as reduction in drying time due to the fast removal of moisture. Considering the above, this paper aims to study the drying process of Vesicular clover (*Trifolium vesiculosum*) seeds in a fluidized bed. The Vesicular clover (*Trifolium vesiculosum*) seeds used in this study were properly characterized as their size, specific mass, porosity, initial moisture and desorption isotherms content. In addition, the seeds went through a rehumidification process, increasing their initial moisture content for application in drying tests. The drying kinetics study was performed in rectangular geometry fluid bed dryer. Preliminary tests were held to establish the operating conditions of the equipment (temperature and air flow). According to these results, the drying experiments were handled at the temperatures of 40, 50 and 60° C and air velocities 10, 20 and 30% above the minimum fluidization rate. Kinetic models (Fick's Law, Page, Henderson and Midilli) were fitted to the experimental data. Regarding the final moisture on a wet basis, the drying study results were in the range of 7 to 8%. In relation to the germination of the dried seeds, the results found were on the scope of 75% to 78%. In order to reach these resolutions, temperature was the variable with greatest influence. In conclusion, the simulation study was effective for drying clover seeds in a fluidized bed, in which was shown that K_p grows with the increase of temperature and speed of the drying air.

Keywords: Fluidized bed. Rehumidification. Vesicular Clover. Drying.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Matriz do planejamento fatorial 2^2 com duplicata no ponto central.....	37
Tabela 5.1 – Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de trevo.....	41
Tabela 5.2 – Umidade inicial e final em base úmida, vigor, germinação e a germinação total das sementes de trevo no processo de reumidificação.....	42
Tabela 5.3 – Parâmetros calculados a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, Oswin, Peleg e Henderson em diferentes temperaturas.....	43
Tabela 5.4 – Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos no leito fluidizado.....	48
Tabela 5.5 – Parâmetros de ajuste e difusividades efetiva para cada condição de secagem analisada pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empriricos de Page, de Henderson e de Midilli.....	49
Tabela 5.6 – Germinação das sementes de trevo com suas respectivas umidades final.....	52
Tabela 5.7 – Resultados de K_p em comparação com a germinação para cada condição de secagem.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sementes de trevo vesiculoso	19
Figura 3.2 – Planta de trevo vesiculoso	19
Figura 3.3 – Curva típica de secagem; teor de umidade em função do tempo.....	21
Figura 3.4 – Curva de taxa de secagem típica em função do teor de umidade	21
Figura 3.5 – Queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido	27
Figura 3.6 – Classificação Geldart para a fluidização de partículas no ar em condições ambientes.....	28
Figura 4.1 – Esquema da unidade experimental cartesiano.	32
Figura 5. 1 – Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas das sementes de trevo.....	42
Figura 5. 2 – Umidade de equilíbrio em função da atividade de água das sementes de trevo ajustadas ao modelo de BET	45
Figura 5. 3 – Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 40°C	46
Figura 5. 4 – Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 50°C	47
Figura 5. 5 – Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 60°C	47
Figura 5. 6 – Curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo de Page.....	51
Figura 5. 7 – Resultados experimentais e simulados para a U_A em função do t	53
Figura 5. 8 – Resultados experimentais e simulados para a U_R em função do t	54
Figura 5. 9 – Resultados experimentais e simulados para a T_g em função do t	54
Figura 5. 10 – Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} em função do t	55
Figura 5. 11 – Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} em função do t	55
Figura 5. 12 – Resultados simulados para a T_s em função do t	56
Figura 5. 13 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_g	58
Figura 5. 14 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_s	58
Figura 5. 15 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_R	59
Figura 5. 16 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_A	59
Figura 5. 17 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BU}	60
Figura 5. 18 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BS}	60
Figura 5. 19 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_g	61
Figura 5. 20 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_s	61
Figura 5. 21 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_R	62
Figura 5. 22 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_A	62
Figura 5. 23 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BU}	63
Figura 5. 24 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BS}	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Modelos matemáticos para avaliar curvas de cinética de secagem.....	22
Quadro 3.2 – Modelos matemáticos mais utilizados para avaliar curvas de isothermas de sementes	24
Quadro 3.3 – Referências de isothermas de sorção.....	25
Quadro 3.4 – Modelos matemáticos utilizados em leite fluidizado	29

NOMENCLATURA

Símbolo	Variável	Dimensão
a, b, c	Eixos do elipsoide escaleno	[L]
a_r	Área da partícula	[L ²]
a_w	Atividade da água	[]
C_{pg}	Calor específico do gás	[LT ⁻² θ ⁻¹]
C_{ps}	Calor específico do sólido	[LT ⁻² θ ⁻¹]
C_{pv}	Calor específico de vapor	[LT ⁻² θ ⁻¹]
D	Distância do centro até o limite da pirâmide	[L]
d_e	Diâmetro equivalente	[L]
D_{ef}	Difusividade efetiva	[L ² T ⁻¹]
$\bar{d}_{pi}$	Média das aberturas das peneiras	[]
d_m	Diâmetro médio das partícula	[L]
d_s	Diâmetro médio de <i>Sauter</i>	[L]
F	Taxa de transferência de massa	[MT ⁻¹ L ⁻²]
G_g	Fluxo mássico de gás	[ML ⁻² T ⁻¹]
H	Coefficiente global de transferência de calor	[MT ⁻³ θ ⁻¹]
K	Constante de secagem	[T ⁻¹]
k_l, k_0	Coefficientes de secagem	[T ⁻¹]
K_p	Coefficiente global de transferência de massa	[ML ⁻¹ θ ⁻¹]
L_h	Altura do leito	[L]
m_{H_2O}	Massa de água	[M]
m_{ss}	Massa de sólidos secos	[M]
m_{su}	Massa de sólidos úmido	[M]
m_i	Massa retida	[M]
Q	Taxa de transferência de calor	[ML ⁻² T ⁻³]
R	Raio da esfera	[L]
Re	Número de Reynolds	[]
t	Tempo	[T]
T_g	Temperatura do gás	[θ]
$T_{g,t=0}$	Temperatura do gás com tempo igual a zero	[θ]
T_s	Temperatura do sólido	[θ]

U_{BU}	Umidade base úmida	$[MM^{-1}]$
U_{BS}	Umidade base seca	$[MM^{-1}]$
U	Velocidade do gás	$[LT_{-1}]$
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	$[LT_{-1}]$
$V_{elipsoide}$	Volume do elipsoide	$[L^3]$
X	Umidade	$[MM^{-1}]$
X_c	Umidade crítica	$[MM^{-1}]$
X_e	Umidade de equilíbrio	$[MM^{-1}]$
x_i	Fração ponderal retida	$[M]$
X_0	Umidade inicial no tempo zero	$[MM^{-1}]$
X_l	Umidade no tempo final	$[MM^{-1}]$
X_m	Umidade na monocamada	$[MM^{-1}]$
X_t	Umidade no tempo t	$[MM^{-1}]$
X_{t0}	Umidade no tempo zero	$[MM^{-1}]$
Y_{eq}	Fração mássica no equilíbrio	$[MM^{-1}]$
Y_g	Fração mássica do gás	$[MM^{-1}]$
Y_s	Fração mássica de água no sólido	$[MM^{-1}]$
$Y_{g,L=0}$	Fração mássica do vapor d'água na entrada do leito	$[MM^{-1}]$
ρ_a	Massa específica do leito	$[ML^{-3}]$
ρ_g	Massa específica do gás	$[ML^{-3}]$
ρ_s	Massa específica do sólido	$[ML^{-3}]$
ρ_{real}	Massa específica real	$[ML^{-3}]$
ΔP	Queda de pressão no leito	$[ML^{-1}T^{-2}]$
ε	Porosidade	$[]$
ε_{mf}	Porosidade da mínima fluidização	$[]$
ε_{parede}	Porosidade da parede do equipamento	$[]$
Λ	Calor latente de vaporização	$[L^2T^{-2}]$
ϕ	Esfericidade	$[]$
θ	Ângulo	$[^\circ]$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVOS GERAIS	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. TREVO VESICULOSO	18
3.2. SECAGEM	19
3.3. ISOTERMAS	24
3.4. SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO	26
3.5. MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. MATERIAL	32
4.2. EQUIPAMENTO DE LEITO FLUIDIZADO	32
4.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
4.3.1. Caracterização física e fisiológica das partículas	33
4.3.2. Estudo da reumidificação	35
4.3.3. Isotermas de dessorção	35
4.3.4. Caracterização do leito fluidizado	36
4.3.5. Secagem	37
4.3.6. Modelo de secagem para sementes de trevo vesiculoso	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1. Caracterização física e fisiológica das sementes	41
5.2. Processo de reumidificação das sementes	42
5.3. Caracterização físico-química das sementes	43
5.4. Caracterização Fluidodinâmica	46
5.5. Secagem das sementes de trevo vesiculoso	48
5.6. Modelo de Secagem para Sementes de Trevo Vesiculoso	52
6. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICES	79

1. INTRODUÇÃO

As pastagens representam a fonte alimentar mais econômica para ruminantes. Cerca de 95% da carne produzida pelo setor pecuário brasileiro provém de regime de pastagens, cuja área total ocupa em torno de 167 milhões de hectares. Além de ser um regime com menor custo de produção, também agrega valores de qualidade apresentando menos riscos associados a produção em regime confinado (ARAÚJO, 2017).

No Rio Grande do Sul, o Bioma Pampa ocupa aproximadamente 63% do território do Estado e possui grande variabilidade de espécies de gramíneas e de leguminosas. Essas espécies forrageiras desempenham um papel importante na atividade pecuária, representando o maior recurso utilizado para a produção de bovinos de corte (COELHO, 2002; IBGE, 2004; OLIVEIRA, 2015). A diversidade do clima gaúcho é conhecida por conter estações bem definidas com a distribuição quase igualitária das quatro estações ao longo do ano. Com isso, se faz necessária a utilização de pastagens que desenvolvam ao longo dos meses do ano, principalmente durante o outono e inverno, já que essas estações são conhecidas como períodos críticos de carência alimentar dos rebanhos, devido à baixa produção de forragem (SILVEIRA et al., 1997). Assim, há a necessidade cada vez maior do uso de espécies adaptadas em diferentes condições de clima e solo (BOLDRINI et al., 2005).

Entre as espécies que apresentam este potencial encontra-se o trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), leguminosa forrageira anual de inverno. A espécie pertence à família botânica Fabácea, e seu uso apresenta grande melhoria em sistemas agropastoris, podendo ser consorciado com gramíneas ou sobressemeado em campos naturais. Essa leguminosa forrageira se destaca por sua versatilidade de adaptação e resistência ao frio, elevado valor nutritivo e produção de forragem (SANTOS, 2002; BEVILAQUA et al., 2011).

As sementes de trevo devem apresentar padrão de qualidade similar ao exigido para sementes em geral, ou seja, faz-se necessária uma fase de beneficiamento adequada, atribuindo as operações unitárias nas quais as sementes são submetidas desde a sua colheita, passando por secagem e armazenamento. Desta forma, a rentabilidade e a qualidade das sementes estão diretamente relacionadas com o ponto de maturação fisiológica, momento ideal de colheita e etapas de beneficiamento (BRASIL, 2012; SILVA, 2007). A secagem de sementes, além de contribuir com a preservação fisiológica durante o armazenamento,

possibilita a antecipação da colheita evitando perdas ocasionadas pela natureza durante o processo produtivo (GARCIA, 2004).

A operação unitária de secagem pode ser definida como um processo que engloba a transferência de calor, onde há a evaporação do composto mais volátil, e a transferência de massa, através da remoção do vapor presente no sólido. O processo se dá entre o produto e o ar aquecido e, quando aplicado às sementes, tem a finalidade de preservação física e química desse material, através da remoção de água livre (SYAHRUL et al., 2002; FREITAS, 2016).

Neste caso, ressalta-se a importância desse estudo quando se trata de material orgânico, visto que, se for realizada de maneira inadequada, pode acarretar perdas fisiológicas do produto final (ALBINI et. al., 2016). Nesse sentido a análise dos fenômenos de transferência de calor e de massa na secagem são importantes, pois permitem verificar quais são os mecanismos envolvidos e também visam fornecer, através de modelos empíricos ou em leis de conservação de massa e de energia, as melhores condições operacionais nos equipamentos (VIEIRA, 2012).

Desta forma, o tipo de secador utilizado tem influência direta no rendimento térmico dessa operação unitária, visto que, as sementes em geral apresentam-se frágeis ao atrito e às altas temperaturas, sendo necessária a utilização de um secador que tenha a propriedade de boa homogeneização. O emprego de um secador de leito fluidizado para a secagem de sementes está relacionado com eficiente contato entre o material e o fluido, proporcionando altas taxas de transferência de calor e de massa, bem como a redução no tempo de secagem pela rapidez na remoção de umidade (FREITAS, 2016).

Entretanto, o equipamento de leito fluidizado apresenta uma complexidade fluidodinâmica muito ampla e de difícil análise, levando ao desenvolvimento de vários estudos experimentais com o intuito do mapeamento das melhores condições. Desse modo, estudos de modelagem e simulação têm se tornado uma ferramenta de fundamental importância para prever o comportamento do processo e contribuir para um projeto mais eficiente, ocasionando uma maior compreensão dos fenômenos de transferência envolvidos na operação de secagem. A utilização de modelos matemáticos na simulação da secagem de sementes é de fundamental importância, pois torna possível a obtenção dos coeficientes de transferência de calor e massa, além da influência das variáveis nesta operação (RIZZI JR. et al., 2009).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho possui por objetivo geral realizar um estudo experimental e da simulação da secagem das sementes de trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) em leito fluidizado, além da caracterização do produto final.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física, físico-química e fisiologicamente as sementes, por meio da determinação da massa específica real e aparente, porosidade do leito, área superficial específica, teor de umidade, diâmetro de partícula, esfericidade, isoterma, ângulo de repouso e germinação;
- Caracterizar a fluidodinâmica do leito fluidizado;
- Analisar o processo de reumidificação das sementes de trevo vesiculoso;
- Analisar experimentalmente a secagem em leito fluidizado em diferentes condições;
- Analisar as características fisiológica e físico-química do produto final;
- Realizar a simulação do processo através de um modelo global de transferência de calor e de massa entre as fases presentes no leito fluidizado;
- Comparar resultados obtidos com a literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

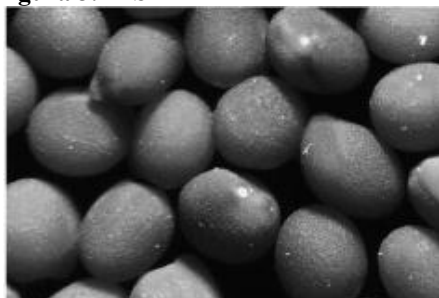
Este capítulo tem como propósito fornecer conceitos importantes sobre morfologia, secagem e simulação do processo de secagem das sementes de trevo vesiculoso.

3.1. TREVO VESICULOSO

O trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) é uma leguminosa forrageira anual de inverno, de origem europeia e mediterrânea (BEVILAQUA et al., 2011). A cultura é originária da Itália, sendo introduzida nos Estados Unidos em 1956, onde no Estado do Alabama foi desenvolvido o cultivar *Yuchi* e no Mississippi a espécie *Meechee*. Segundo Zohary e Heller (1984) a Turquia é o país que apresenta a maior variabilidade de trevos em sua flora natural com mais de 100 espécies catalogadas (OLANDA, 2008; BEVILAQUA et al., 2011).

No Brasil, essa leguminosa foi introduzida no início da década de 1970 e conduzida para experimentação na região sul do Rio Grande do Sul. A EMBRAPA Pecuária-Sul situada em Bagé (RS), iniciou pesquisas com trevo vesiculoso na década de 80, utilizando o cruzamento natural dos cultivares *Yuchi* e *Meechee* (BEVILAQUA et al., 2011).

Morfologicamente a espécie, da família das *Fabáceas*, apresenta variações quanto ao tamanho e à coloração das flores. Possui porte ereto e crescimento do caule que pode atingir 1,20 m de comprimento. As folhas possuem formato afilado na ponta com mácula branca em “V” e bordas levemente serrilhadas. As sementes apresentam coloração marrom-avermelhada, devido à alta concentração de taninos. (HOVELAND, 1967; BALL et al., 2007). As Figuras 3.1 e 3.2 mostram fotografias ilustrativas das sementes e da planta do trevo vesiculoso, respectivamente.

Figura 3.1 - Sementes de trevo vesiculoso

Fonte: Scoppola et al., 2016.

Figura 3.2 - Planta de trevo vesiculoso

Fonte: Bevilaqua et al., 2011.

O trevo vesiculoso destaca-se em relação aos demais trevos por produzir forragem durante períodos mais longos. A espécie resiste bem à seca e apresenta ressemeadura natural persistindo no solo por muitos anos (BALL et al., 2007).

O trevo vesiculoso possui sementes com dormência, que são denominadas sementes duras devido à presença de uma camada impermeável na superfície que impede a absorção de água e que dificulta sua germinação. Essa espécie pode ter mais de 70% de sementes duras, exigindo escarificação para uma germinação satisfatória (BALL et al., 1991). Os métodos para a quebra de dormência dessas sementes incluem medidas físicas, como o uso de lixa ou exposição à água quente.

Essa leguminosa é amplamente utilizada em pastagem, devido ao seu alto valor nutritivo e digestivo de sua folhagem. Além disso, é recomendada para uso em adubação verde e também pode ser empregada na produção de feno e silagem (ERDEMLI et al., 2007).

Por ser uma leguminosa, apresenta relação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium*, fixando nitrogênio atmosférico e assim reduzindo a necessidade de adubações nitrogenadas (OVALLE, 2010). Seu rendimento, qualidade de forragem e produção de semente têm superado outras leguminosas de clima temperado como trevo branco e cornichão (COELHO, 2002).

3.2. SECAGEM

A secagem de sementes, além de contribuir com a preservação fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando, muitas vezes, perdas ocasionadas por intempéries durante o processo produtivo (GARCIA, 2004).

Existem dois principais tipos de secagem, a natural e a artificial. Na natural, o processo é relativamente simples e consiste na exposição do material à radiação solar, porém demanda grandes áreas e maior mão-de-obra, além de sujeitar os grãos às intempéries climáticas. Já a artificial envolve secadores mecânicos, providos de maior tecnologia, garantindo assim uma maior uniformidade de secagem ao produto final, além de demandar menor área de operação e mão-de-obra (VIEIRA, 2012).

Segundo Afonso Júnior (1999) a produção de grãos e sementes com qualidade elevada demanda uma série de recomendações, das quais o produto deve ser colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar perdas por ataque de insetos, doenças e microrganismos. Muitas vezes, o material possui um teor de umidade elevado e, desta maneira, faz-se necessário o uso da secagem para a conservação da qualidade dos produtos.

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas nas indústrias de alimentos, químicas e farmacêuticas, e sua importância está ligada ao aumento do tempo de armazenagem de diversos produtos, facilitar o transporte e manuseio, proporcionar uma maior estabilidade química e melhor conservação contra atividades microbiológicas (RAMOS, 2013).

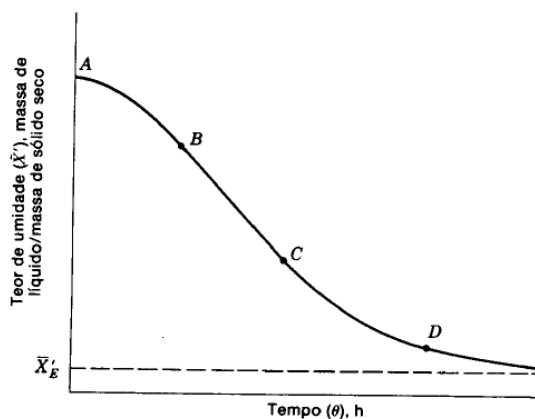
A operação de secagem consiste na remoção de água (ou outro líquido) de um determinado material sólido. É um processo complexo que envolve a transferência simultânea de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, onde a transferência de calor é responsável por evaporar a substância volátil e a transferência de massa remove o vapor formado (GEANKOPLIS, 1998; GONELI et al., 2014).

A retirada da umidade deve ser feita em um nível tal, de modo que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente que será armazenado. Durante o processo, a movimentação da água ocorre devido à diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. Para que a secagem ocorra, a pressão de vapor sobre a superfície do sólido tem de ser maior que a pressão de vapor d'água no ar de secagem (SILVA et al., 2008).

No processo de secagem de um sólido normalmente é observado um comportamento característico, o qual pode ser notado pelas curvas típicas da secagem, que estão relacionadas com os mecanismos de operação. Essas curvas relacionam taxa ou a

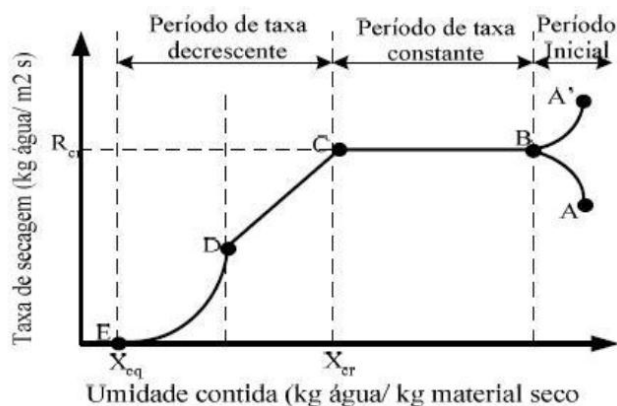
velocidade da secagem em função do tempo de secagem ou teor de umidade, conforme Figuras 3.3 e 3.4 (FOUST, 1982).

Figura 3.3 - Curva típica de secagem; teor de umidade em função do tempo



Fonte: FOUST (1982).

Figura 3.4 - Curva de taxa de secagem típica em função do teor de umidade



Fonte: GEANKOPLIS (1998).

O segmento A-B, na Figura 3.3 ou 3.4, representa o período em regime não permanente, no qual o sólido tem excesso de água e sua temperatura tende à temperatura de bulbo úmido do ar, onde sua taxa de evaporação é crescente devido à elevação (A-B) ou diminuição (A'-B) na temperatura do produto e da pressão de vapor da água até o momento em que a transferência de calor se equivalha à transferência de massa no ponto B (GEANKÓPLIS, 1998). No segmento B-C, caracteriza-se o período de taxa constante, pois a transferência de calor e de massa é equivalente, ou seja, toda a superfície do sólido está saturada de água e possui temperatura igual a de bulbo úmido do ar de secagem. O ponto C representa o fim da taxa constante, denominado de umidade crítica (X_c) (FOUST, 1982). O período C-D começa quando a superfície do sólido deixa de estar saturada de água e inicia a taxa decrescente. A velocidade da retirada de água do sólido é mais lenta, visto que a água precisa ser retirada do interior do sólido. A partir do ponto D, a evaporação de água acontece do interior do sólido, e o teor de água e umidade cai até que seja atingido o teor de umidade de equilíbrio (X_e), que é o fim da secagem (FOUST, 1982).

Segundo Arim (2014) a taxa de secagem, no caso de sementes, é influenciada também pelo genótipo, estágio de maturação, teor de umidade inicial, permeabilidade da camada protetora e composição física da semente. Neste caso, ressalta-se a importância desse estudo quando se trata de material orgânico, visto que, se for realizada de maneira inadequada, pode acarretar em perdas fisiológicas do produto final. Desta forma, o tipo de secador utilizado tem influência direta no rendimento térmico dessa operação unitária.

Cinética de Secagem

O estudo da cinética de secagem é importante na descrição dos fenômenos de transferência de calor e de massa, tornando-se indispensável para o projeto de secadores, pois é através deste que se estabelecem as relações de umidade em função do tempo de secadores em diferentes taxas de secagem (ARIM, 2014).

As equações que definem a transferência de calor e de massa na interface ar-produto são estabelecidas fazendo alusão a uma noção de condutância de superfície interpretada por um fenômeno de camada limite.

A segunda Lei de Fick diz que a taxa decrescente de secagem é função do tempo, espessura da massa sólida e da difusividade. Para tempos de secagem elevados, o tempo da taxa decrescente é representado por uma série de Taylor simplificada aplicada a geometria esférica, apresentada na Equação 1 (GEANKOPLIS, 1998).

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{\left[-\left(\frac{\pi}{r}\right)^2 D_{ef} t \right]} \quad (1)$$

em que X_t é a umidade no tempo t , X_e é a umidade de equilíbrio, X_{t0} é a umidade no tempo zero, r é o raio da esfera e D_{ef} é o coeficiente de difusão efetiva aplicável ao movimento através do sólido.

A teoria da difusão expressa pela Equação 1, em alguns casos, não representa o comportamento da taxa de secagem, devido a interferentes de resistências interna do material. Neste caso, podem-se aplicar alguns modelos empíricos e/ou semi-empíricos. O Quadro 3.1 apresenta os modelos utilizados para analisar as curvas de cinética de secagem.

Quadro 3.1 - Modelos matemáticos para avaliar curvas de cinética de secagem

Autor	Modelo	Equação
Lewis (1921)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \exp(-kt)$	(2)
Page (1949)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \exp(-kt^n)$	(3)
Henderson (1968)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k \cdot t) + b_1 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(4)

Quadro 3.1 - Continuação.

Dois termos (1974)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \theta_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot t) + \theta_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot t)$	(5)
Logarítmico (1999)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = \theta_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot t) + \delta$	(6)
Midilli (2002)	$\frac{X_t - X_e}{X_{t0} - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(7)

As variáveis k , k_0 e k_l são coeficientes de secagem e n é um parâmetro de ajuste dos modelos. Na Equação 4, a_l , b_l e c_l são constantes do modelo. Na Equação 7, a e b também são constantes do modelo. Nas Equações 5 e 6 $\theta_1, \alpha_1, \theta_2, \alpha_2$ também são constantes dos modelos.

O modelo de Lewis (1921), apresentado na Equação 2, é comumente utilizado em secagem de cereais e exibe uma taxa de secagem decrescente. Sendo desconsiderado qualquer resistência interna, ponderando apenas uma resistência de superfície (ABALONE et al., 2006). O modelo de Page (1949), exposto na Equação 3 é uma modificação do modelo de Lewis, através da adição de um parâmetro de ajuste (n). Este modelo é o mais indicado quando há uma elevada interferência interna do material em um processo de secagem (OLIVEIRA et al., 2006). Segundo Carlesso et al., (2007) o modelo de Henderson também é derivado do modelo de Lewis e mostra que os coeficientes de secagem são dependentes da temperatura do ar e do mecanismo de difusão de água ou vapor de água no interior das sementes. Já o modelo Midilli apresenta operações matemáticas simples e é frequentemente aplicado para prever o processo de secagem em produtos agrícolas (CAMICIA et al., 2015). O modelo da difusão de Dois Termos (1974) mostra os primeiros dois termos da solução em série da Segunda Lei de Fick. Este modelo pode ser aplicado a qualquer tipo de geometria de partícula e condições contorno, considerando-se que a difusividade é constante. É um modelo recomendado para prever o comportamento dos dados de secagem de produtos agrícolas (DANDAMRONGRAK et al., 2002; CLAUMANN et al., 2017). Ferreira et al., (2012) cita o modelo Logarítmico (1999) em estudos com secagem de folhas de louro sob diferentes condições.

3.3. ISOTERMAS

As isotermas de equilíbrio são uma relação entre a umidade do material e a atividade de água (a_w) correspondente a uma determinada temperatura. O estudo de atividade de água de um material pode ser realizado mediante a avaliação de isotermas (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982; KARATHANOS et al., 1996).

Sabe-se que a umidade das sementes se equilibra com a umidade do ar que envolve, e a esta condição de equilíbrio denomina-se equilíbrio higroscópios (sob condições constantes de temperatura e umidade relativa do ar). Neste processo de equilíbrio de umidade, pode ocorrer perda ou ganho de massa nas sementes, dependendo se o mesmo irá ceder ou absorver água (COSTA, 2010).

Park et al., (2007) relata que uma isoterma de sorção pode ser de adsorção ou dessorção. Denomina-se isoterma de adsorção quando um material mais seco é colocado em contato com várias atmosferas de umidade controlada, aumentando a umidade relativa e medindo o aumento de peso ao adsorver a água. Já a isoterma de dessorção é quando o material úmido é colocado sob mesmas condições utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso, decorrente da saída de água.

Segundo Park et al., (2008) existem muitas equações empíricas que correlacionam dados experimentais das isotermas de sorção para materiais biológicos e, para o caso de sementes os modelos mais utilizados são os polinômios de graus variados. O Quadro 3.2 apresenta os modelos matemáticos mais utilizados para avaliar curvas de isotermas de sementes.

Quadro 3.2 - Modelos matemáticos mais utilizados para avaliar curvas de isotermas de sementes

Autor	Modelo	Equação
BET	$X_e = \frac{\left[X_m \cdot c \cdot e^{b/T} \cdot a_w \right] \cdot [1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1 - a_w) \cdot [1 + (e^{b/T} - 1) \cdot a_w - e^{b/T} \cdot a_w^{n+1}]}$	(8)
GAB	$X_e = \frac{X_m \cdot C t \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$	(9)
Peleg	$X_e = k_2 \cdot a_w^{n_1} + k_3 \cdot a_w^{n_2}$	(10)

Quadro 3.2 - Continuação.

Henderson	$X_e = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{1/b}$	(11)
Oswin	$X_e = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$	(12)

São constantes a , b , c , k_2 , k_3 , n , n_1 e n_2 , X_m é a umidade na monocamada em kg_{H_2O}/kg_{ss} e Ct e K são constantes associadas às entalpias de sorção da monocamada e multicamada, respectivamente.

O modelo BET é comumente utilizado na modelagem de sorção de alimentos para encontrar a umidade da monocamada. Segundo Park et al., (2008) a Equação de BET é a mais completa teoria de adsorção existente na literatura. O modelo GAB geralmente é utilizado para descrever isotermas de vegetais e possibilita ajustes de umidade relativa de até 0.9. O modelo GAB é uma das equações mais utilizadas para ajustar dados de produtos orgânicos e, assim como o BET são modelos teóricos (MULET et al., 2002). Os modelos empíricos mais utilizados são Peleg, Henderson e Oswin. O modelo Peleg apresenta quatro parâmetros e resulta em ajustes tão bons quanto o de GAB. O modelo Oswin é baseado na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal e apresenta vantagens sobre os modelos teóricos devido à presença de apenas duas constantes de fácil linearização. Entretanto suas constantes não apresentam significado físico (GOMES et al., 2002). O Quadro 3.3 traz algumas referências que trabalham com materiais biológicos e fizeram uso de modelos de isotermas de sorção.

Quadro 3.3 - Referências de isotermas de sorção

Referência	Modelos	Material	Temperatura (°C)
Chen et al., 2003	Halsey, Henderson, Chung e Pfost, Oswin, GAB	Semente de ervilha	25, 50
Lehn e Pinto, 2004	Henderson-Thompson, Chung e Pfost, Oswin e Halsey, Lewis, Brooker, Henderson, Page, Overhults	Arroz em casca	10, 15, 20
Hassini et al., 2015	GAB, Oswin, Dent, Henderson, Halsey	Semente de pera espinhosa	40, 60, 70
Maia et al., 2015	GAB	Sementes de cevada	15, 20, 30, 50
Freitas, 2016	Henderson, GAB, Peleg, BET, Oswin	Semente de cornichão	40, 50, 60

Chen et al., (2003) utilizando semente de ervilha relata que, o modelo de isotermas que mais se ajustou foi o de Henderson no que diz respeito a atividade de água nas temperaturas descritas no Quadro 3. Segundo Hassini et al., (2015), num estudo de semente de pera espinhosa o modelo GAB se ajustou de forma satisfatória. Maia et al., (2015) ajustou de forma adequada ao modelo de isotermas de GAB num estudo utilizando sementes de cevada. Já Freitas (2016) trabalhando com semente de cornichão obteve o melhor ajuste para a isoterma de Peleg.

Olanda et al., (2012) relatam que, para que o trevo vesiculoso possa ser armazenado por períodos longos, o grão deve ter teor de água inicial igual ou inferior a 9%, sendo que as sementes de trevo armazenadas com teores de água inadequados podem deteriorar-se e arruinar todo lote. Se as sementes apresentarem umidades superiores a esta, deve-se proceder com a secagem.

3.4. SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO

A operação unitária de fluidização converte um leito estático de partículas em uma massa em suspensão, a qual apresenta várias propriedades de um líquido em ebulição, principalmente no que diz respeito à escoabilidade. Trata-se de uma técnica muito utilizada em indústrias de processos catalíticos, calcinação de minérios, secagem, entre outros, devido ao intenso contato entre os sólidos, gerando elevadas taxas de transferência de calor e de massa (PELL e DUNSON, 1999).

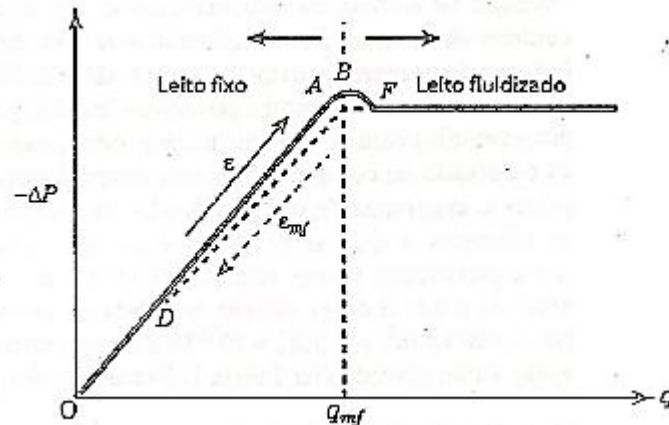
A fluidização é conhecida por décadas como um método que proporciona eficiente contato entre fluido e partículas. O grande sucesso de aplicar essa tecnologia em processos industriais é que os procedimentos e os controles destes equipamentos aperfeiçoam a produção quanto à máxima qualidade do produto, o consumo mínimo de energia e o menor impacto ambiental (PASSOS et. al., 2013).

A fluidização é fundamentada como a circulação de sólidos juntamente com um fluido (gás ou líquido). O secador de leito fluidizado apresenta vantagens reconhecidas, como por exemplo, a uniformidade de temperaturas e umidade nos produtos secos, alta capacidade de secagem pela eficiente transferência de massa e de energia, principalmente em materiais

com umidades elevadas, reduzindo o tempo de secagem e rapidez na remoção da umidade (USTRA, 2005).

A caracterização fluidodinâmica de um leito fluidizado é obtida através de dados de queda de pressão em função da velocidade do fluido, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido



Fonte: CREMASCO (2012).

Em pequenas velocidades (Figura 3.5), a queda de pressão é crescente com a vazão do fluido, representada como leito fixo (segmento O-A), isto porque, 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.

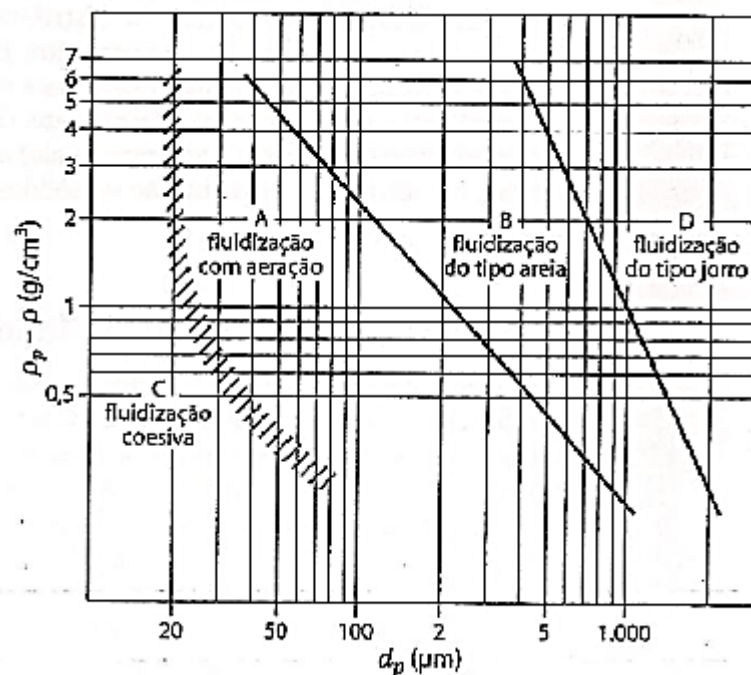
Portanto, o ponto da velocidade, U_{mf} , e da porosidade, ε_{mf} , da mínima fluidização, que marca o limite entre as condições de leito fixo e leito fluidizado, pode ser determinado mediante o conhecimento da queda de pressão, ΔP , e da porosidade do leito estático, ε , através do leito em função da velocidade superficial do gás, U , 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.

A partir de certa velocidade, as partículas apresentam movimento desordenado em relação umas as outras, correspondendo o ponto A na Figura 3.5. A partir de velocidades superiores à velocidade correspondente ao ponto A, diz-se que o regime de escoamento é de fluidização. O ponto B representa a situação de mínima fluidização, caracterizado por

apresentar a máxima queda de pressão no leito. 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 de transporte pneumático.

Nem todos os tipos e tamanhos de partículas sofrem uma fluidização satisfatória. Em decorrência disso, Geldart (1973), propôs uma classificação devido aos tipos de comportamento das partículas, através de observações da fluidização para diversos tipos de partículas. Essa classificação considera quatro grupos, de acordo com a relação da diferença entre as massas específicas entre os sólidos e o fluido e do diâmetro médio das partículas, conforme representado na Figura 3.6. No grupo A – os sólidos são areáveis e correspondem a materiais com pequeno diâmetro médio (de 20 a 1000 μm) ou baixa massa específica (menor que 1,4 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); grupo B – os sólidos possuem tamanho médio (aproximadamente 50 a 1000 μm) e massa específica entre 1,4 e 4 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a fluidização borbulhante se inicia logo após atingida a velocidade de mínima fluidização; grupo C - fluidização difícil, partículas coesivas, porque as forças interpartículas são maiores do que as que o fluido exerce sobre a partícula; grupo D - fluidização tipo jorro, partículas grandes (acima de 500 μm) (Teixeira, 2010 apud Basu, 2006, Howard, 1989, Kunii & Levenspiel, 1991).

Figura 3. 6 - Classificação Geldart para a fluidização de partículas no ar em condições ambientes



Fonte: GELDART (1986).

MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO FLUIDIZADO

Estudos de modelagem e técnicas computacionais tem-se tornado cada vez mais frequentes, uma vez que esta aplicação permite prever comportamento de processos contribuindo com 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. Rizzi Jr. (2008) diz que, estes modelos dependem do tratamento e classificação do material em análise no leito fluidizado.

Dentre os vários modelos propostos na literatura, o Quadro 3.4 apresenta alguns destes modelos seguidos de sua caracterização e aplicação.

Quadro 3.4 - Modelos matemáticos utilizados 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.
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.

Quadro 3.4 - Continuação.

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.
Freitas (2016)	Modelo simplificado de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), considerando equilíbrio térmico entre as fases gás e sólido.	Secagem de Sementes de cornichão em leito fluidizado

O modelo de Palancz (1983) prevê a secagem de sólidos em leito fluidizado contínuo, assumindo que o secador pode ser dividido em três fases distintas, uma fase bolha, uma fase de gás intersticial e outra fase sólida. Ülkü e Uçkan (1986) da mesma forma que Booker (1990) assumiram o sistema como homogêneo, baseando-se na difusão de líquido e vapor dentro de cada grão de material utilizado em seus trabalhos. O modelo de Chandran et al., (1990) analisa os teores de umidade inicial, crítica e de equilíbrio do sólido e o coeficiente de secagem durante o período de taxa constante. Além disso, avalia a influência de alguns parâmetros como a temperatura, vazão do ar, altura do leito e a vazão de sólidos em regime permanente. O modelo de Massarani e Silva Telles (1992) é composto por uma fase sólida e uma fase gasosa. Ele associa a cada ponto do sistema uma fase sólida e outra gasosa com velocidade, umidade e temperatura própria. Na literatura existem diversos trabalhos que utilizaram este modelo como, por exemplo, CALADO (1993), MAYTA (1994), LIMA (2004) e FREITAS (2016). Booker et al., (1992) despreza diversas idealizações, como: encolhimento, gradientes de temperatura no interior dos grãos e condução grão-a-grão. Utiliza de vazões de ar e grãos constantes em fluxo pistonado, estado estacionário ou pseudo-estacionário, paredes adiabáticas, equações de secagem e de umidade de equilíbrio precisas. Além de considerar que os grãos são perfeitamente misturados e que o ar que sai do leito está em equilíbrio com os grãos. Syahrul et al., (2002) pondera a eficiência térmica da transferência de calor e de massa durante a secagem de milho em leito fluidizado. O autor observou alta eficiência sempre no período inicial do processo de secagem, pois no período final os teores de umidades ficam abaixo da umidade crítica e com isso há um aumento na resistência de transferência de massa. O modelo de Lima (2004) baseia-se em um balanço de massa para a fase sólida e fase gás, além de um balanço de energia para a mistura gás-sólido. Como não apresenta muitos parâmetros torna-se vantajoso.

Entre todos os modelos expostos, o de Massarani Silva Telles (1992) tem destaque, pois sua fundamentação apresenta um número reduzido de parâmetros relacionados aos fenômenos de transferência de calor e de massa, bem como à isoterma de secagem. Calçada (1994) e Mayta (1994) utilizaram o modelo de duas fases para a secagem de milho, diferindo do leito, fixo e deslizantes, respectivamente. Freitas (2016) encontrou resultados satisfatórios utilizando o modelo na secagem de sementes de cornichão em leito fluidizado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. MATERIAL

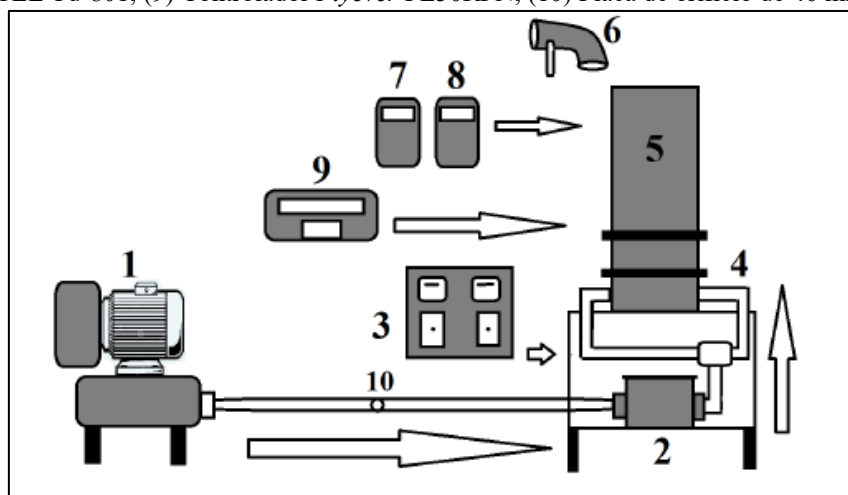
Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), adquiridas junto à empresa Comércio e Representações Agrícolas Relva localizada cidade de Ijuí/RS. Todos os experimentos foram realizados a partir de um mesmo lote de sementes (403/2017 - germinação mínima de 70%, validade teste germinação: 10/2019) com o intuito de garantir um material com as mesmas características físicas e fisiológicas iniciais. As análises foram realizadas nos laboratórios de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa – Campus Bagé/RS.

4.2. EQUIPAMENTO DE LEITO FLUIDIZADO

Um esquema da unidade experimental de geometria cartesiana é exposto na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Esquema da unidade experimental cartesiano.

(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 *Tbs* e *Tbu*, (7) e (8) Indicadores digitais ICEL Td-801, (9) Controlador *Flyever* FE50RPN, (10) Placa de orifício de 40 mm.



Fonte: adaptado de Freitas (2016).

O ar de secagem foi fornecido por um soprador radial da marca VOGES de 7,5 cv. O ajuste da vazão do ar de secagem foi realizado por um inversor de frequência acoplado ao soprador. Para medida da vazão do ar de secagem, foi utilizada uma placa de orifício de 40 mm de abertura. Para determinar da pressão causada na placa de orifício, fez-

se uso de um transdutor de pressão associado a um indicador universal da Marca NOVUS referencia N480i. A placa de orifício foi calibrada por meio de um tubo de Pitot padrão. Ao passar pelo medidor de vazão o ar de secagem foi aquecido por um trocador de calor composto por duas resistências elétricas de louça de 600 W cada.

A câmara de secagem é composta de um leito fluidizado de base retangular que possui três módulos, um 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. Para medir a queda de pressão ocasionada pelo leito fez-se uso de um transdutor de pressão associado a um indicador universal da Marca NOVUS referência N480. 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 indicadores digitais.

4.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.3.1. Caracterização física e fisiológica das partículas

A umidade das sementes foi determinada através do método gravimétrico recomendado pela Association of Official Analytical Chemists - AOAC (1997). A maior parte dos ensaios referente a caracterização física foram desenvolvidos a partir da metodologia adotada por Cremasco, (2012).

Massa específica real das partículas: a massa específica real (ρ_{real}) das sementes foi determinada por picnometria gasosa em um picnômetro da marca *Quantachrome Instruments*, ultrafoam1000e, modelo UPY-30F (USA) e balança analítica. Fazendo o uso de gás hélio como gás inerte.

Massa específica aparente: a massa específica aparente (ρ_a) foi obtida por ensaios de proveta, em triplicata, na qual uma proveta da marca Astral Científica de 100 mL foi preenchida com as sementes e a sua massa determinada com o auxílio da balança analítica.

Porosidade média do leito estático: a porosidade média do leito estático de sementes (ε) foi determinada pela relação entre a massa específica aparente e a massa específica real das sementes, conforme a Equação 13:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_a}{\rho_{real}} \right) \quad (13)$$

Esfericidade: a esfericidade (ϕ) das sementes foi calculada através de 20 medidas dos comprimentos longitudinais e transversais obtidos em ensaios de paquimetria. O paquímetro digital utilizado foi da marca *King Tools* (0–150 mm, Brasil) com precisão de ± 0.01 mm. Como as sementes de trevo vesiculoso apresentam duas dimensões bem definidas com geometria semelhante a de um elipsoide não escaleno, os cálculos da esfericidade foram feitos segundo a Equação 14:

$$\phi = \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume}}{\text{área da superfície da partícula}} = \frac{\pi \cdot (d_e)^2}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \left[b + \frac{a^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arcsen\left(\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}\right) \right]} \quad (14)$$

na qual a e b são os valores do diâmetro do elipsoide. O diâmetro equivalente (d_e) foi determinado pela Equação 15.

$$d_e = \left[\frac{6}{\pi} \cdot V_{elipsoide} \right]^{1/3} \quad (15)$$

O volume do elipsoide esferoide ($V_{elipsoide}$) foi determinado através da Equação 16.

$$V_{elipsoide} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot b \quad (16)$$

Germinação: para a caracterização fisiológica foram efetuados testes de germinação seguindo a metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (Mapa, 2009). Esta análise constitui-se na utilização de água destilada, caixa gerbox e papel germitex, onde foram dispostas 100 sementes afastadas, aproximadamente, 1 cm umas das outras. As amostras foram submetidas a um confinamento controlado em uma germinadora da marca Nova Ética e modelo 403-3D (Brasil), operando na temperatura de 20 °C na influência de luz solar natural. Na escarificação mecânica das sementes foi utilizada uma lixa n° 80 por um período de 60 segundos. As contagens do vigor e germinação das sementes se procederam no quarto e sétimo dia após o início do teste, respectivamente. Os testes de germinação foram

realizados em triplicata. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

4.3.2. Estudo da reumidificação

Esse procedimento foi realizado devido as sementes de trevo se encontrarem com teor de umidade comercial (aproximadamente $U_{BU} = 7\%$). Com isso, o estudo de reumidificação teve como objetivo principal analisar as condições ideais para que as sementes de trevo apresentem um teor de umidade semelhante ao encontrado nas sementes recém-colhidas na lavoura. Muitas sementes, embora sendo viáveis e tendo condições adequadas, deixam de germinar. Essas sementes são denominadas dormentes e precisam de tratamentos especiais para germinar. Dessa forma, o processo de reumidificação pode contribuir positivamente sobre a germinação, ajudando a acelerar e uniformizar o processo, além de contribuir com a quebra de dormência. O estudo do processo de reumidificação foi realizado de acordo com a metodologia de saturação proposta por Arnost Jr. (1997). Essa consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e saturado sob as temperaturas de 30 e 40 °C. O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado foi um banho termostatizado marca Quimis e modelo Q215M2 (Brasil).

As sementes foram dispostas em uma camada de aproximadamente 1 cm de altura, arranjados em um suporte de fundo telado para facilitar o processo de transferência de massa. Os testes do teor de umidade das sementes foram obtidos através do método gravimétrico estático recomendado pela AOAC (1997). As alíquotas foram retiradas no início do processo de reumidificação e após 36 horas de experimento. Para cada alíquota retirada os grãos foram submetidos para análise de umidade e de germinação seguindo a metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes, propostas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA/ACS (2009). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

4.3.3. Isotermas de dessorção

A determinação das isotermas de dessorção das sementes de trevo vesiculoso foi embasada através do método gravimétrico estático. Para tal, foram empregadas soluções de ácido sulfúrico em 11 diferentes concentrações, de forma que garantiram a variação da

umidade relativa de 5 a 70 % P/P (Perry e Chilton, 1983). Foi inserido 30 mL de cada solução de ácido sulfúrico no interior de cada recipiente de vidro. Foi utilizado um suporte dentro do recipiente a fim de evitar o contato da amostra com o H_2SO_4 . Aproximadamente 2 g de sementes de trevo foram colocadas no interior de um cadinho plástico sustentado pelo suporte.

Os trinta e três recipientes foram colocados em estufa de circulação forçada, marca Nova Ética, modelo 400-5ND (Brasil). As temperaturas definidas para o experimento foram 40, 50 e 60 °C, sendo essas as mesmas que foram empregadas nos experimentos de secagem. As pesagens periódicas das amostras foram feitas em balança analítica da marca SHIMADZU e modelo AUY220 (Brasil).

Os resultados obtidos nas isotermas foram analisados através do ajuste dos dados experimentais aos modelos de BET, GAB, Oswin, Peleg e Henderson através de um programa computacional *Origin Pro 8.5*. O coeficiente de determinação (R^2), chi-quadrado (X^2) e erro médio relativo (P_p) conforme mostrado nas Equações 17 e 18, foram os critérios abordados para decidir o modelo de isoterma de dessorção que mais se adequou ao comportamento obtido para as sementes de trevo.

$$P_p = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{eExp} - X_{ePre}|}{X_{eExp}} \quad (17)$$

$$X^2 = \frac{(X_{eExp} - X_{ePre})^2}{nn - NN} \quad (18)$$

em que X_{eExp} é a umidade de equilíbrio obtida experimentalmente, X_{ePre} a umidade de equilíbrio predita pelo modelo, n o número de observações experimentais e NN o número de parâmetros da Equação de ajuste. Nessa perspectiva, para um bom ajuste matemático dos modelos, P_p deve ser menor que 10 %, X^2 menor valor e R^2 próximo à 1 (MOHAPATRA e RAO, 2005).

4.3.4. Caracterização do leito fluidizado

Para o estudo de fluidodinâmica do leito, o sistema foi ajustado para operar em regime de fluidização particulada ou bolha até que a temperatura atingisse o valor desejado em regime permanente para uma altura de leito de 5 centímetros. 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.

4.3.5. Secagem

Com o leito fluidizado devidamente caracterizado em relação a sua fluidodinâmica, foi possível iniciar os experimentos de secagem das sementes de trevo. Foi colocada no módulo experimental uma massa de aproximadamente 750g (correspondente aos 5 cm de altura), previamente reumidificada em atmosfera saturada.

Os experimentos foram realizados com o sistema operando em condições de três diferentes velocidades do ar de entrada, 10, 20 e 30 % acima da velocidade de mínima fluidização, que foram determinadas a partir de ensaios preliminares, e em temperaturas de 40, 50 e 60°C. As condições experimentais obedeceram a um planejamento experimental fatorial 2^2 com duplicata no ponto central conforme é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Matriz do planejamento fatorial 2^2 com duplicata 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	50	1,20 U_{mf}
4	50	1,20 U_{mf}
5	60	1,10 U_{mf}
6	60	1,30 U_{mf}

As variáveis medidas durante os experimentos, a cada 2 minutos, foram às temperaturas de bulbo seco (T_{BS}) e bulbo úmido (T_{BU}) do ar na saída e a temperatura do ar de secagem (T). Com os valores da T_{BS} e T_{BU} na saída do secador e com o valor da T do ar de secagem, determinou-se a umidade relativa (U_R) e absoluta (U_A) antes e após o aquecimento do ar. Foi realizada também a análise do teor de umidade em base úmida (U_{BU}) das sementes de trevo a cada 2,5 minutos nos primeiros 10 minutos de ensaio; a cada 5 minutos até o tempo

de secagem de 40 minutos e a cada 10 minutos até o tempo total de secagem de 60 minutos. Para cada experimento realizado, os teores da U_{BU} das sementes, tanto antes como após o processo de secagem, foram obtidos através da metodologia recomendada pela AOAC (1997). Também foram determinados os valores de germinação (G) do produto final pela metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (Mapa, 2009). A determinação das propriedades psicrométricas foi realizada através do *software CATT - Computer-Aided Thermodynamic Tables 2*.

Os fenômenos presentes durante a secagem são complexos. Desta forma, pesquisadores conduzem numerosas teorias propondo múltiplas equações físicas e/ou empíricas. Portanto, foram analisados no presente trabalho as curvas de adimensional de umidade livre em função do tempo para cada ensaio proposto. A partir dos dados do adimensional de umidade livre em função do tempo determinaram-se as difusividades efetiva de cada ensaio de secagem pelo ajuste dos dados aos modelos da Lei de Fick, Page, Midilli e Henderson.

O coeficiente de determinação (R^2), chi-quadrado (X^2) e o erro médio relativo (P_p) conforme mostrado nas Equações 17 e 18 citadas anteriormente, foram os critérios abordados para decidir o modelo da cinética de secagem que mais se adequou ao comportamento obtido para as sementes de trevo.

4.3.6. Modelo de secagem para sementes de trevo vesiculoso

O modelo simplificado proposto por Massarani e Silva Telles (1992) avalia o processo de secagem considerando o sistema em duas fases (sólido e gás), e em regime não permanente. Desse modo, 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 em z ;
4. o diâmetro médio de partícula é constante (não há encolhimento);

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 19 e 20:

$$\frac{dY_s}{dt} = \frac{-f}{(1-\varepsilon)\rho_s} \quad (19)$$

$$\frac{dY_g}{dt} = \frac{f}{\varepsilon\rho_g} - \frac{G_g}{L_h\varepsilon\rho_g}(Y_g - Y_{g,L=0}) \quad (20)$$

em que Y_s é a fração mássica de água nos sólidos, Y_g a fração mássica de vapor d'água na saída do leito fluidizado, $Y_{g,L=0}$ a fração mássica de vapor d'água na entrada do leito fluidizado, t o tempo, ε a porosidade do leito de sólidos, L_h a altura do leito de sólidos, G_g fluxo mássico do gás, ρ_s a massa específica dos sólidos e ρ_g a massa específica do gás.

Nas equações 19 e 20, 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 21,

$$f = K_p a_r (Y_s - Y_{eq}) \quad (21)$$

K_p é o coeficiente global de transferência de massa, Y_{eq} a fração mássica de água no equilíbrio e a_r a área específica dos sólidos, que é obtida pela Equação 22,

$$a_r = \frac{6(1-\varepsilon)}{\phi d_m} \quad (22)$$

em que ϕ é a esfericidade dos sólidos e d_m o diâmetro médio de partícula.

A variação nas temperaturas das fases sólida e gás foram calculadas através dos balanços globais de conservação da energia, conforme Equações 23 e 24:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Q - \lambda f}{(1-\varepsilon)\rho_s c_{ps}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{Q}{\varepsilon\rho_g c_{pg}} - \frac{c_{pv}(T_g - T_s)f}{\varepsilon\rho_g c_{pg}} - \frac{\varepsilon_{parede}}{\varepsilon\rho_g c_{pg}} - \frac{c_{pg}G_g(T_g - T_{g,L=0})}{L\varepsilon\rho_g c_{pg}} \quad (24)$$

em que T_s é a temperatura do sólido, T_g a temperatura do gás de secagem, $T_{g,L=0}$ a temperatura do gás de secagem na entrada do leito fluidizado, λ o calor latente de vaporização, c_{ps} o calor específico do sólido, c_{pv} o calor específico do vapor d'água e c_{pg} o calor específico do gás, ε_{parede} a porosidade da parede do equipamento. Nas equações 23 e 24, Q , descreve a taxa de transferência de calor do sistema através da Lei de Newton do resfriamento, conforme Equação 25,

$$Q = ha(T_g - T_s) \quad (25)$$

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), como é apresentado na Equação 26.

$$h = \frac{K_g}{d_p} (0,0135(Re)^{1,3}) \quad (26)$$

A solução do modelo foi obtida através da integração numérica pelo método de Runge-Kutta em uma rotina que foi construída em modo MATLAB. Esse modelo permitiu a obtenção de variáveis importantes no processo de secagem, tais como, umidade da fase sólida e fase gás e as suas respectivas temperaturas no período de regime transitório. Também foi possível estimar o coeficiente global da transferência de massa para cada processo de secagem estudado. Entretanto, para que isso fosse possível, algumas variáveis necessitaram de atribuições de valores no modelo, tendo por consequência a necessidade de uma análise de sensibilidade paramétrica que teve por finalidade avaliar a influência da variação desses parâmetros na simulação dos processos de secagem. Tal análise foi realizada para o K_p , devido ao fato de que o valor de coeficiente global de transferência de massa utilizado foi o valor atribuído no modelo que apresentou sobreposição dos resultados simulados com os dados experimentais. Para o coeficiente global foram adicionados 5 valores que foram desde $5,15 \times 10^{-5}$ a $1,54 \times 10^{-4}$. Também foi realizada a análise de sensibilidade paramétrica sobre o valor do calor específico de sólido seco (C_{pss}) das sementes de trevo vesiculoso. Este se deu, pelo fato não existir valores do parâmetro na literatura, havendo a necessidade da aproximação de seu valor utilizando outra semente forrageira, a *Brachiaria brizantha*, com um valor de 428 J/kg.K (Rizzi Jr. et al., 2007). Para o C_{pss} foram adicionados 5 variações diferentes para este fator, os quais corresponderam desde 214 J/kg.K a 642 J/kg.K.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização física e fisiológica das sementes

Os resultados obtidos no processo de caracterização física e fisiológica das sementes de trevo são apresentados na Tabela 5.1. Nessa tabela U_{BU} corresponde a umidade em base úmida, Φ a esfericidade, θ o ângulo de repouso, d_s o diâmetro médio de Sauter, ρ_a a massa específica aparente, ρ_p a massa específica das sementes de trevo vesiculoso, ε a porosidade do leito estático e G_{total} a germinação total.

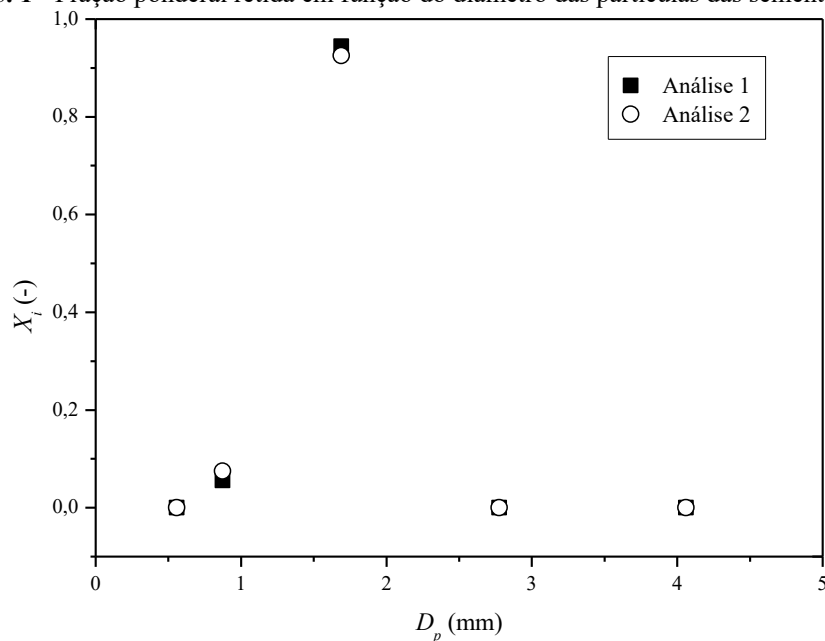
Tabela 5.1 - Resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de trevo

Propriedade	Valor*
U_{BU} (%)	$7,26 \pm 0,108$
Φ	$0,97 \pm 0,02$
θ (°)	$28,47 \pm 0,609$
d_s (mm)	$1,59 \pm 0,013$
ρ_a (kg/m ³)	$786 \pm 0,003$
ρ_p (kg/m ³)	$1364 \pm 0,001$
ε	$0,424 \pm 0,007$
G_{total} (%)	$73,00 \pm 1,154$

*Média $\pm$ desvio padrão (n=3)

Ao analisar a Tabela 5.1 verifica-se que o valor de U_{BU} obtido de 7,26% encontra-se na faixa indicada (menor que 9%) para a comercialização e armazenamento de sementes (TUNES et al., 2010). O valor de Φ apresentado na Tabela 1 para as sementes de trevo permite idealizá-las como uma partícula esférica. Este fato é de suma importância, visto que isso facilita a sua fluidização e permite que essa semente possa ser usada em leito fluidizado. Freitas (2016) encontrou Φ de 0,99, ρ_p de 1310,5 kg/m³ e ρ_a de 846,1 kg/m³ para sementes de cornichão, valores muito próximos ao encontrado neste trabalho, embora o autor tenha trabalhado com uma espécie diferente ao trevo vesiculoso.

De acordo com os valores de d_s e ρ_p das sementes de trevo vesiculoso apresentados na Tabela 5.1, tem-se que os sólidos são pertencentes ao grupo B da classificação de Geldart, possuindo características físicas apropriadas para a fluidização (GELDART, 1973). Para uma visualização e melhor compreensão do resultado obtido para o d_s das sementes de trevo, é apresentado na Figura 5.1 a curva da distribuição granulométrica diferencial.

Figura 5.1 - Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas das sementes de trevo

Observa-se na Figura 5.1 que aproximadamente 90% das sementes apresentaram um diâmetro de partícula entre a faixa de 1,5 a 2 mm. Também apresentaram um comportamento típico de distribuição granulométrica diferencial, com formato de curva de distribuição normal (FOUST et al., 2008).

5.2. Processo de reumidificação das sementes

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados de 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 7º dia (germinação) das sementes de trevo vesiculoso.

Tabela 5.2 - Umidade inicial e final em base úmida, vigor, germinação e a germinação total das sementes de trevo no processo de reumidificação

Temperatura (°C)	U_{BUi} (%)	U_{BUf} (%)	V (%)	G (%)	G_{Total} (%)	Média G_{Total} (%)
30	7,33	9,79	66	13	79	73,00 ^a ±5,19 %
			64	6	70	
			64	6	70	
			70	11	81	
40	7,47	12,02	69	9	78	79,66 ^b ±1,52 %
			75	5	80	

Letras minúsculas distintas na mesma coluna, correspondem a diferenças significativas, pelo teste Tukey a 5% de significância.

Através da Tabela 5.2 é possível verificar que o processo de reumidificação realizado na temperatura de 40 °C e no tempo de 36 h em ambiente saturado possibilitou elevar os teores de umidade das sementes de 7,47 % até 12,02 % de umidade em base úmida e com germinação total de $79,66,0 \pm 1,52$ %. Quando comparado com a outra condição de reumidificação, esse obteve o melhor resultado tanto para o valor da germinação média quanto para o desvio padrão. Nessa condição, foi encontrado um percentual alto de vigor das sementes de trevo, sendo as sementes mais vigorosas aquelas que germinaram de maneira mais uniforme e numerosa no 4º dia do processo. Bevilaqua et al., (2011) relata que o trevo recém colhido apresenta teores de umidade em base úmida na faixa de 9% e Mittelman et al., (2012) encontrou germinação em torno de 80% para sementes de trevo vesiculoso. Ainda, a Tabela 5.2 mostra que os valores de germinação obtidos para as sementes reumidificadas são muito próximas aos das não reumidificadas (Tabela 5.1). Por conta disso, foi possível afirmar que o processo de reumidificação não causou nenhum tipo de dano fisiológico nas sementes.

5.3. Caracterização físico-química das sementes

A Tabela 5.3 apresenta os valores dos parâmetros calculados a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, Oswin, Peleg e Henderson, juntamente com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), coeficientes de determinação ajustado (R_{aj}^2), chi-quadrado (X^2) e o erro médio relativo (P_p).

Tabela 5.3 - Parâmetros calculados a partir do ajuste dos dados aos modelos de BET, Oswin, Peleg e Henderson em diferentes temperaturas

Modelo	Parâmetro	Valor a 40 °C	R^2	R_{aj}^2	X^2	P_p (%)
BET	X_m	0,04364	0,98437	0,95569	$1,09 \times 10^{-4}$	4,80
	C	72,13257				
	N	2,51143				
Oswin	A	0,06	0,92728	0,82481	$2,11 \times 10^{-3}$	18,61
	B	0,13289				
Peleg	$k1$	0,07556	0,98396	0,94696	$1,54 \times 10^{-4}$	5,38
	$n1$	0,25358				
	$k2$	0,005				
	$n2$	500				
Henderson	A	2,08E+06	0,97326	0,93404	$4,79 \times 10^{-5}$	3,46
	B	5,35194				
GAB	X_m	5,47E-02	0,9659	0,90423	$9,20 \times 10^{-5}$	4,60
	C	101,4435				
	K	0,32247				

Tabela 5.3 - Continuação.

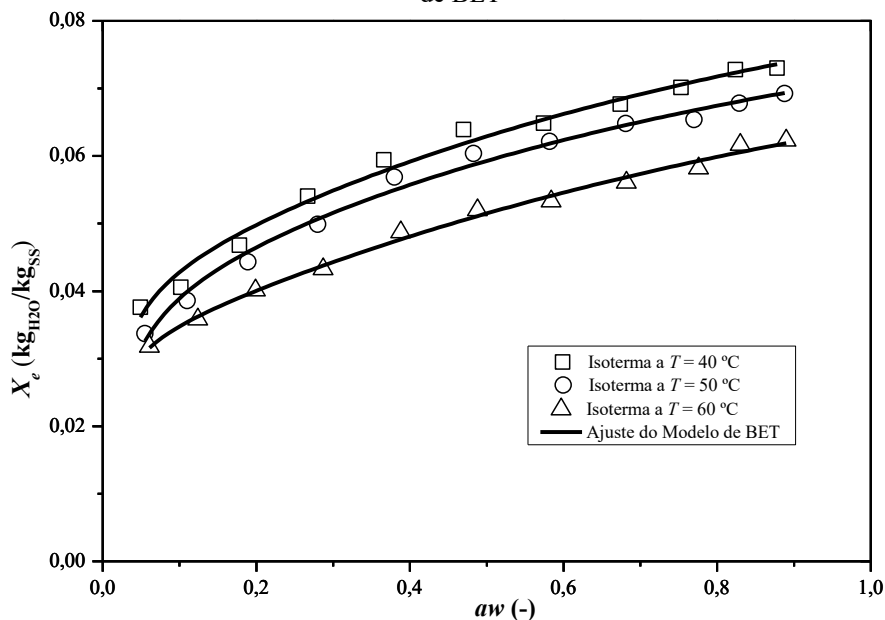
Modelo	C	Valor a 50 °C	R^2	R_{aj}^2	X^2	P_p (%)
BET	K	0,04307	0,97949	0,9420	$2,72 \times 10^{-5}$	2,58
	C	48,04795				
	N	2,41954				
Oswin	A	0,05733	0,89071	0,74170	$2,43 \times 10^{-3}$	21,44
	B	0,13729				
Peleg	$k1$	0,07314	0,98015	0,93449	$2,69 \times 10^{-5}$	2,36
	$n1$	0,26829				
	$k2$	0,005				
	$n2$	500				
Henderson	A	1,39E+06	0,95220	0,83335	$7,40 \times 10^{-5}$	4,42
	B	5,12517				
GAB	X_m	5,54E-02	0,97355	0,92543	$5,82 \times 10^{-5}$	3,90
	C	81,7638				
	K	0,28773				
Modelo	Parâmetro	Valor a 60 °C	R^2	R_{aj}^2	X^2	P_p (%)
BET	X_m	0,0342	0,99268	0,97916	$7,25 \times 10^{-5}$	1,34
	C	101,953				
	N	2,76478				
Oswin	A	0,04936	0,95973	0,90135	$1,78 \times 10^{-3}$	20,54
	B	0,13628				
Peleg	$k1$	0,06296	0,9798	0,93357	$1,65 \times 10^{-5}$	2,09
	$n1$	0,26939				
	$k2$	0,005				
	$n2$	800				
Henderson	A	2,97E+06	0,99093	0,977428	$1,14 \times 10^{-5}$	1,81
	B	5,12119				
GAB	X_m	4,31E-02	0,98548	0,958815	$1,92 \times 10^{-5}$	2,44
	C	96,8103				
	K	0,37083				

De acordo com o que está exposto na Tabela 5.3, a maioria dos modelos testados representam satisfatoriamente as isotermas de dessorção das sementes de trevo vesiculoso, uma vez que obtiveram valores de coeficiente de determinação R_{aj}^2 maiores que 0,94 e erro relativo P_p menor que 10%, com exceção do modelo de Oswin. Ainda assim, observa-se que o modelo de BET foi o que se destacou para descrever o comportamento das isotermas de dessorção das sementes de trevo, obtendo R_{aj}^2 entre 0,942 a 0,979 e um P_p 1,34 a 4,80 para as três temperaturas em estudo. O parâmetro X_m (BET) é um parâmetro de ajuste que apresenta significado físico, representando o valor da umidade na formação de monocamada e segundo o que é apresentado na Tabela 5.3, diminuiu com o aumento da temperatura em função do aumento do estado de agitação das moléculas. Este parâmetro corresponde ao teor de umidade

ótimo para armazenamento e controle de possíveis reações de deterioração (KAYA et al., 2007). Também na Tabela 5.3, é verificado que os parâmetros de ajuste para o modelo de Peleg encontrados neste trabalho estão de acordo com os valores que Montanuci (2014) encontrou para R^2 variando de 0,955 a 0,994 em temperaturas na faixa de 10 a 35°C para cevada. Segundo Montanuci (2014) a k_1 do modelo de Peleg apresenta tendências decrescentes com o aumento da temperatura, mostrando-se inversamente proporcional à temperatura. O mesmo comportamento acontece com a k_2 à medida que aumenta a temperatura. Isso é devido ao aumento da capacidade de adsorção de água dos grãos com o aumento da temperatura, ou seja, quanto menor o k_2 maior a capacidade de adsorção de água no material. A partir dos valores expostos na Tabela 5.3 o modelo escolhido foi o de BET, por ser uma Equação triparamétrica de polinômio menor que o modelo de Peleg.

A Figura 5.2 apresenta as curvas da umidade de equilíbrio em função da atividade de água das sementes de trevo. Nessas curvas são mostradas as isotermas de dessorção experimentais das sementes de trevo nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C ajustadas ao modelo de BET.

Figura 5. 2 - Umidade de equilíbrio em função da atividade de água das sementes de trevo ajustadas ao modelo de BET



Através da análise do comportamento da isoterma apresentada na Figura 5.2, verifica-se que esta é classificada como tipo II, seguindo a classificação da IUPAC. A forma sigmoidal da classificação do tipo II é característica de isotermas de produtos agrícolas (VEGA et al., 2005). Correa et al.,(2005) encontrou um comportamento parecido trabalhando

com grãos de trigo e Chen et al.,(2003) para sementes de ervilha. Essa classificação resulta de adsorventes nos quais há uma grande variação de tamanhos de poros que permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar. Observa-se também que o aumento da aw promove um aumento da X_e para cada temperatura. Dessa forma, a taxa de dessorção é mais alta no início do processo e diminui continuamente à medida que se aproxima da X_e (PALMEIRA et al., 2004).

5.4. Caracterização Fluidodinâmica

Nas Figuras 5.3 a 5.5 são apresentadas as curvas fluidodinâmicas da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar nas temperaturas de secagem 40, 50 e 60°C, respectivamente.

Figura 5. 3 - Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 40°C

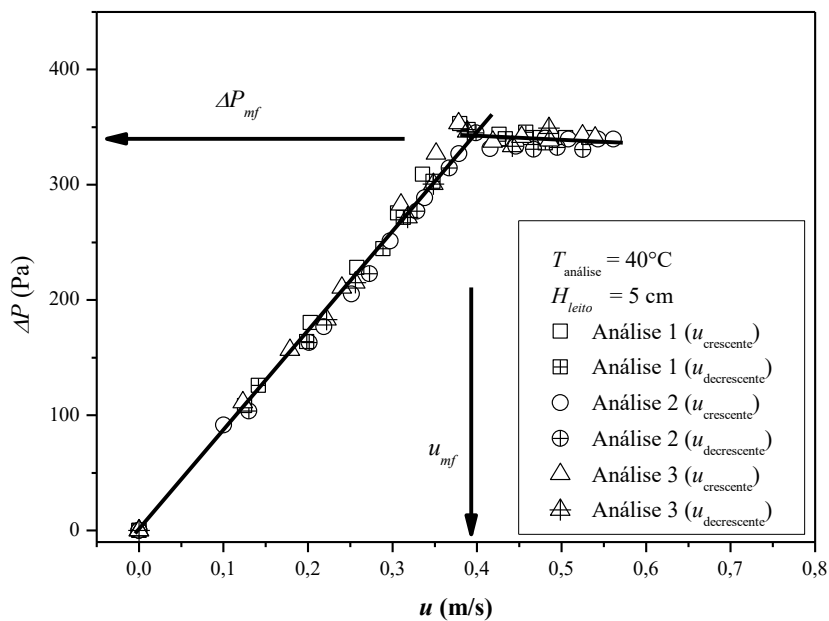


Figura 5. 4 - Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 50°C

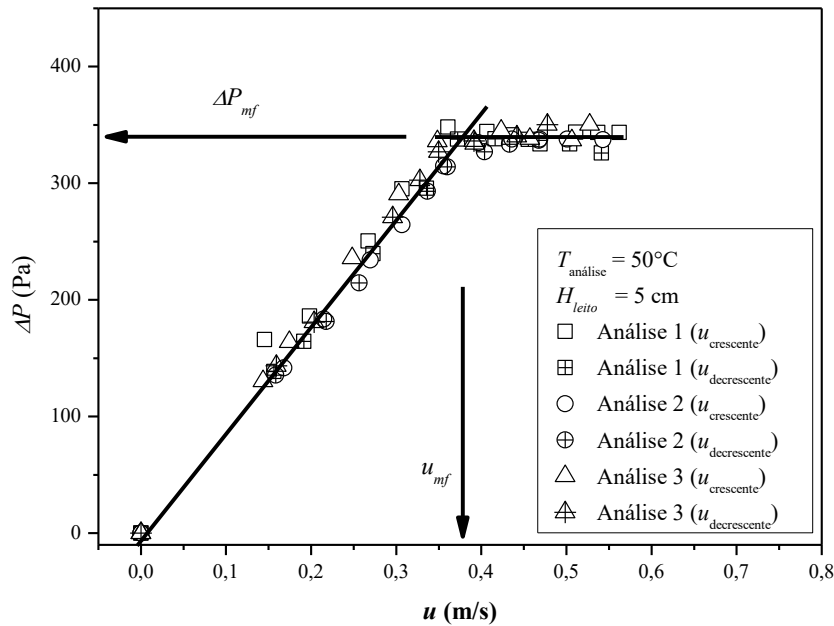
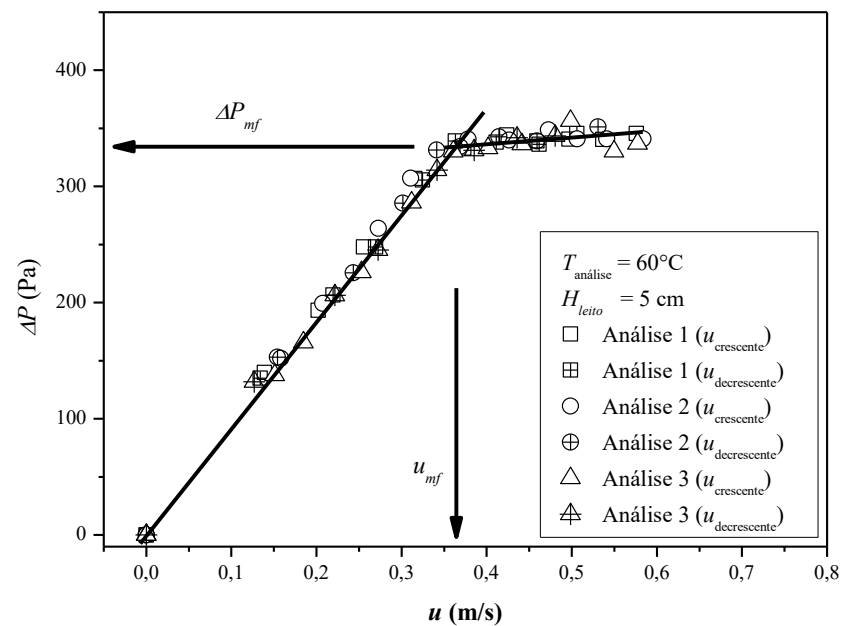


Figura 5. 5 - Queda de Pressão do leito em função da velocidade do ar de secagem na temperatura de 60°C



Pode-se observar pelas Figuras 5.3 a 5.5 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 0,35 m/s e corresponde a região do leito fixo. Para valores de velocidade do ar superiores a 0,35 até 0,6 m/s o leito de sólidos atinge a condição de fluidização, e a partir desta condição, a queda de pressão mantém-se constante com um valor de aproximadamente 330 a 350 Pa. O Comportamento das curvas fluidodinâmicas 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 5.4 são apresentados os valores da queda de pressão máxima e da velocidade de mínima fluidização para as condições estudadas neste trabalho.

Tabela 5. 4 - Parâmetros fluidodinâmicos experimentais obtidos no leito fluidizado

$T (^{\circ}C)$	ΔP_{max} (Pa)	u_{mf} (m/s)
40	$353,22 \pm 5,27$	$0,4187 \pm 0,005$
50	$333,85 \pm 4,99$	$0,3923 \pm 0,026$
60	$332,87 \pm 5,41$	$0,3731 \pm 0,009$

*Valor médio $\pm$ desvio padrão, n=3.

Na Tabela 5.4, observa-se que a u_{mf} e ΔP_{max} teve uma diminuição no seu valor com o aumento da temperatura. Isto se dá, devido ao ar de secagem se tornar menos denso, favorecendo a diminuição da velocidade de mínima fluidização e queda de pressão no leito. O aumento da temperatura do gás proporciona o aumento da sua viscosidade e, consequentemente o potencial de arraste dos sólidos cresce. Este comportamento é o mesmo encontrado por outros autores, como é o caso de Freitas (2016), onde o autor apresenta um estudo fluidodinâmico de sementes de cornichão em leito fluidizado, comprovando que essas sementes se adaptam bem a esse tipo de secagem.

5.5. Secagem das sementes de trevo vesiculoso

Primeiramente, utilizou-se técnicas de planejamento experimental para tratar os valores de G_{total} (%), obtidos através das condições experimentais descritas na Tabela 4.1. Utilizou-se o *software Statistica 7.0* para ajustar os valores experimentais obtidos aos modelos empíricos sem interação e com interação entre as variáveis independentes do processo. Foram obtidos valores de coeficiente de determinação ($R^2=0,3361$) menores que 0,35, portanto não se optou em não se aprofundar nesta análise estatística.

Considerando o texto descrito acima, optou-se por determinar os parâmetros de ajustes cinéticos dos modelos e os valores de difusividade efetiva, coeficiente de determinação e do erro relativo para cada condição de secagem estudada e ajustadas pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, de Henderson e de Midilli que são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5. 5 - 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	$k \text{ (h}^{-1}\text{)}$	R^2	X^2	$P \text{ (}\%\text{)}$	$D_{ef}(\text{m}^2/\text{s})$					
1	1,48	0,683	0,074	13,68	$3,86 \times 10^{-11}$					
2	2,14	0,906	0,052	14,75	$6,42 \times 10^{-10}$					
$\frac{3}{4}$	2,08	0,957	0,026	11,04	$6,55 \times 10^{-10}$					
5	2,29	0,923	0,076	17,76	$6,00 \times 10^{-10}$					
6	2,22	0,899	0,100	20,07	$5,80 \times 10^{-10}$					
Ajuste do Modelo de Page										
Ensaio	$k \text{ (h}^{-1}\text{)}$	N	R^2	X^2	$P \text{ (}\%\text{)}$	$D_{ef}(\text{m}^2/\text{s})$				
1	1,02	0,48	0,988	0,004	2,37	$4,11 \times 10^{-10}$				
2	1,61	0,67	0,991	0,005	3,82	$4,22 \times 10^{-10}$				
$\frac{3}{4}$	1,66	0,74	0,997	0,002	2,94	$4,33 \times 10^{-10}$				
5	1,72	0,69	0,991	0,012	7,00	$4,50 \times 10^{-10}$				
6	1,92	0,65	0,990	0,027	9,56	$4,75 \times 10^{-10}$				
Ajuste do Modelo de Henderson										
Ensaio	A_I	B_I	C_I	$k \text{ (h}^{-1}\text{)}$	$k_o \text{ (h}^{-1}\text{)}$	$k_l \text{ (h}^{-1}\text{)}$	R^2	X^2	$P(\%)$	$D_{ef}(\text{m}^2/\text{s})$
1	0,17	0,38	0,45	39,62	3,22	0,24	0,981	0,006	2,38	$7,58 \times 10^{-9}$
2	0,21	0,39	0,40	28,93	1,50	1,50	0,978	0,005	4,05	$1,04 \times 10^{-8}$
$\frac{3}{4}$	0,07	0,62	0,31	44,83	3,20	0,53	0,996	0,002	2,28	$1,17 \times 10^{-8}$
5	0,37	0,31	0,31	8,40	1,21	1,21	0,977	0,022	7,26	$1,64 \times 10^{-9}$
6	0,56	0,22	0,22	6,08	0,61	0,61	0,993	0,100	21,4	$1,59 \times 10^{-9}$
Ajuste do Modelo de Midilli										
Ensaio	A	B	$k(\text{h}^{-1})$	N	R^2	X^2	$P(\%)$	$D_{ef}(\text{m}^2/\text{s})$		
1	0,99	0,05	1,13	0,53	0,985	0,075	15,22	$2,94 \times 10^{-11}$		
2	1,00	-0,26	0,913	0,44	0,988	0,109	34,79	$2,39 \times 10^{-10}$		
$\frac{3}{4}$	1,00	-0,31	1,03	0,61	0,997	0,016	7,786	$2,69 \times 10^{-10}$		
5	1,00	0,02	1,81	0,71	0,981	0,157	49,52	$4,72 \times 10^{-10}$		
6	1,00	0,15	2,32	0,80	0,992	0,279	63,99	$6,05 \times 10^{-10}$		

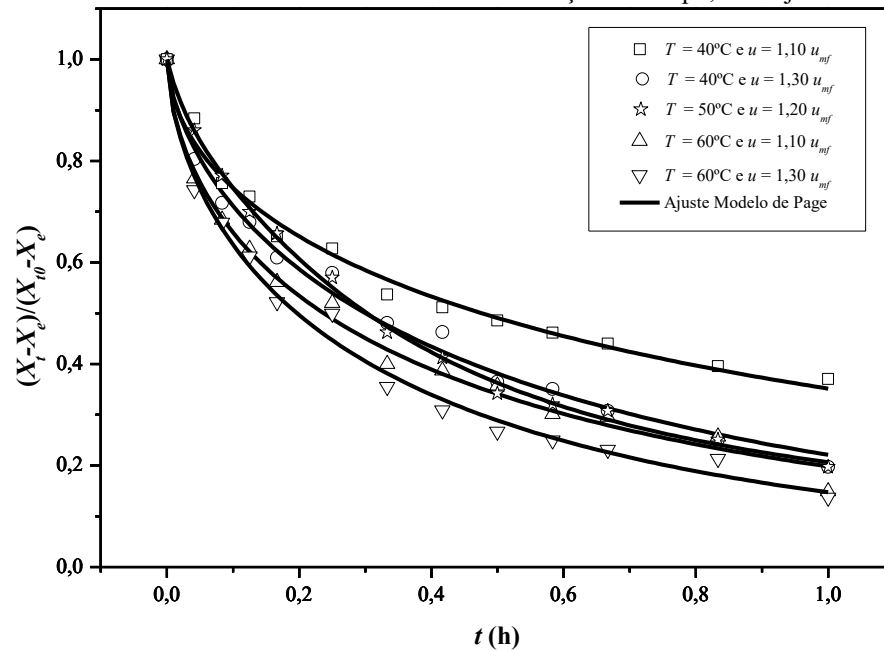
A Tabela 5.5 demonstra que o modelo de Page apresentou os melhores ajustes em relação aos demais modelos utilizados. O coeficiente R^2 foi o primeiro critério estatístico para selecionar a melhor correlação. A grande maioria dos valores dos R^2 foram acima de 0,98, que segundo Madamba et al., (1996), significa um bom ajuste do modelo para a representação do fenômeno de secagem. Isso foi reforçado também pelos menores valores obtidos do X^2 , entre 0,004 e 0,027. Segundo Vidal (2000) quanto maior o valor de R^2 e menores os valores de X^2 melhor o ajuste. Afonso Junior (1999) para o estudo da secagem sementes de feijão, Souza et al., (2004) com o estudo da secagem de feijão, Hoffsky et al., (2009) para a secagem de abacaxi em fatias e Menezes et al., (2013) na secagem de bagaço de maracujá amarelo obtiveram valores de R^2 acima de 0,98 para o mesmo modelo. Para o teste (P_p), pode-se observar que praticamente todos os modelos tiveram valores superiores a 10%, com exceção

para o modelo de Page, tornando este critério não desejável ao ajuste de alguns modelos. Desta forma, o modelo de Page apresentou os melhores resultados segundo os critérios de correlação dos modelos.

Ainda analisando a Tabela 5.5, é possível verificar que os valores encontrados para difusividade efetiva (D_{ef}) aumentaram com o 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^{-9} a 10^{-11} m²/s. No presente trabalho, os valores de difusividade efetiva encontram-se na faixa apresentada pelo autor. Pela análise física da Tabela 5.5, observa-se também 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 Figura 5.6 são apresentadas as curvas do adimensional de água livre em função do tempo juntamente com os ajustes dos dados aos modelos de Page para as sementes de trevo reumidificadas e secas nas temperaturas de 40, 50 e 60°C e velocidades do ar de 10, 20 e 30% acima da mínima fluidização.

Figura 5. 6 - Curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo de Page



Analisando a Figura 5.6 pode-se perceber que todas as curvas apresentaram um comportamento típico 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 (FOUST, 2012). Sendo a secagem uma operação que envolve a transferência simultânea de calor e de massa, é esperado que modificações na temperatura do ar e na velocidade do ar ocasionem mudanças nos valores das parcelas condutiva e convectiva dos balanços dos fenômenos de transferência para o regime não permanente da secagem. Ao que se refere a parcela condutiva, o aumento no valor da temperatura do ar promove uma diminuição na umidade relativa do ar de secagem. Esse fato ocasiona um aumento na diferença de concentração de umidade existente entre o ar de secagem e o material sólido, aumentando assim a força motriz do processo de transferência de massa e uma diminuição no tempo de secagem.

Para o caso da parcela convectiva, as mudanças que ocorrem quando a temperatura e a velocidade do ar são alteradas, podem ser explicados com embasamento na lei de Newton do resfriamento. Um aumento na temperatura do ar promove um aumento na diferença de temperatura existente entre o ar de secagem e o material sólido, aumentando assim a taxa de transferência de calor por convecção. Já o aumento na velocidade do ar ocasiona uma elevação no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, aumentando também a taxa de transferência de calor por convecção. Esse aumento na taxa de transferência de calor por convecção promove um aumento na força motriz do processo e uma diminuição no tempo de secagem, proporcionando uma diminuição no valor da umidade final.

A Tabela 5.6 apresenta os valores da umidade final em base úmida (U_{BU}) e da germinação (G) das sementes que passaram pelo processo de secagem nas diferentes condições experimentais estudadas neste trabalho.

Tabela 5. 6: Germinação das sementes de trevo com suas respectivas umidades final.

Ensaio	U_{BU} (%) inicial $\pm$ desvio*	U_{BU} (%) final $\pm$ desvio*	G_{0h} (%) $\pm$ desvio*	G_{36h} (%) $\pm$ desvio*	G_{sec} (%) $\pm$ desvio*
1 (40°C e 1,1 u_{mf})	11,79 ^a $\pm$ 0,51	7,82 ^a $\pm$ 0,19	72,00 ^a $\pm$ 1,00	76,67 ^a $\pm$ 0,58	75,00 ^a $\pm$ 1,00
2 (40°C e 1,3 u_{mf})	12,02 ^a $\pm$ 0,83	7,98 ^{a,b} $\pm$ 0,17	71,67 ^{a,b} $\pm$ 1,53	79,67 ^{a,b} $\pm$ 1,53	77,67 ^{a,b} $\pm$ 1,53
3/4 (50°C e 1,2 u_{mf})	14,86 ^b $\pm$ 0,67	7,06 ^{a,b,c} $\pm$ 0,41	70,33 ^{a,b,c} $\pm$ 0,58	77,33 ^{a,b,c} $\pm$ 0,58	76,67 ^{a,b,c} $\pm$ 0,58
5 (60°C e 1,1 u_{mf})	16,87 ^c $\pm$ 0,63	7,31 ^{a,b,c,d} $\pm$ 0,13	70,67 ^{a,b,c,d} $\pm$ 1,53	77,67 ^{a,b,c,d} $\pm$ 1,15	75,33 ^{a,b,c} $\pm$ 0,58
6 (60°C e 1,3 u_{mf})	15,83 ^{b,c} $\pm$ 0,32	6,81 ^{c,d} $\pm$ 0,21	70,67 ^{a,b,c,d} $\pm$ 1,53	79,66 ^{a,b,c,d} $\pm$ 1,53	78,00 ^d $\pm$ 1,00

* U_{BU} inicial é a umidade após 36h de reumidificação, U_{BU} final é umidade após secagem G_{0h} é a germinação da semente controle, G_{36h} é a germinação após 36h de reumificação e G_{sec} é germinação após secagem. Letras minúsculas distintas na mesma coluna, correspondem a diferenças significativas, pelo teste Tukey a 5% de significância.

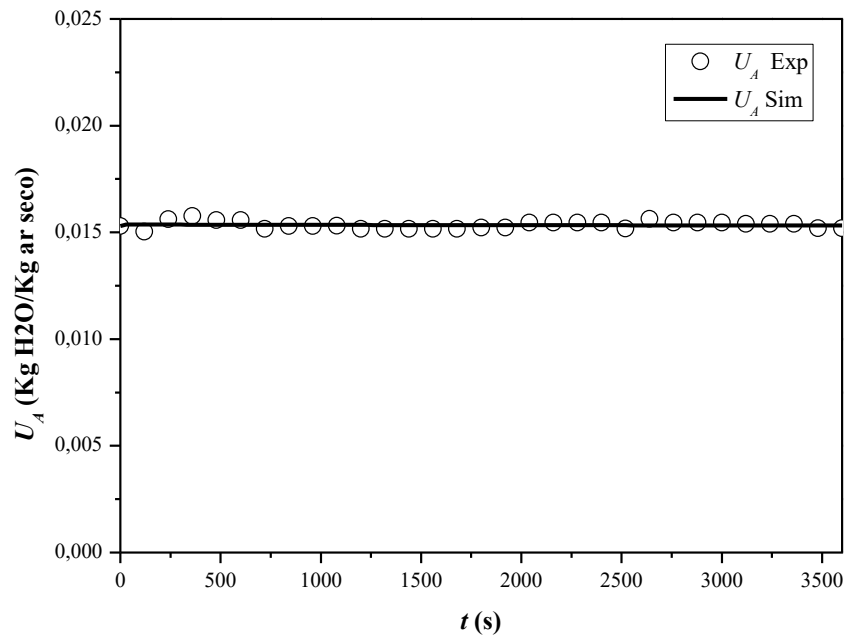
Pela Tabela 5.6 observa-se que o aumento da temperatura de 40 °C (ensaio 1 e 2) para 60°C (ensaio 5 e 6) causou uma diminuição no valor da umidade final em base úmida das sementes de trevo. Em relação à germinação, é observado que os valores encontrados estão na ordem de 75 a 78 % para as amostras secas artificialmente. Dentre as secagens, a amostra que obteve o maior valor médio de germinação, com valor de 78 %, foi a realizada no ensaio 6 ($T = 60^\circ\text{C}$ e $u = 1,30 u_{mf}$). Os valores para as germinações obtidas encontram-se superiores aos encontrados antes da secagem e reumidificação, bem como ao valor de 70% estabelecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa) (MITTELMANN et al., 2012). Este aumento da germinação total pode estar sendo ocasionado pelo processo de reumidificação (possível quebra de dormência) realizado antes da secagem, indicando que a secagem artificial não modificou a qualidade fisiológica das sementes.

5.6. Modelo de Secagem para Sementes de Trevo Vesiculoso

As Figuras 5.7 a 5.12 apresentam os resultados do modelo de secagem juntamente aos dados experimentais para a 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 a condição apresentada nas Figuras 5.7 a 5.12, os resultados das outras condições de secagem estudadas encontram-se para consulta e análise no Apêndice 4.

Figura 5. 7 – Resultados experimentais e simulados para a U_A em função do t .



Na Figura 5.7 é observado que o valor de U_A tem um comportamento constante, onde praticamente não ocorre variação em função do tempo de secagem. Isto se justifica pelo fato das sementes apresentarem baixo teor de umidade inicial ($U_{BU}= 11,79\%$), estando estas submetidas a grandes quantidades de ar em temperaturas superiores. Também é verificado que o modelo descreveu satisfatoriamente o comportamento dos dados experimentais, pois apresentou sobreposição dos valores de U_A .

Figura 5.8 – Resultados experimentais e simulados para a U_R em função do t .

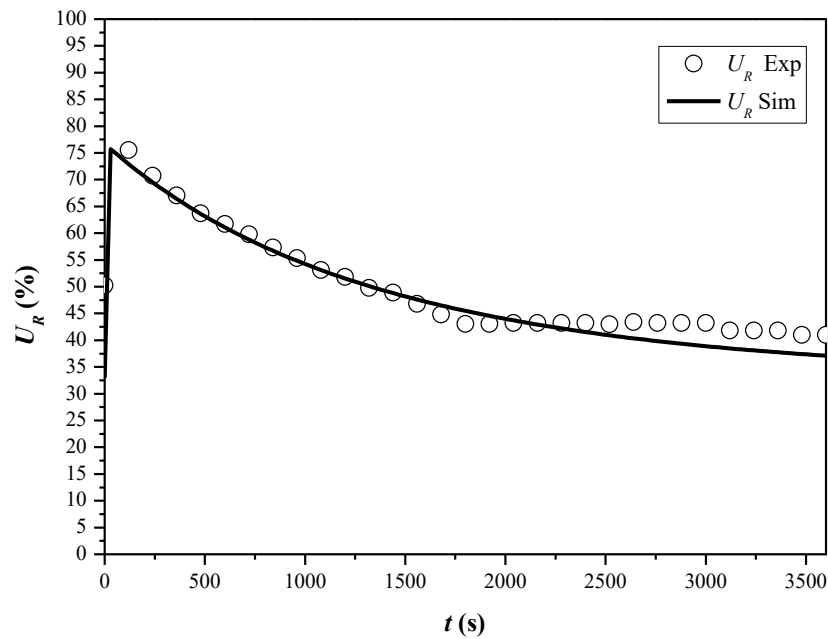
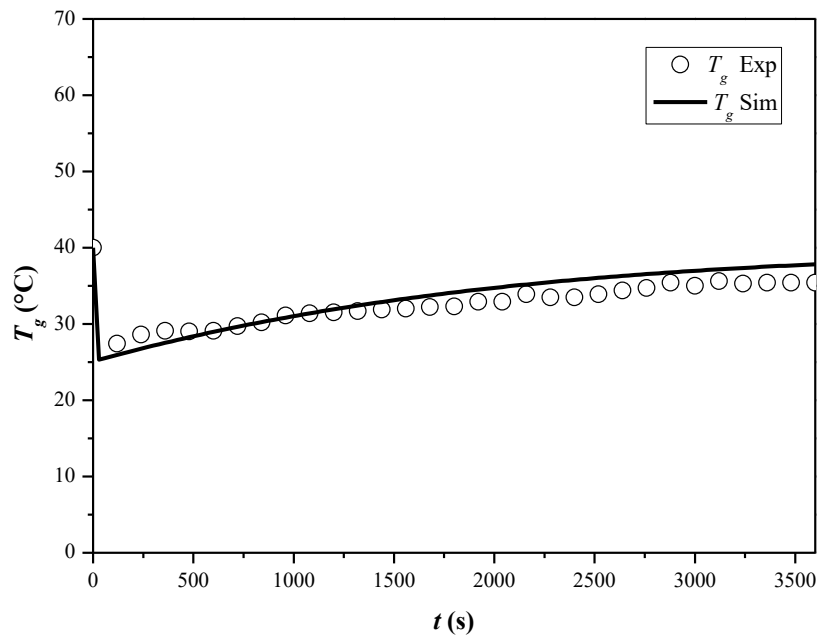


Figura 5.9 – Resultados experimentais e simulados para a T_g em função do t .



Nas Figuras 5.8 e 5.9, observa-se um aumento da umidade relativa ao mesmo instante do decaimento da temperatura do gás no início da secagem. Isto se explica pela diferença de temperatura entre o gás e as sementes, já que o gás nos instantes iniciais do processo transfere energia na forma de calor para as sementes seguindo a lei do resfriamento de Newton, em que a taxa da troca de calor é 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. Segundo Bekkiou et al.; (2009), a umidade relativa do ar reage

inversamente ao comportamento da temperatura, ou seja, quando uma cresce a outra decresce. Rizzi Jr. et al.; (2007), constatou que o modelo de três formas modificado se ajustou de maneira adequada ao comportamento do processo de secagem com relação a umidades do ar de secagem, obtendo curvas parecidas ao encontrada neste trabalho. Ainda sobre as Figuras 5.8 e 5.9 observa-se que a sobreposição dos resultados do modelo em relação aos dados experimentais previu de forma satisfatória o processo de secagem para estas variáveis.

Figura 5. 10 – Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} em função do t .

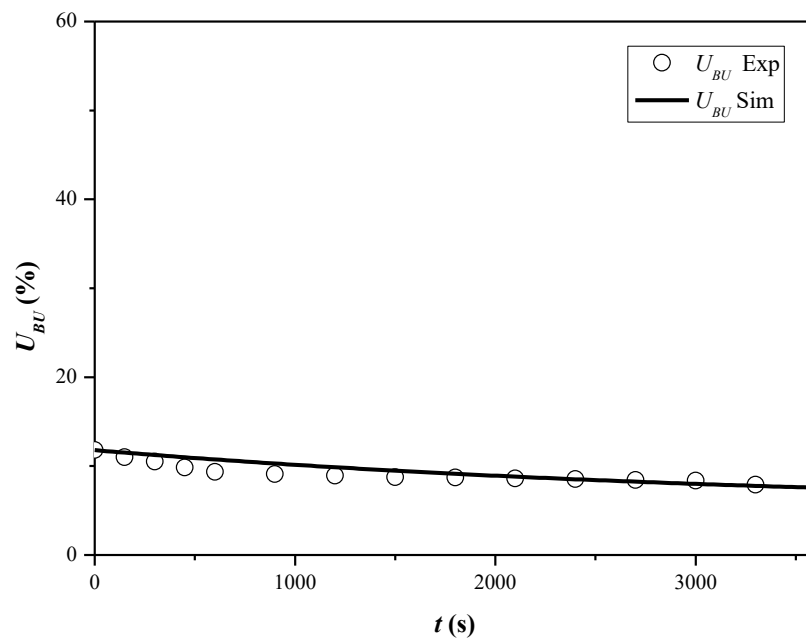
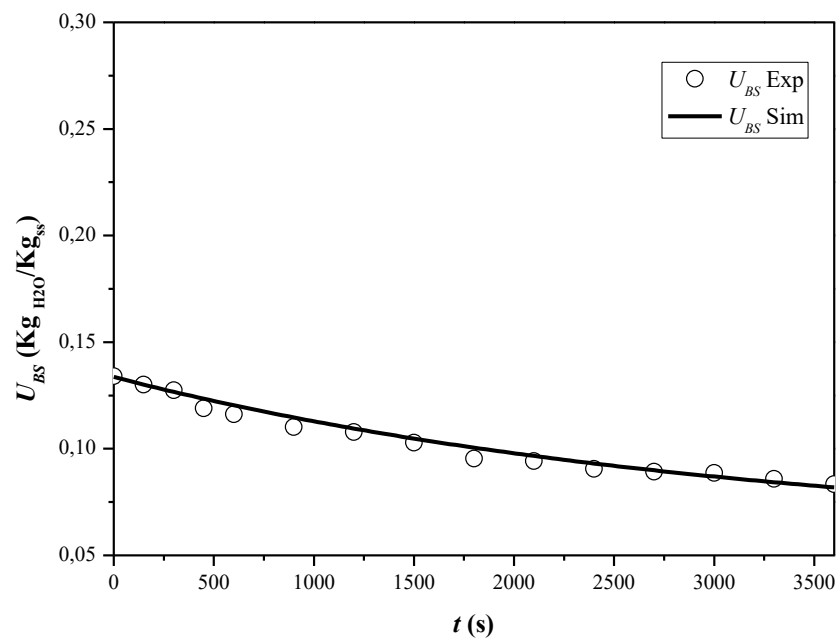
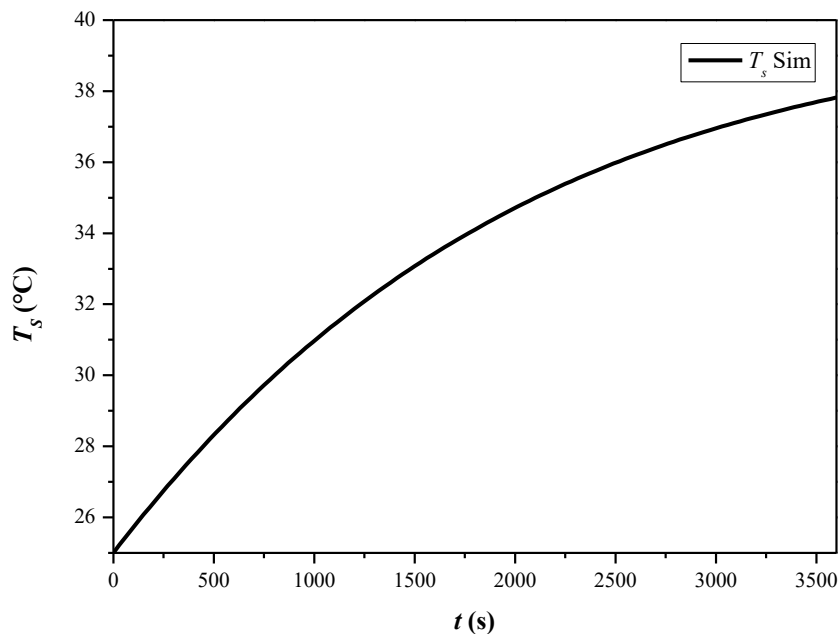


Figura 5. 11 – Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} em função do t .



Assim como descrito para as Figuras 5.8 e 5.9, observa-se nas Figuras 5.10 e 5.11 que a taxa de transferência de energia gerada pela diferença de temperatura entre as sementes e o ar de secagem diminui com o tempo, e por consequência diminui a taxa de secagem e retirada de água do material, tendendo ao equilíbrio se o processo fosse executado com o tempo tendendo ao infinito. Contudo, o modelo de duas fases adotado neste trabalho previu com sucesso o transporte de calor e massa entre as fases presentes no leito, sendo possível observar um comportamento satisfatório do modelo junto aos dados experimentais, onde a diminuição da umidade das sementes segue o comportamento esperado pela operação de secagem. Oliveira Jr. (2003) encontrou um comportamento parecido trabalhando com alumina e sílica-gel em leito fluidizado e vibro fluidizado, Prado (2004) para sementes de mamão em leito fixo e Albin (2019) para sementes de cevada em leito fixo, utilizando o mesmo modelo simplificado de Massarani e Silva Telles (1992).

Figura 5. 12 – Resultados simulados para a T_s em função do t .



Devido à dificuldade de medição da temperatura do sólido durante o processo de secagem, não foi possível traçar o perfil de temperatura das sementes experimentalmente, somente através do modelo proposto como apresentado na Figura 5.12. Mesmo com isso é observado que o comportamento da curva simulada possui uma coerência com o esperado para a física do processo.

A Tabela 5.7 apresenta os valores do coeficiente global de transferência de massa (K_p) e a germinação total (G_{sec}) relacionada a contagem total no 7º dia de análise para cada condição de secagem estabelecida.

Tabela 5. 7: Resultados de K_p em comparação com a germinação para cada condição de secagem.

Ensaio	Condição	K_p (kg/m ² . s)	G_{sec} (%) $\pm$ desvio*
1	(40°C e 1,1 U_{mf})	1,03E-04	75,00 $\pm$ 1,00
2	(40°C e 1,3 U_{mf})	1,10E-04	77,67 $\pm$ 1,53
$\frac{3}{4}$	(50°C e 1,2 U_{mf})	1,41E-04	76,67 $\pm$ 0,58
5	(60°C e 1,1 U_{mf})	1,28E-04	75,33 $\pm$ 0,58
6	(60°C e 1,3 U_{mf})	1,33E-04	78,00 $\pm$ 1,00

* G_{sec} é germinação total após secagem.

Verifica-se pela Tabela 5.7 que a mudança de velocidade do ar de secagem sob a mesma condição de temperatura de 40°C (Ensaio 1 e 2) e de 60°C (Ensaio 5 e 6) resultou no aumento no valor de K_p de 1,03 para 1,10 x10⁻⁴ kg/m².s e 1,28 para 1,33x10⁻⁴ kg/m².s, respectivamente. Ainda pela Tabela 5.7 é possível observar que a mudança de temperatura nas condições de velocidade de 1,1 U_{mf} (Ensaio 1 e 5) e 1,3 U_{mf} (Ensaio 2 e 6) elevaram de maneira mais significativa o valor de K_p , onde estes foram de 1,03 para 1,28x10⁻⁴ kg/m².s para os ensaios 1 e 5 e de 1,10 para 1,33x10⁻⁴ kg/m².s para os ensaios 2 e 6. Ndukwu et al., (2017) trabalhando com fatias de Inhame observou que o coeficiente de transferência de massa aumentou com a variação da temperatura de 50 para 70°C. Zielinska & Markowski (2007) também obtiveram um comportamento crescente do coeficiente de transferência de massa da secagem de cenouras variando a temperatura de 60 a 90°C.

Pode-se também observar pela Tabela 5.7 um aumento mais significativo do K_p com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem juntos. A consequência desse aumento no resultado das germinações é benéfica, aumentando os valores de germinação de 75,00 $\pm$ 1,00 para 78,00 $\pm$ 0,95 %. 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 não impossibilitou a germinação, demonstrando que a secagem não alterou a qualidade fisiológica das sementes.

Como discutido no item 4.3.6 da seção de materiais e métodos, a obtenção do coeficiente global de transferência de massa (K_p) deu-se através de atribuições de valores no modelo visando a sobreposição dos resultados simulados com os dados experimentais. Desse modo, foi necessário realizar uma análise de sensibilidade paramétrica para o K_p a fim de observar a sua influência nos resultados obtidos para a 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}). Essa análise para a condição de 40°C e 1,1 U_{mf} é apresentada nas Figuras 5.13 a 5.18.

Figura 5.13 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_g .

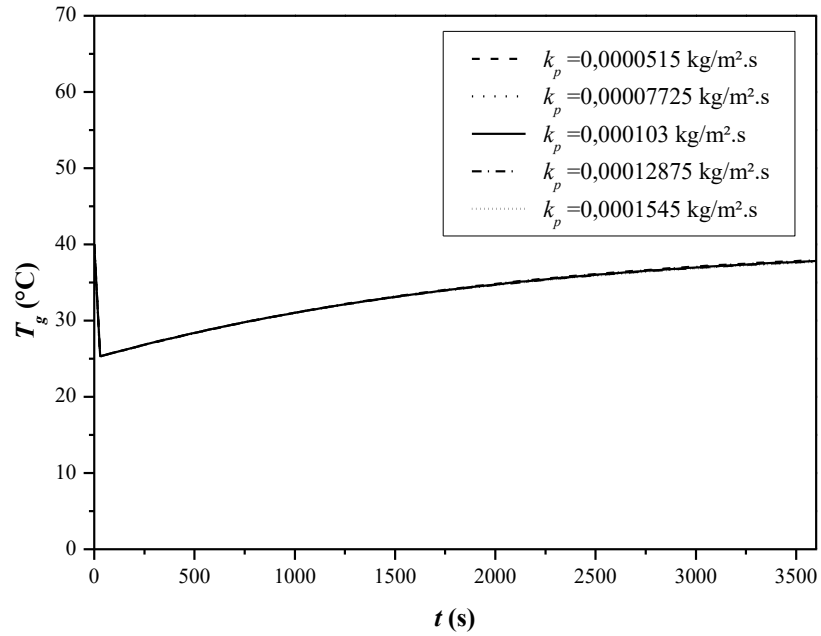


Figura 5.14 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a T_s .

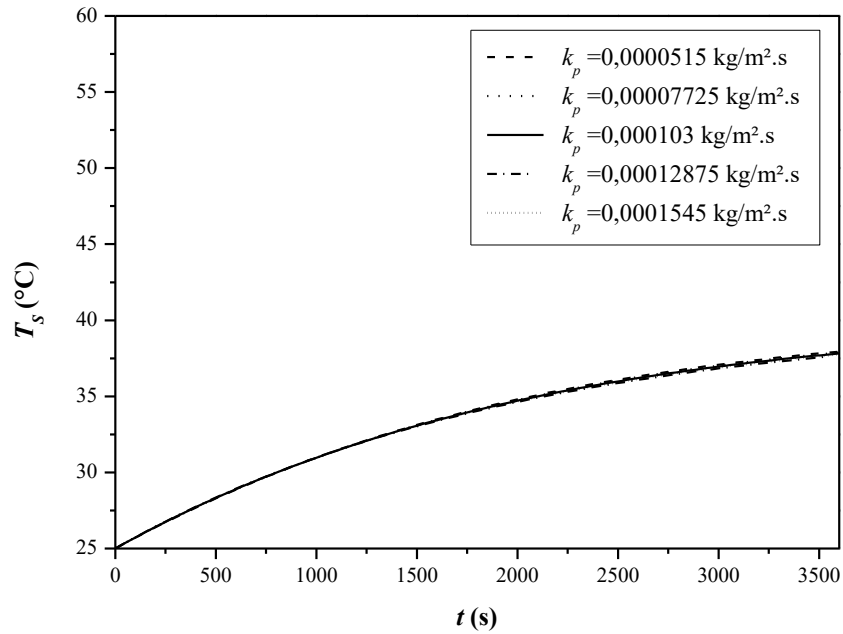


Figura 5. 15 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_R .

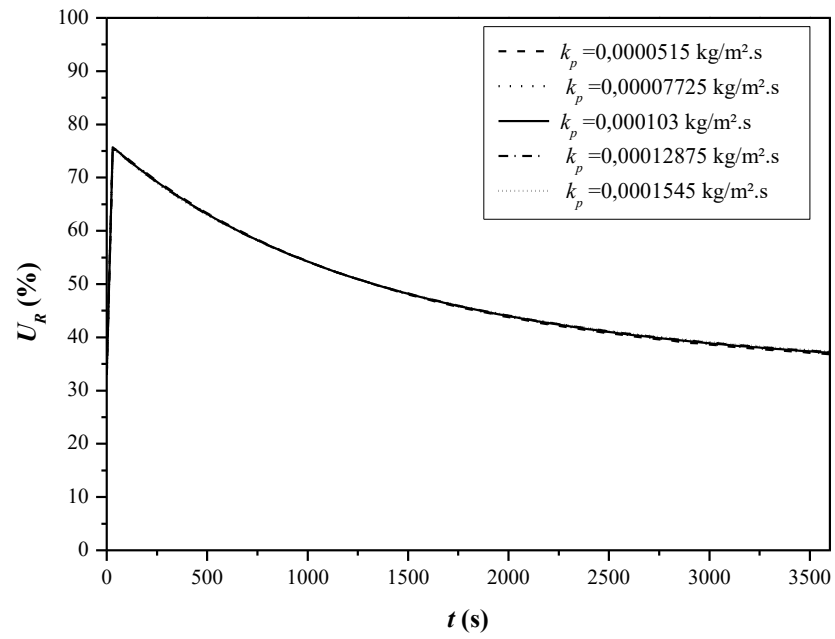


Figura 5. 16 – Análise de sensibilidade paramétrica para K_p em relação a U_A .

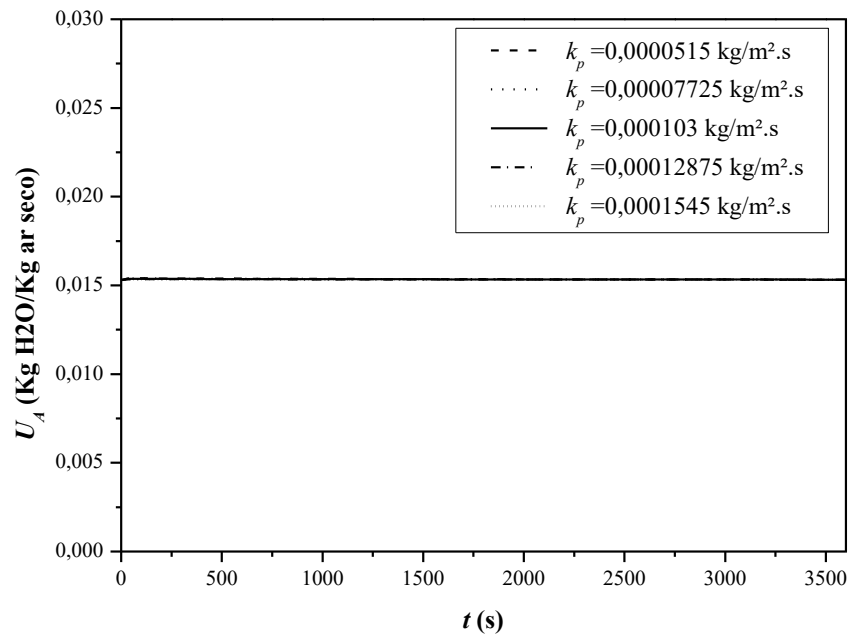


Figura 5. 17 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BU} .

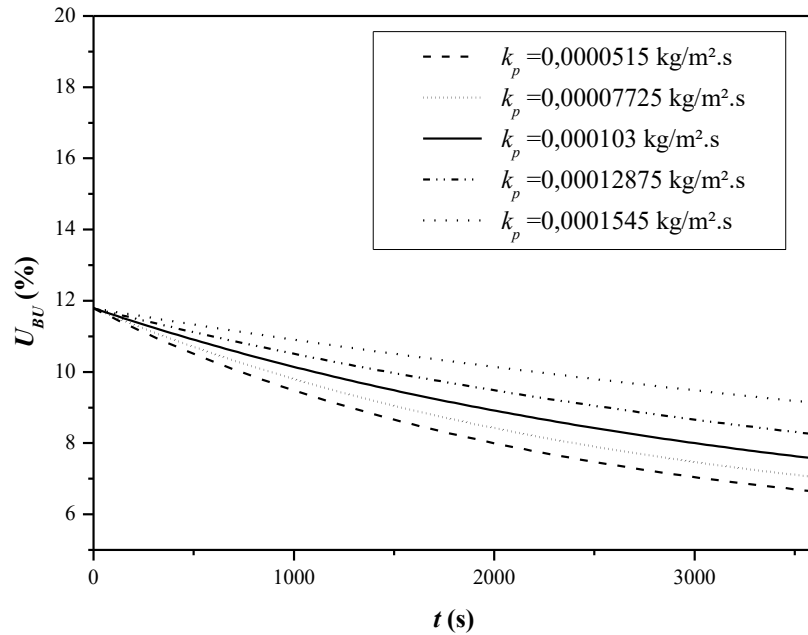
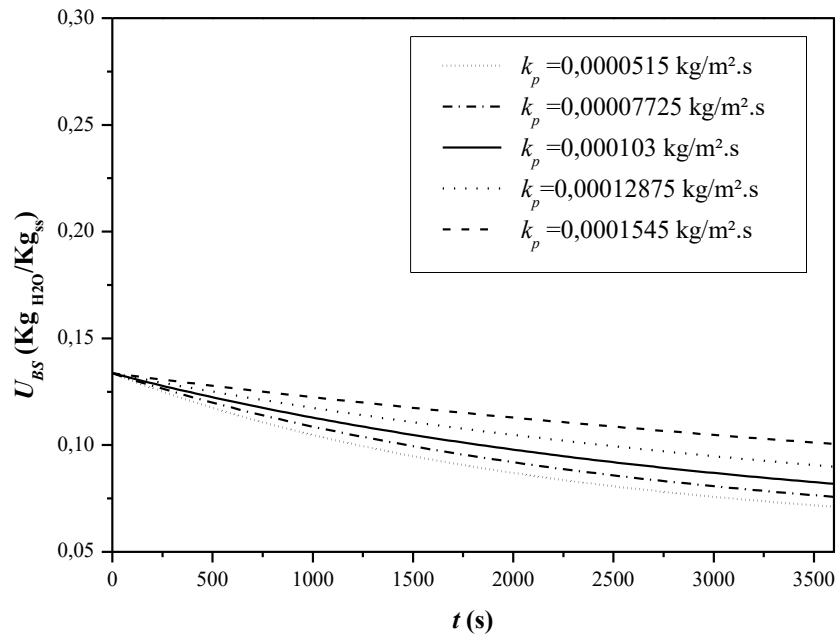


Figura 5. 18 – Análise de sensibilidade paramétrica para o K_p em relação a U_{BS} .



É possível observar nas Figuras 5.13 a 5.18 que a mudança do K_p de um baixo valor da ordem de 10^{-5} até um valor da ordem de 10^{-4} apresentou mudança nos resultados de U_{BU} e U_{BS} . Nestas figuras, o aumento ou a diminuição do coeficiente global de transferência de massa (K_p), antecipa ou prolonga 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 5.13 a 5.18, o K_p não ocasiona grandes diferenças na T_g , T_s , U_A , e U_R . Freitas (2016)

obteve um comportamento parecido de sensibilidade paramétrica trabalhando com sementes de cornichão.

Também foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} devido a inexistência desta variável para sementes de trevo na literatura. Os resultados para análise da variação do C_{pss} são apresentados nas Figuras 5.19 a 5.24.

Figura 5. 19 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_g .

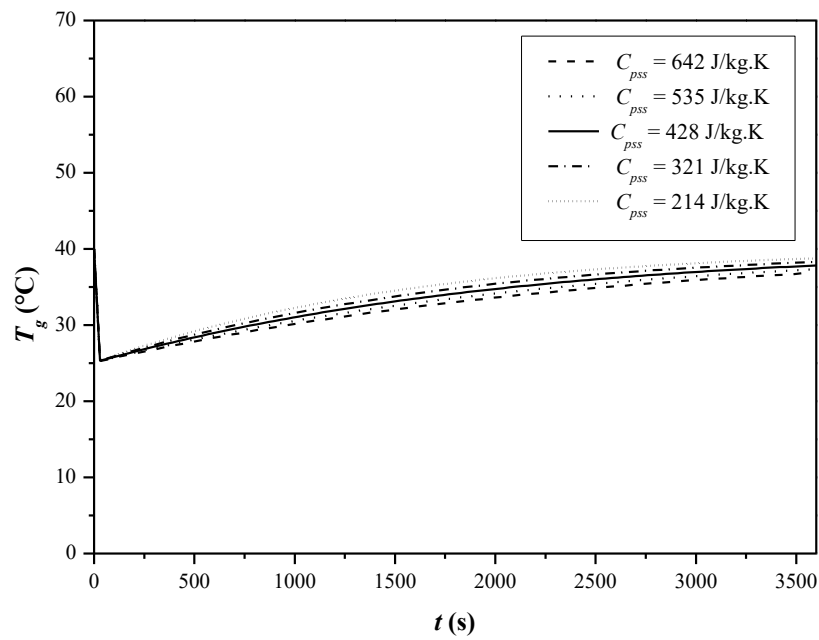


Figura 5. 20 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a T_s .

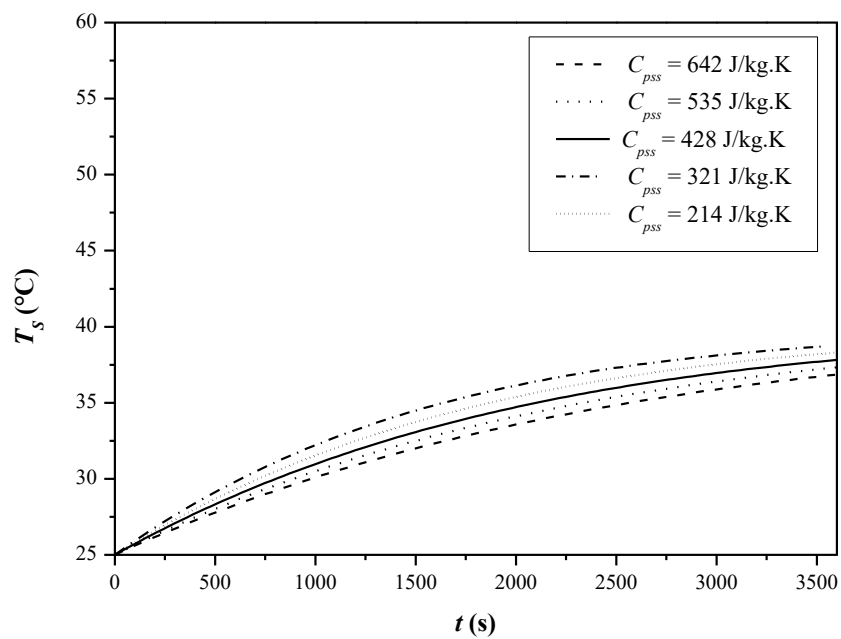


Figura 5. 21 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_R .

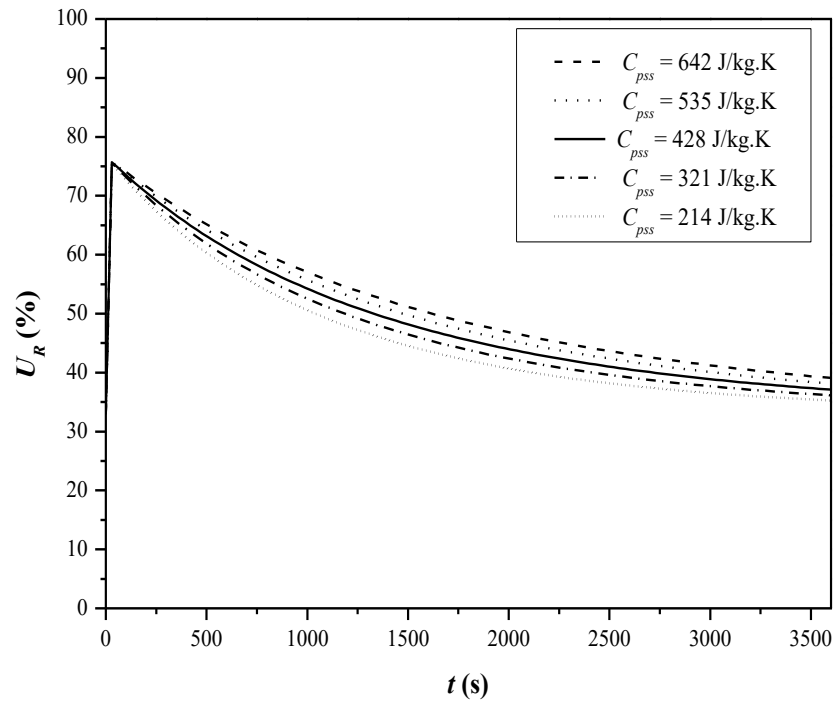


Figura 5. 22 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_A .

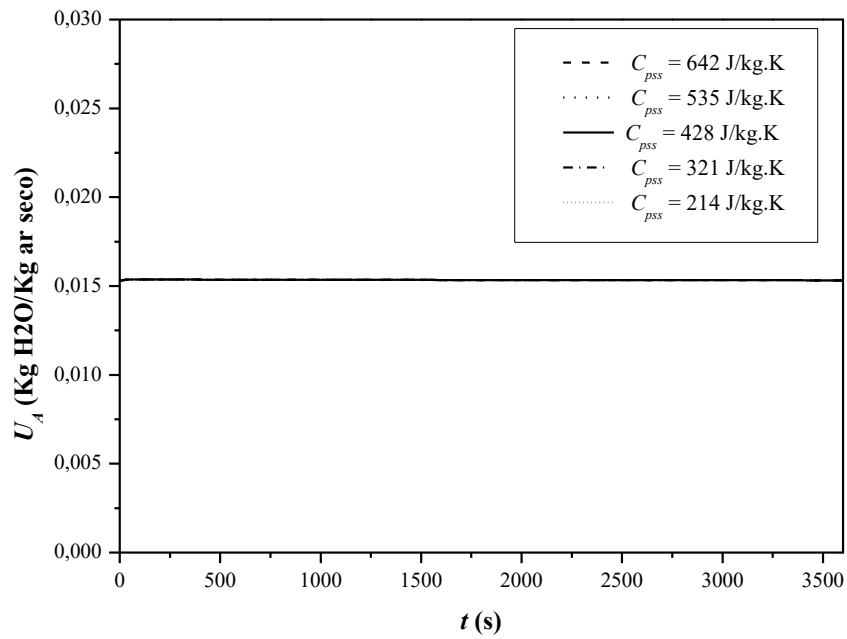
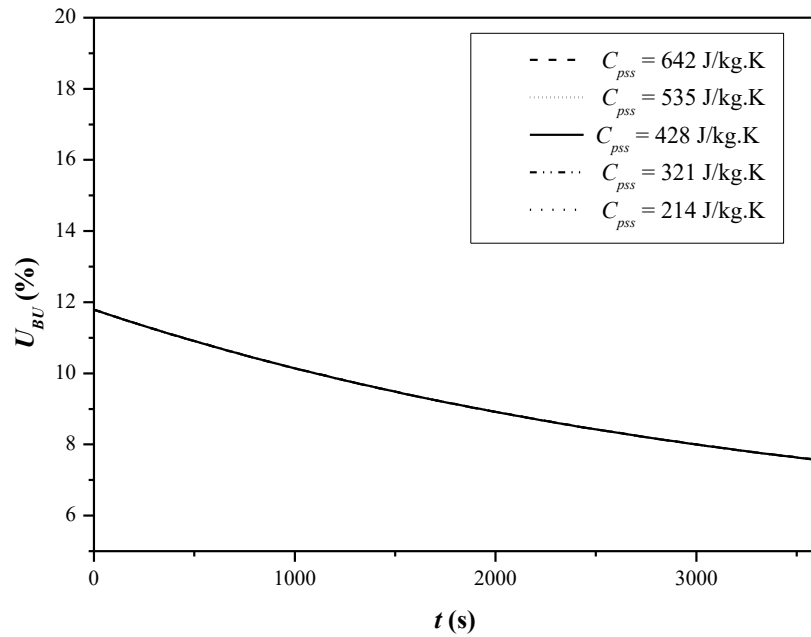
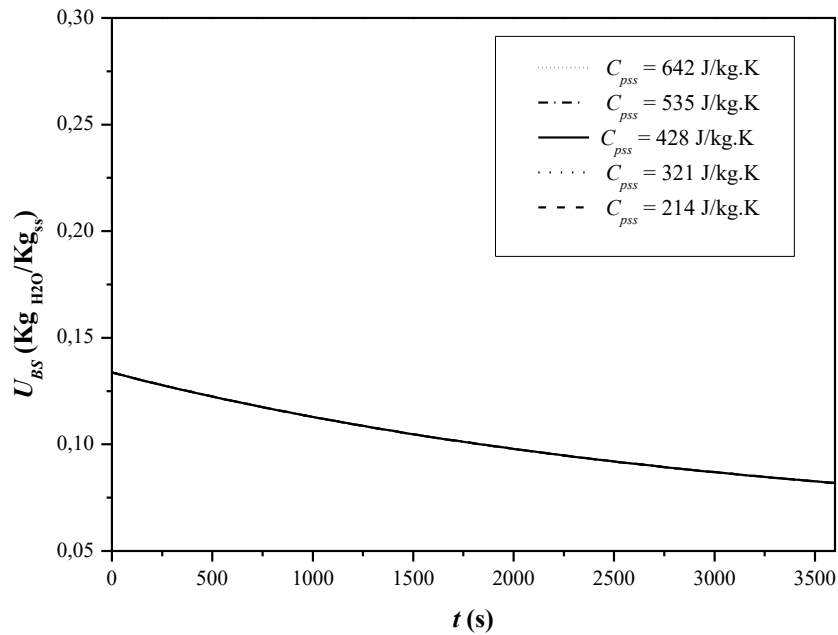


Figura 5. 23 – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BU} .**Figura 5. 24** – Análise de sensibilidade paramétrica para o C_{pss} em relação a U_{BS} .

É observado nas Figuras 5.19 a 5.24 que mesmo com a redução até o valor de 204 J/kg.K e a elevação até o valor de 642 J/kg.K utilizado para o C_{pss} , 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 consequentemente altera o valor de U_R , como visto na Equação 23. A diferença sofrida pelo modelo com a variação do C_{pss} não são significativas, classificando o valor utilizado como válido para o modelo.

6. CONCLUSÃO

Na caracterização física das sementes de trevo foi observado um valor de umidade em base úmida de $7,26 \pm 0,108$ %, de diâmetro de *Sauter* de $1,59 \pm 0,013$ mm, de massa específica de partícula de $1364 \pm 0,001$ kg/m³, de massa específica aparente de $786 \pm 0,003$ kg/m³, de porosidade do leito estático de $0,424 \pm 0,007$, de esfericidade de $0,97 \pm 0,02$, de ângulo de repouso de $28,47 \pm 0,609$ ° e de germinação total de $73,00 \pm 1,154$ % para sementes *in natura*.

Na reumidificação das sementes em atmosfera saturada o melhor arranjo encontrado foi para a temperatura de 40°C no tempo de 36 h, resultando-se no aumento da umidade em base úmida de 7,47 para 12,02 % e não alterando a germinação total de $79,66 \pm 1,52$ %.

O modelo de BET mostrou-se adequado para descrever a atividade de água das sementes de trevo vesiculoso, proporcionando os melhores valores preditos que os demais e descrevendo satisfatoriamente as características de hidratação das sementes.

Para as condições fluidodinâmicas estudadas neste trabalho, obteve-se valores de queda de pressão máxima na faixa de 332,87 a 353,22 Pa e velocidade de mínima fluidização de 0,3721 a 0,4187 m/s para as temperaturas de secagem.

Para o estudo relacionado às curvas da cinética de secagem das sementes de trevo vesiculoso conclui-se que as mesmas obtiveram um comportamento típico de secagem. A avaliação das curvas adimensional de umidade livre em função do tempo mostrou que o aumento na temperatura e velocidade do ar de secagem acarretaram no aumento na força motriz de secagem, resultando na diminuição da umidade das sementes.

Para o ajuste dos dados aos modelos propostos observou-se que levando em consideração altos valores R^2 , baixos valores de X^2 e P_p , o modelo de Page foi satisfatório para os ensaios de secagem, com coeficiente de determinação acima de 0,98. Para a difusividade efetiva dos modelos analisados constatou-se que em relação à mudança de temperatura foi visto que a modificação no valor de 40 °C para 60 °C acarretou também num aumento na difusividade, devido a elevação na temperatura causar um aumento na força motriz de secagem, sendo valores esses encontrados dentro da faixa para materiais orgânicos.

Em relação a análise de umidade final, conclui-se que a temperatura foi a variável que mais influenciou nas sementes de trevo. Os valores para as germinações obtidas encontram-se

superiores aos encontrados antes da secagem, indicando que a secagem artificial não modificou a qualidade fisiológica das sementes.

O estudo comparativo entre os dados obtidos experimentalmente e o modelo proposto para secagem, mostrou que a simulação previu de forma satisfatória a secagem de trevo vesiculoso em leito fluidizado. Através do modelo foi possível obter o valor do coeficiente global de transferência de massa para cada condição de secagem, onde se conclui que o K_p cresce com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem, encontrando-se valores que foram de $5,15 \times 10^{-5}$ a $1,54 \times 10^{-4}$ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ para a temperatura de 40°C e $1,1 U_{mf}$.

No estudo da influencia do coeficiente global de transferência de massa com a germinação das sementes de trevo, conclui-se que o aumento do K_p aumentou o índice de germinação. Pode-se também observar um aumento mais significativo do K_p com o aumento da temperatura e velocidade do ar de secagem juntos. A consequência desse aumento no resultado das germinações é benéfica, aumentando os valores de germinação de $75,00 \pm 1,00$ para $78,00 \pm 0,95$ %.

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 trevo, com suas variações na análise de sensibilidade paramétrica do modelo, conclui-se que o K_p encontrado foi o melhor possível para previsão da operação de secagem de sementes de trevo em leito fluidizado, bem como o valor do C_{pss} utilizado de outra semente forrageira não influenciou significativamente na simulação da operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystmas Engineering**, v.93, n.2, p.179-188, 2006.

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

ALBINI, G. et al. Secagem de Grãos de Cevada (*Hordeum Vulgare*) em Leito Fixo. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ**. Fortaleza-CE. 2016.

ALBINI, G. **Reumidificação, caracterização e secagem de grãos de cevada em leito fixo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 86 p., 2015.

ALBINI, G. ; FREIRE, F. B. ; FREIRE, J. T. Modelagem e simulação da transferência de calor e massa: estudo de caso para secagem de grãos de cevada em leito fixo. In: José Teixeira Freire; Geisa Albini. (Org.). **Tópicos Especiais em Sistemas Particulados** - Vol 5. 1 ed.São Carlos: CS (e-book), 2019, v. 5, p. 91-116.

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

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

ARAÚJO, F. R.; ROSINHA, G. M. S.; BIER, D.; CHIARI, L.; FEIJÓ, G. L. D.; GOMES, R. C. Segurança do Alimento Carne. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Gado de Corte**, Campo Grande, 2017.

ARIM A. L. **Análise da secagem de sementes de mamão formosa (*Carica papaya* L.) utilizadas na adsorção do corante Vermelho do Congo.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa. Bagé, 2014.

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

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; AREGBESOLA, O. A.; ADEDEJI, M.A. Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50°C. **Journal of Stored Products Research**, 42, 290–30. 2006.

BALL, D. M.; HOVELAND, C. S.; LACEFIELD, G. D. **Southern forages.** Atlanta: Potash&PhosphateInstitute/ Foundation for AgronomicResearch, 1991.

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

BARREIRO, J. A., FERNANDEZ, S., SANDOVAL, A. J. Water sorption characteristics of six rowbarley malt (*Hordeum vulgare*). **Lebensm.-Wiss. U.-Technol.**, 36, 37–42. 2003.

BEKKIOU, N.; ZOULALIAN, A.; HAKAM, A.; BENTAYEB, F.; SESBOU, A. Modelling of a solar wood dryer with glazed walls. **Maderas. Ciencia y tecnología**, SciELO Chile, v. 11, n.3, p. 191-205, 2009.

BEVILAQUA, G. A. P; OLANDA, R. B. **Sistema de produção de forragem e de sementes de trevo vesiculoso para a agricultura familiar.** Pelotas RS: Embrapa Clima Temperado, 2011.

BILIADERIS, C. G. Thermal analysis of foods. **Elsevier Applied Science.** London –UR. 168-220. 1990.

BOLDRINI, I. L.; LONGHI-WAGNER, H. M.; BOECHAT, S. C. **Morfologia e Taxionomia de Gramíneas Sul-Rio-Grandenses**. Porto Alegre: UFRGS, 96 p., 2005.

BOROWSKI, D. Z. **Efeito do genótipo, ambiente e suas interações em características agronômicas e de qualidade em cevada cervejeira no sul do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

BOTELHO, F. M. **Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de coffea canéfora**. Tese de Doutorado. Programa de P's Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa MG, 2012.

BRANTESTAM, A. K. **A Century of Breeding – Is Genetic Erosion a Reality? Temporal Diversity Changes in Nordic and Baltic Barley**. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, 33p. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 691 de 22 de novembro de 1996. **Diário Oficial da União**, 25 nov. 1996. Seção 1, p.24751-24752.

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

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.

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M. & CAMICIA, R.F.M. (2015) – Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, vol. 28, n. 3, p. 206-214.

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

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

CLAUMANN, C. A. et al. Fitting semi-empirical drying models using a tool based on wavelet neural networks: Modeling a maize drying process. **Journal of Food Process Engineering**. 2017.

COELHO, R. W.; RODRIGUES, R. C.; REIS, J. C. L. Rendimento de forragem e composição bromatológica de quatro leguminosas de estação fria. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado, Comunicado Técnico 78**, 2002.

COSTA, D. M. **Estudo da secagem infravermelho de sementes de girassol**. Dissertação de mestrado de pós-graduação em engenharia de processos. Universidade Tiradentes. Aracaju – SE. 2010.

CREMASCO, M. A. (2012). **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluido Mecânicos**. Ed. Blusher, São Paulo- SP.

CRUZ, M. R. **Estudo da influência de cultivares da cevada cervejeira na determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

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

DE MORI, C. de, MINELLA, E. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura de cevada (2012)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/trigo/busca-de-publicacoes/-/publicacao/969146/aspectos-economicos-e-conjunturais-da-cultura-da-cevada>>. Acesso em: 08 abr. 2019.

DUARTE, G. S. **Produção de trevo persa em função de épocas de semeadura e da desfolha**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação Agrícola Familiar da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas RS, 2016.

ERDEMLI, S.; ÇOLAK, E.; KENDIR, H. Determination of some plant and agricultural characteristics in Persian clover (*Trifolium resupinatum* L.). **Tarim Bilimleri Dergisi**, v.13, n.3, p.240-245, 2007.

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

FOUST, A.S et al., (1982). **Princípio das Operações Unitárias**. Editora LTC, segunda edição, Rio de Janeiro-RJ.

FREITAS, R. P. **Estudo Experimental e da Simulação da Secagem de Sementes de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em Leito Fluidizado**. Tese de Mestrado em Engenharia – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS, 127 p. 2016.

GARCIA, D. C. A Secagem de Sementes. **Rev. Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

GEANKOPLIS, C. J. (1998). **Processos de Transporte e Operaciones Unitárias**. Ed.continental, Terceira edição, México.

GELDART, D. **Types of Gas Fluidization**. Postgraduate School of Powder Technology. University of Bradford. Yorks, Gt. Britain, p.285, 1973.

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, n.2, p.157-165, 2002.

GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Rev. Brasileira de Plantas Medicinai**s, v. 16, n. 2, supl. 1, p. 434-443, 2014.

HASSINI, L. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops an Products**, v.67, p.457-465, 2015.

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

HOFISKY, V. A. et al. Cinética de secagem de abacaxi cv pérola em fatias. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.11, n.2, p.123-128, 2009.

HOVELAND, C. S. 1967: Registration of Yuchi arrowleaf clover. **Crop science** 7:80.

IBGE. Mapa da vegetação do Brasil e Mapa dos biomas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, projeto RADAMBRASIL, 2004. Disponível em:<www.ibge.gov.br>. Acesso em 26 out. 2019.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food components. New York, **Academic Press**. 1a ed., p.1374, 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Indicadores IBGE: Estatística da produção agrícola. 2017.

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.

KAYA, S.; KAHYAOGU, T.; Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 413-421, 2007.

KUNII, D. **Fluidization Engineering**. 2ª edição, editora: Butterworth-Heinemann, 1991.

LEHN, D. N., PINTO, L. A. A., Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem, **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.12, n.3, 177-191, Jul./Set., 2004.

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.

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

MAIA, G. D. et. al. Análise dos parâmetros do modelo de adsorção em multicamada, calor isostérico e entropia de dessorção para isotermas de cevada. **XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP**. São Carlos- SP. Anais 2015.

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

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.

MAYER, E. T. **Caracterização bromatológica de grãos de cevada e efeito da fibra alimentar na resposta biológica de ratos**. 2007. 75p. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Sociais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

MAYER, E. T. et. al., (2007). Caracterização nutricional de grãos integrais e descascados de cultivares de cevada. **Rev. Brasileira de Pesquisa e Agropecuária**, v. 42, n. 11, p. 1635-1640, 2007.

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.

MENEZES, M. L. et al. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **ENGEVISTA**, v.15, n.2. p. 176-186, 2013.

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

MITTELMANN, A. et al. Características Fisiológicas de Sementes de Trevo-alexandrino e Trevo-vesiculososo e necessidade de Escarificação. **Comunicado Técnico 290**. Pelotas RS, 2012.

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

MONTANUCI, F. D. **Avaliação do Efeito das Variáveis de Processo na Produção de Malte de Cevada e na Produção de Bebidas Tipo Chá**. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 129 p. 2014.

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

NABINGER C., Moraes A. & Maraschin G.E. 2000. **Campos in Southern Brazil**. In: Grassland ecophysiology and grazing ecology (eds. Lemaire G, Hodgson JG, Moraes A & Maraschin GE). CABI Publishing Wallingford, pp. 355-376.

NDUKWU, M. C.; DIRIOHA, C.; ABAM, F. I.; IHEDIWA, V. E. Heat and mass transfer parameters in the drying of cocoyam slice. **Case Studies in Thermal Engineering** 9 (2017) 62-71.

OLANDA R. B. **Produção de sementes de trevo vesiculoso como alternativa econômica para os sistemas de produção em projeto de reforma agrária: o caso do Assentamento Novo Arroio Grande, Arroio Grande/RS.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola familiar. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.

OLANDA, R. et al. Desempenho e qualidade da forragem de trevo-vesiculoso em função da dose de fosfato natural. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 165.** Pelotas RS: Embrapa Clima Temperado, 2012.

OLIVEIRA JUNIOR, A. B. **Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado** .2003. 202p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

OLIVEIRA, E. G. de. **Secagem de spirulina platensis: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Fundação Universidade do Rio Grande (Mestrado), p.5-18, 2006.

OVALLE, C. M. Arrowleaf clover (*Trifolium vesiculosum* Savi): a new species of annual legumes for high rainfall áreas of the mediterranean climate zone of Chile. **Chilean journal of agricultural research.** V. 70, n: 1, p. 170-177, 2010.

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. 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.

PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, Faculdade de engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 121 p.

PASSOS, M. L. BARROZO, M. A. S. MUJUMDAR, A. S. **Fluidization Engineering – Practice**. Laval, Canadá, 2013.

PELL, M.; DUNSON, J. B. **Gas-solid operations and equipment**. *In*: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's Handbook of Chemical Engineering. 7^a ed. New York: McGraw-Hill companies, Inc., 1999. p. 17-2 – 17-51.

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

PINTO, A.R.M. (2013). **Avaliação do processo de secagem no fabrico de malte – Caso de estudo da Sociedade Central de Cervejas e Bebidas, SA**. Tese de Mestrado em Engenharia Alimentar – Processamento de Alimentos. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 63 p.

PORTO, P.D. **Tecnologia de Fabricação de Malte: uma Revisão**. Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de engenheiro de alimentos. Porto Alegre, 2011. 58p.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

RAMOS, H. S. **Secagem Industrial: Secadores industriais**. Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2013.

RIZZI JUNIOR, A. C.; COSTA Jr. E. F.; FREIRE J. T. & PASSOS M. L. (2007). Modeling the Drying of Grass Seeds (*Brachiaria brizantha*) in Fluidized Beds. **Drying Technology: An International Journal**, 25:1, 123-134.

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

RIZZI JUNIOR, A. C.; PASSOS M. L. & FREIRE J. T. (2009). Modeling and Simulation the Drying of Grass Seeds (*Brachiaria brizantha*) in Fluidized Beds: Evaluation of Heat Transfer Coefficients. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, vol. 26, No.03, pp. 545-554.

SANTOS, H. P. **Principais forrageiras para integração lavoura-pecuária, sob plantio direto, nas regiões Planalto e Missões do Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 142 p., 2002.

SANTOS, I. J., COUTO, S. M. **Efeito da temperatura de secagem nas atividades de alfa e beta-amilase durante o processo de malteação de cevada (*Hordeum vulgare*) para produção de cerveja**. Universidade Federal de Viçosa, 1999.

SCOPPOLA, A.; LATTANZI, E.; BERNARDO, L. Distribution and taxonomy of the Italian clovers belonging to *Trifolium* sect. *Vesicastrum* subsect. *Mystillus* (Fabaceae). **Italian Botanist** 2: 7-27, 2016.

SILVA, A. F. D. **Qualidade Fisiológica de Sementes de Cevada Influenciadas pela Época de Colheita**. Tese de Mestrado em Ciências – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 47 p. 2007.

SILVA, J. S. et al ., (2008). **Secagem e armazenameto de produtos agrícolas**. Editora Aprenda Fácil, Viçosa, Minas Gerais.

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

SOUZA, J. A. et al. Modelos matemáticos para a descrição de secagem em camada fina de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **VII Encontro Latino Americano de**

Iniciação Científica e IV Encontro Americano de Pós- Graduação. Universidade do Vale do Paraíba. 2004.

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

SYAHRUL, S.; HAMDULLAHPUR, F.; DINCER, I. Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. **Exergy an International Journal**, v. 2, p. 87-98, 2002.

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.

TUNES, L. M., et al. **Armazenabilidade de Sementes de Cevada colhidas em Diferentes Épocas.** Biosci., Uberlândia, v. 26, n. 3, p. 403-412, 2010.

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.

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

VIDAL, J.R.M.B; GASPARETTO, C.A. Comportamento reológico da polpa de manga (*mangifera indica* L)- Efeito dos sólidos insolúveis. **Cienc. Tecnol. Aliment.** Vol.20 no.2, Campinas, 2000.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado.** 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

ZIELINSKA, M. & MARKOWSKI, M. Drying behavior of carrots dried in a spout-fluidized bed dryer. *Drying Technology: An International Journal*. 25:1,261-270, (2007).

ZOHARY, M. & D. HELLER, 1984. The genus *Trifolium*. **Israel Academy of Science and Humanities**. Jerusalem, Israel.

APÊNDICE 1

Escrita do programa para simulação da secagem de sementes de trevo vesiculoso em linguagem MatLab na condição de 40°C e 1,1 U_{mf} .

```
function df = fSLF(t,var)
%-----
%Transposição de variáveis:
%-----
global Kp ros E fi dp Xm C N Patm UAe Gg L Ubu Ubs Tse Tge lambda cpss ...
    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
%-----
%Variaveis:
%-----
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)*cpss;      %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 trevo em Leito Fluidizado.
```

```
%-----
```

```
%Limpa a tela:
```

```
%-----
```

```
clear all
```

```
clc
```

```
%-----
```

```
%Transposição de variáveis:
```

```
%-----
```

```
global 80empos E fi dp Xm C N Patm Uae Gg L Ubu Ubs Tse Tge lambda cpss ...
```

```
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:
```

```
%-----
```

```
t=3600.0;           %Tempo de secagem (s)
Kp=0.000103;        %Coeficiente global de transfarência de massa (kg/m2s)
ros=1364.00;        %Massa específica dos sólidos (kg/m3)
E=0.424;           %Porosidade do leito de sólidos (-)
fi=0.97;           %Esfericidade dos sólidos (-)
dp=0.00159;        %Diâmetro médio dos sólidos (m)
Xm=0.04364;        %T=40C %Parametro do modelo de BET (-) DEPENDE DA Tg0
C=72.13257;        %T=40C %Parametro do modelo de BET (-) DEPENDE DA Tg0
N=2.51143;         %T=40C %Parametro do modelo de BET (-) DEPENDE DA Tg0
Patm=101.325;       %Pressão atmosférica (kPa)
Uae=0.0153;        %Umidade absoluta do gás na entrada (kg H2O / kg ar seco)
Gg=0.0094;         %Vazão mássica do gás (kg/s)
L=0.05;           %Altura do leito de sólidos (m)
Ubu=11.79/100;     %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=15.0;         %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=((Xm*C*aw)/(1-aw))*(((1)-((N+1)*(aw^N))...
+(N*(aw^(N+1))))/((1)-((1-C)*aw)-(C*(aw^(N+1))))); %Umidade de equilíbrio
(kgágua/kgss) – BET
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 (,'SLF_40C_10MF_1.txt');
tempo=SLF_40C_10MF_1(:,1);
Uaexp=SLF_40C_10MF_1(:,2);
Urexp=SLF_40C_10MF_1(:,3);
Tgexp=SLF_40C_10MF_1(:,4);
load (,'SLF_40C_10MF_2.txt');
tempoXs=SLF_40C_10MF_2(:,1);
Ubsexp=SLF_40C_10MF_2(:,2);
Ubuexp=SLF_40C_10MF_2(:,3);
Resposta=[t Uasim Ursim Ubssim Ubusim var(:,3)-273.15 var(:,4)-273.15]
openvar('Resposta')
openvar('SLF_40C_10MF_1')
openvar('SLF_40C_10MF_2')
%-----
%Gráficos:
%-----

figure('name','Umidade Absoluta');
plot(t,Uasim,tempo,Uaexp,'o');
axis([0 3600 0.001 0.025]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UA(kg H2O/kg Ar Seco)');

figure('name','Umidade Relativa');
plot(t,Ursim,tempo,Urexp,'o');
axis([0 3600 0 100]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UR(%)');

figure('name','Umidade do Produto (BS)');
plot(t,Ubssim,82*tempo,Ubsexp,'o');
axis([0 3600 0.07 0.18]);
xlabel('t (s)');
ylabel('UBS (kgH2O/kgss)');

figure('name','Umidade do Produto (BU)');
plot(t,Ubusim,tempoXs,Ubuexp,'o');
axis([0 3600 0 40]);
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,tempo,Tgexp,'o');

```

```
axis([0 3600 0 70]);  
xlabel('t (s)');  
ylabel('Tg °C');
```

```
%-----  
%FIM
```

APÊNDICE 2

Lista com algumas equações auxiliares ao modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992) que não foram apresentadas neste trabalho.

Quadro B – Equações auxiliares para modelagem.

Nome	Equação
Fração mássica de água no equilíbrio	$Y_{s,eq} = \frac{X_e}{1 - X_e}$
Atividade de água	$a_w = \frac{U_R}{100} = \frac{P_V}{P_{VS}}$
Pressão de vapor (Wilhem, 1976)	$P_V = \frac{U_A P_{atm}}{0,62198 + U_A}$
Pressão de vapor na saturação	$P_{VS} = \exp \left(\frac{-7511,52}{t_g} + 89,63121 \right. \\ \left. + 0,02399897 t_g \right. \\ \left. - 1,1654551 \times 10^{-5} t_g^2 \right. \\ \left. - 1,2810336 \times 10^{-8} t_g^3 \right. \\ \left. + 2,0998405 \times 10^{-11} t_g^4 \right. \\ \left. - 12,150799 \ln(t_g) \right)$
Umidade absoluta	$U_A = \frac{Y_g}{1 - Y_g}$
Fração mássica de água no gás no tempo zero	$Y_{g,0} = \frac{U A_e}{1 + U A_e}$
Fração mássica de água no sólido no tempo zero	$Y_{s,0} = \frac{U_{BS}}{1 + U_{BS}}$
Número de Reynolds	$R_e = \frac{d_p v_g \rho_g}{\mu_g}$
Velocidade do gás de entrada para leito de jorro	$v_g = \frac{E_g}{\rho_g A_s}$
Área superficial do leito fluidizado	$A_s = a \cdot b$
Taxa de transferência de calor perdido na parede	$\varepsilon_{parede} = h_{atm} + A_L (T_{parede} - T_{ambiente})$

Quadro B - Continuação.

Área lateral do leito fluidizado	$A_L = 2. (c. b + a. c)$
Umidade dos sólidos em base seca com base na U_{BU}	$U_{BS} = \frac{U_{BU}}{1 - U_{BU}}$
Massa específica do gás na entrada	$\rho_g = 1,293047 \left(\frac{273,15}{t_{ge}} \right)$
Umidade Relativa	$U_R = 100 \frac{P_V}{P_{VS}}$
Umidade dos sólidos em base seca com base na Y_S	$U_{BS} = \frac{Y_S}{1 - Y_S}$
Umidade dos sólidos em base úmida com base na U_{BS}	$U_{BU} = 100 \frac{U_{BS}}{1 + U_{BS}}$
Calor específico da água líquida (HIMMELBLAU, 1998)	$C_{P_{H_2O}}^L = \frac{75,4}{P_{M_{H_2O}}} \left(\frac{1}{0,001} \right)$
Calor específico dos sólidos	$C_{P_S} = Y_S C_{P_{H_2O}}^L + (1 - Y_S) C_{P_{SS}}$
<i>Calor específico do ar seco</i> (HIMMELBLAU, 1998)	$C_{P_{AR}} = 28,94 + 0,4147 \times 10^{-2} (t_g - 273,15)$ $+ 0,3191 \times 10^{-5} (t_g - 273,15)^2$ $- 1,965 \times 10^{-9} (t_g$ $- 273,15)^3 (P_{MAR})^{-1} \left(\frac{1}{0,001} \right)$
Calor específico da água vapor (HIMMELBLAU, 1998)	$C_{P_{H_2O}}^L = 33,46 + 0,688 \times 10^{-2} (t_g - 273,15)$ $+ 0,7604 \times 10^{-5} (t_g - 273,15)^2$ $- 3,593 \times 10^{-9} (t_g$ $- 273,15)^3 (P_{M_{H_2O}})^{-1} \left(\frac{1}{0,001} \right)$

APÊNDICE 3

Figura C1 – Resultados encontrados para ρ_r através da picnômetria gasosa.

```

QUANTACHROME CORPORATION
  Ultrapyc 1200e V4.01
    Analysis Report

Fri Aug  2 11:10:32 2019
User ID:  UNIPAMPA

Sample Parameters
  Sample ID:  trevo
  Weight: 5.1975 g
Analysis Parameters
  Cell Size - Small
  V Added - Small: 12.6799 cc
  V Cell: 19.0307 cc
  Analysis Temperature: 14.5 C
  Target Pressure: 18.0 psig
  Type of gas used: DryHelium
  Equilibration Time: Auto
  Flow Purge:  3.0 min.
  Maximum Runs: 6
  Number Of Runs Averaged: 3
  Deviation Requested: 0.0050 %
Analysis Results
  Deviation Achieved: 0.0295 %
  Average Volume: 3.8104 cc
  Volume Std. Dev.: 0.0012 cc
  Average Density: 1.3640 g/cc
  Density Std. Dev.: 0.0004 g/cc
  Coefficient of Variation: 0.0315 %

-----
                        Run Data
-----
  RUN          VOLUME (cc)  DENSITY (g/cc)
-----
    1           3.8244       1.3590
    2           3.8139       1.3628
    3           3.8122       1.3634
    4           3.8111       1.3638
    5           3.8113       1.3637
    6           3.8087       1.3646
-----

```

APÊNDICE 4

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 – Resultados experimentais e simulados para a U_A na condição de 40°C e U_{mf} 1,3.

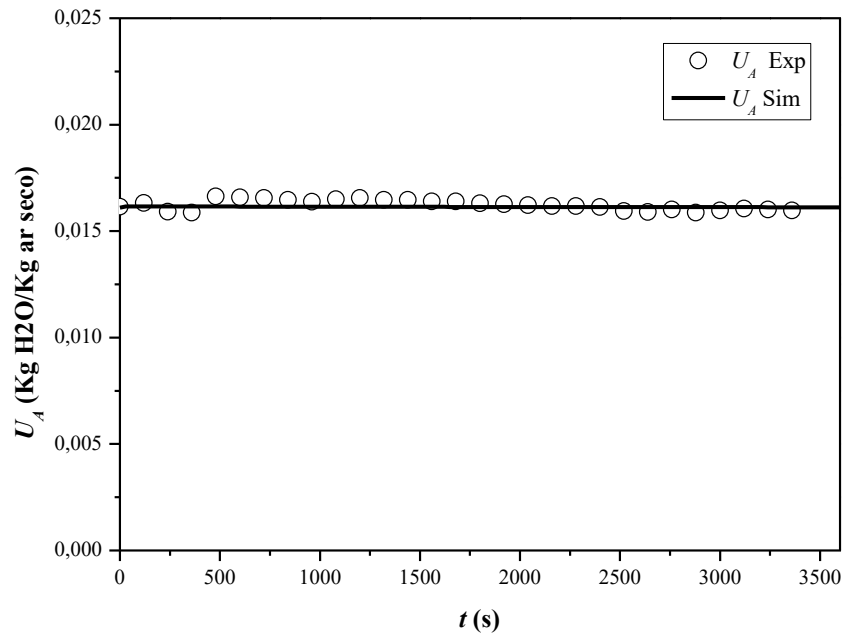


Figura D2 – Resultados experimentais e simulados para a U_A na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

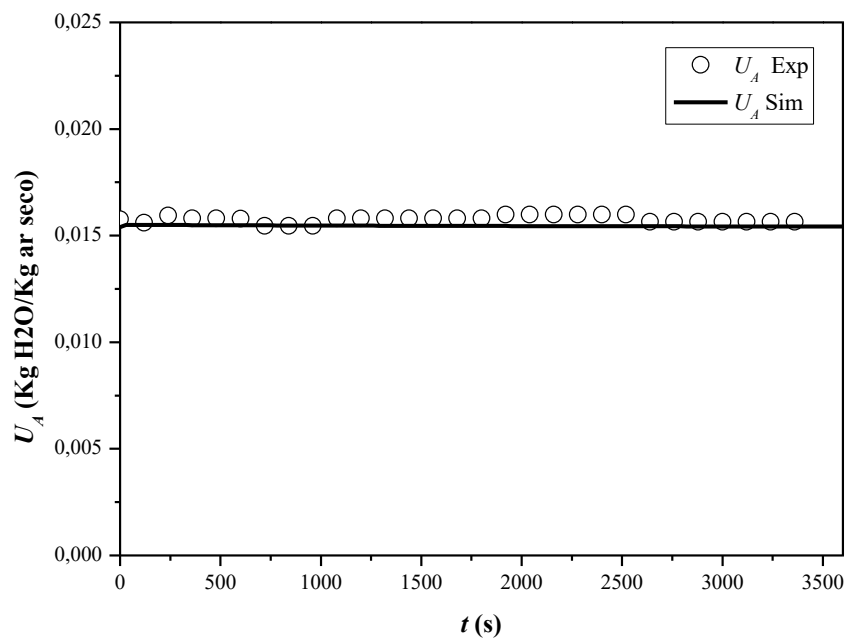


Figura D3 – Resultados experimentais e simulados para a U_A na condição de 60°C e U_{mf} 1,1.

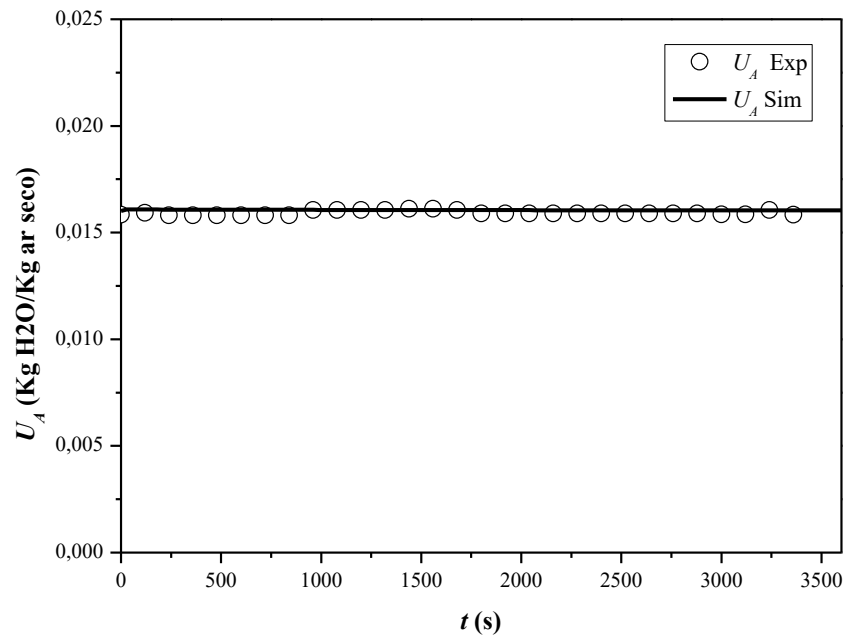


Figura D4 – Resultados experimentais e simulados para a U_A na condição de 60°C e U_{mf} 1,3.

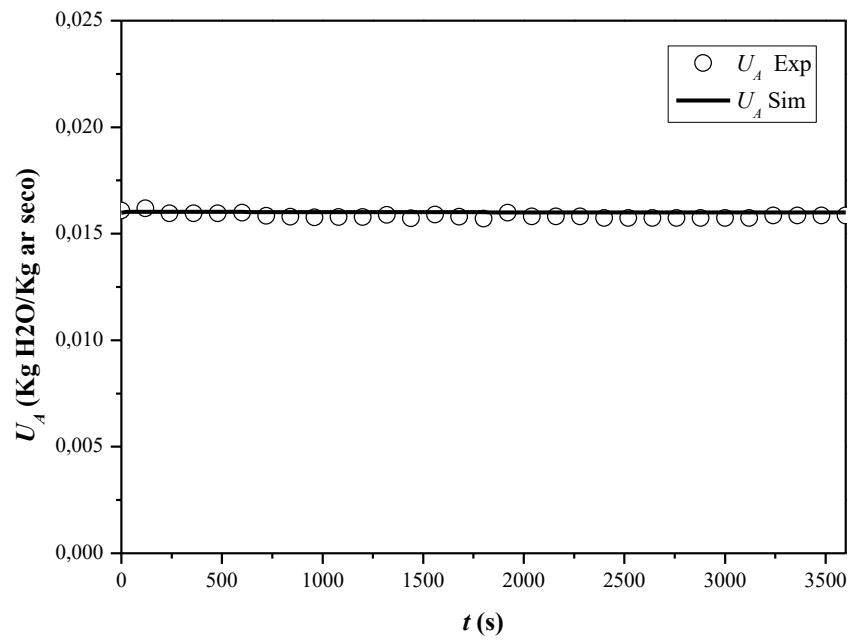


Figura D5 – Resultados experimentais e simulados para a U_R na condição de 40°C e U_{mf} 1,3.

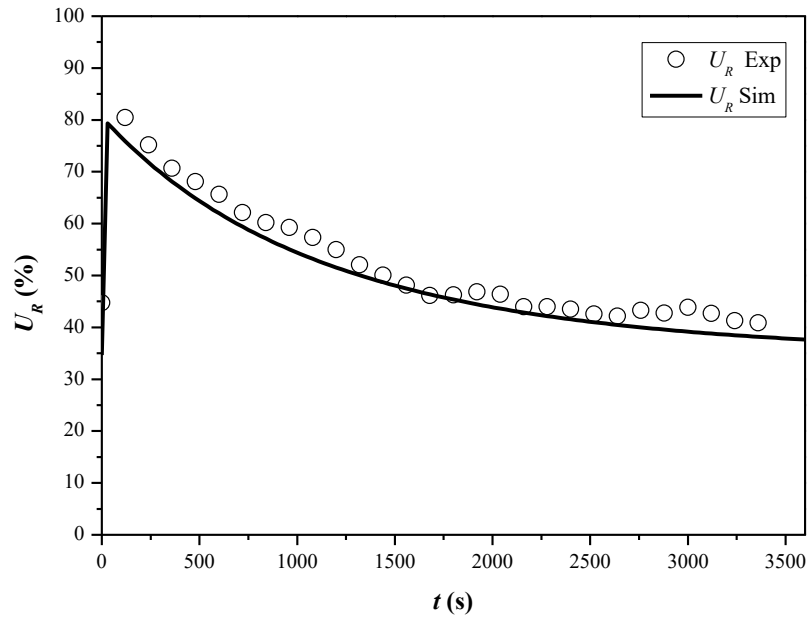


Figura D6 – Resultados experimentais e simulados para a U_R na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

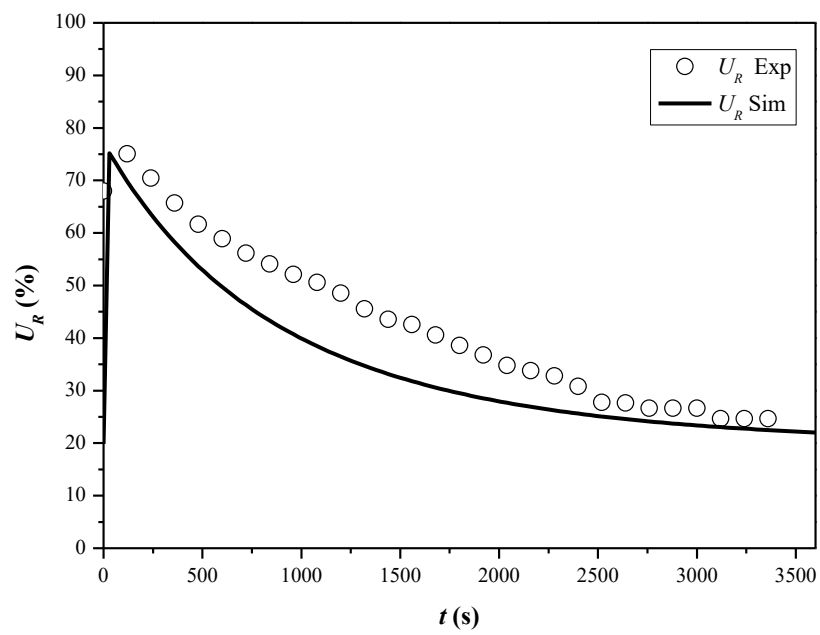


Figura D7 – Resultados experimentais e simulados para a U_R na condição de 60°C e U_{mf} 1,1.

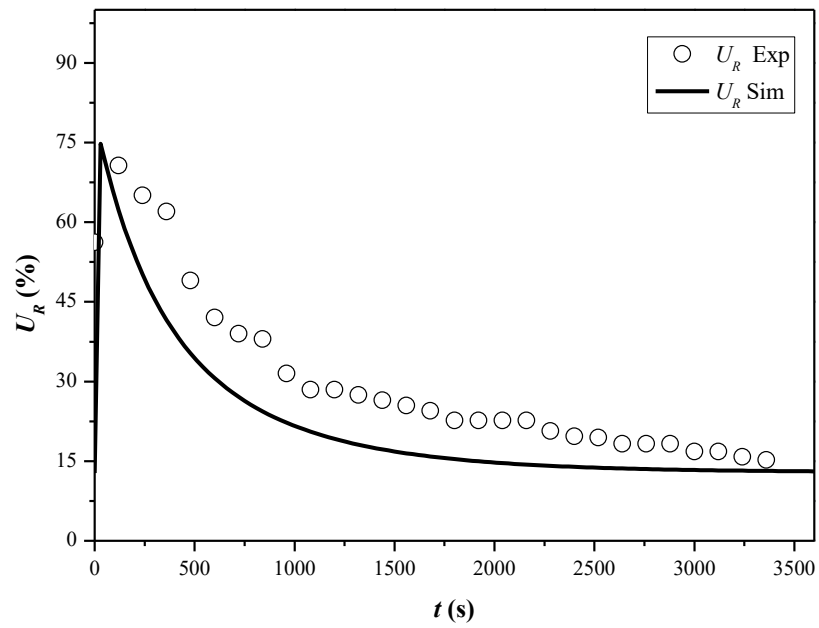


Figura D8 – Resultados experimentais e simulados para a U_R na condição de 60°C e U_{mf} 1,3.

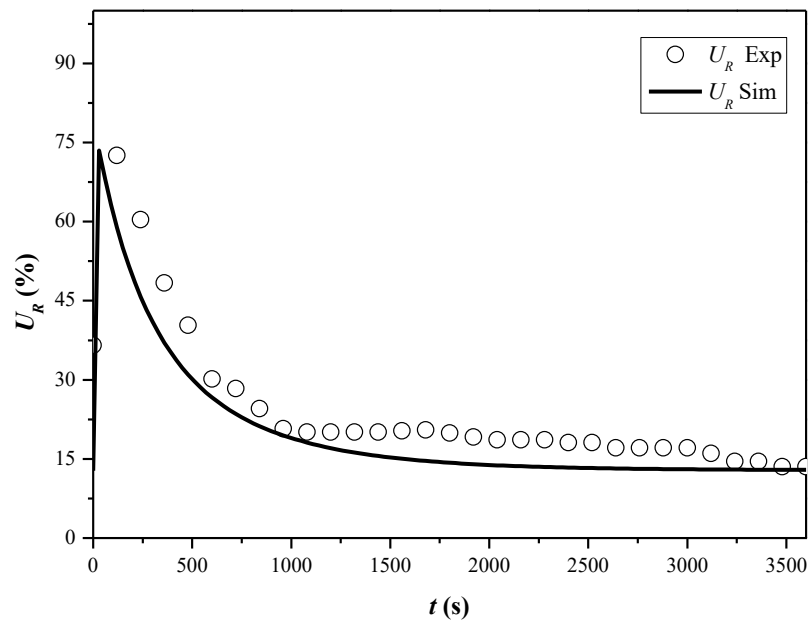


Figura D9– Resultados experimentais e simulados para a T_g na condição de 40°C e U_{mf} 1,3.

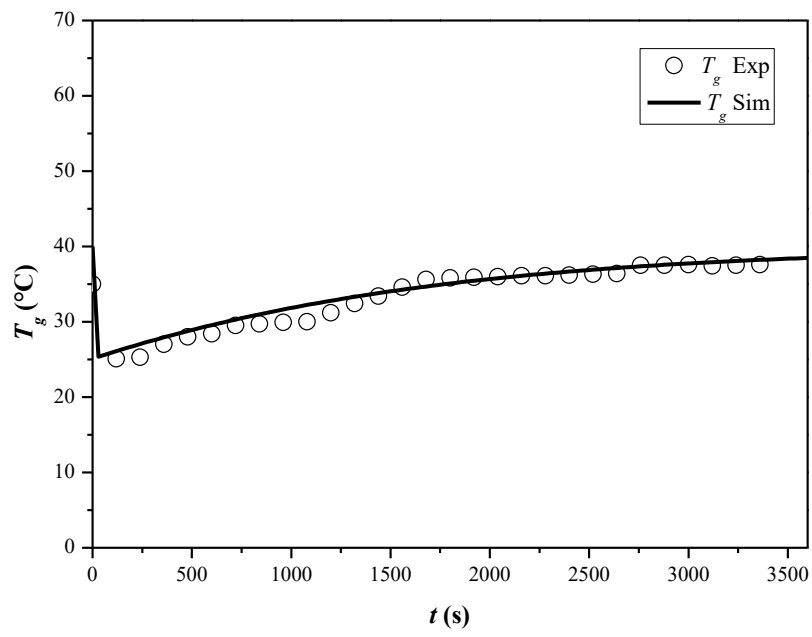


Figura D10– Resultados experimentais e simulados para a T_g na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

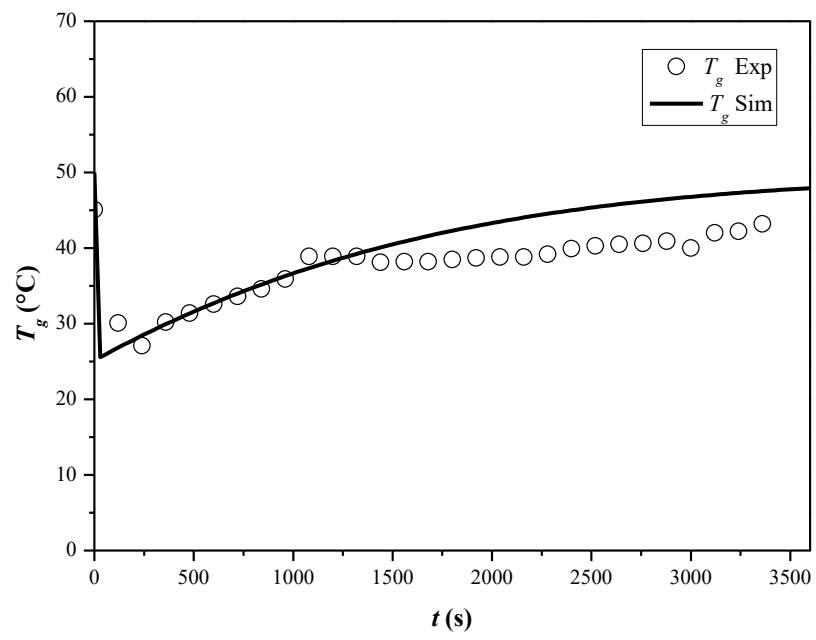


Figura D11– Resultados experimentais e simulados para a T_g na condição de 60°C e $U_{mf} 1,1$.

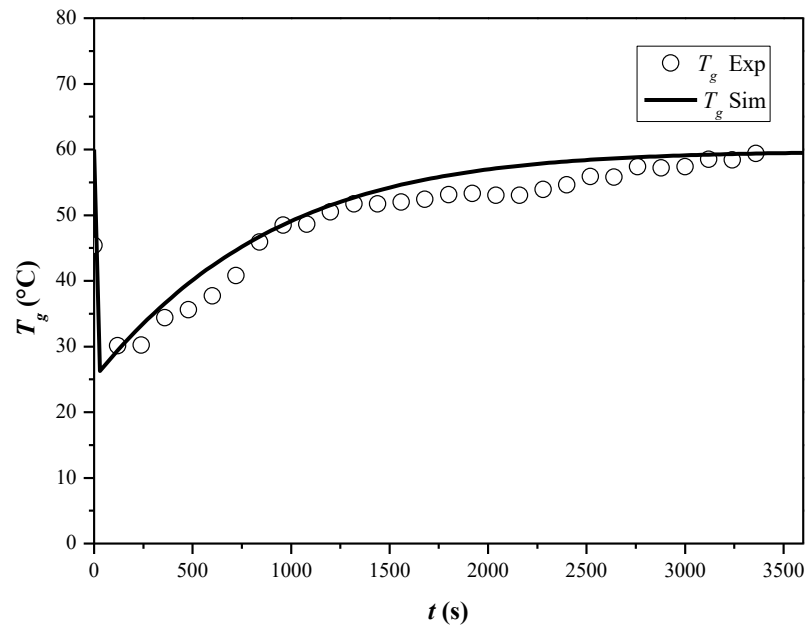


Figura D12– Resultados experimentais e simulados para a T_g na condição de 60°C e $U_{mf} 1,3$.

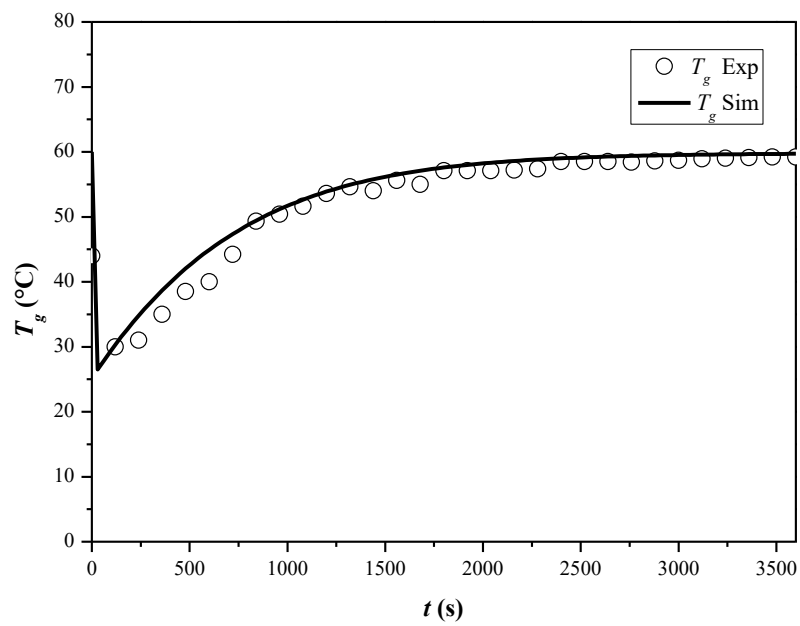


Figura D13– Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} na condição de 40°C e $U_{mf} 1,3$.

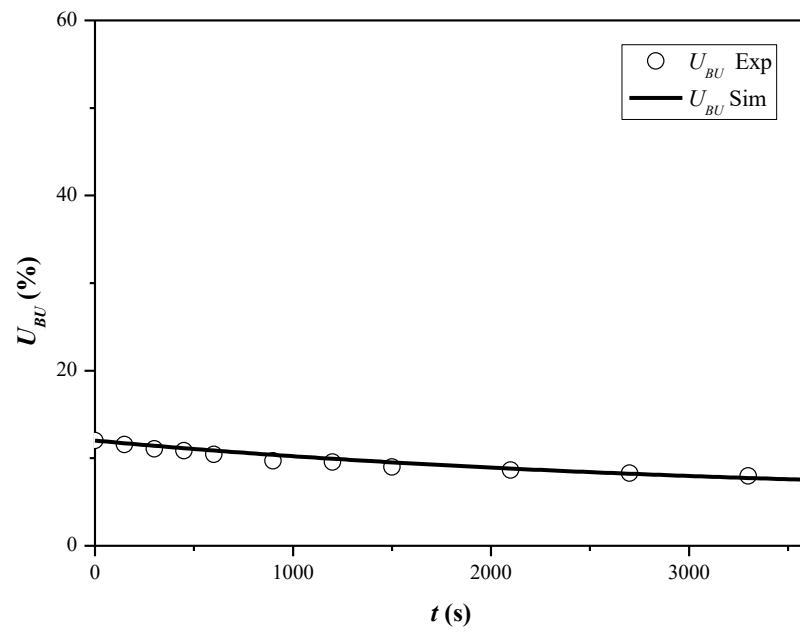


Figura D14– Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

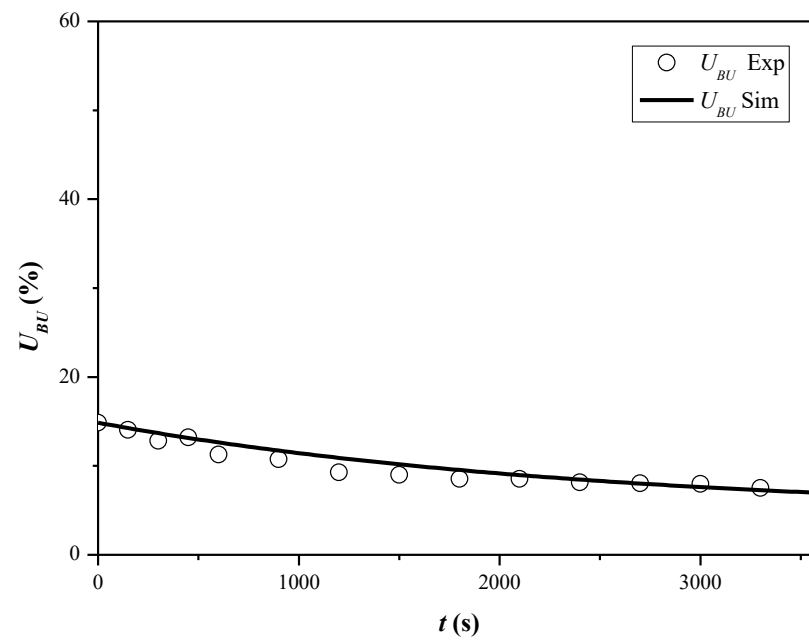


Figura D15– Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} na condição de 60°C e U_{mf} 1,1.

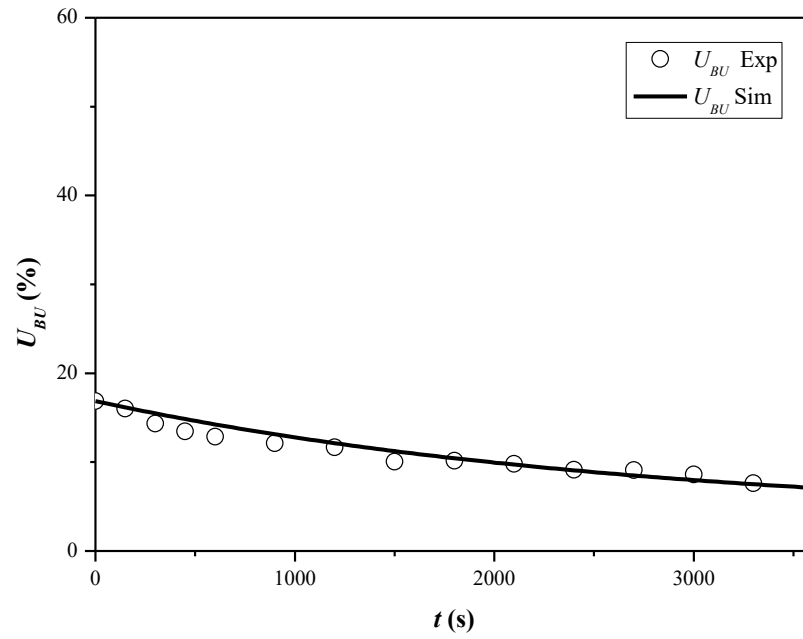


Figura D16– Resultados experimentais e simulados para a U_{BU} na condição de 60°C e U_{mf} 1,3.

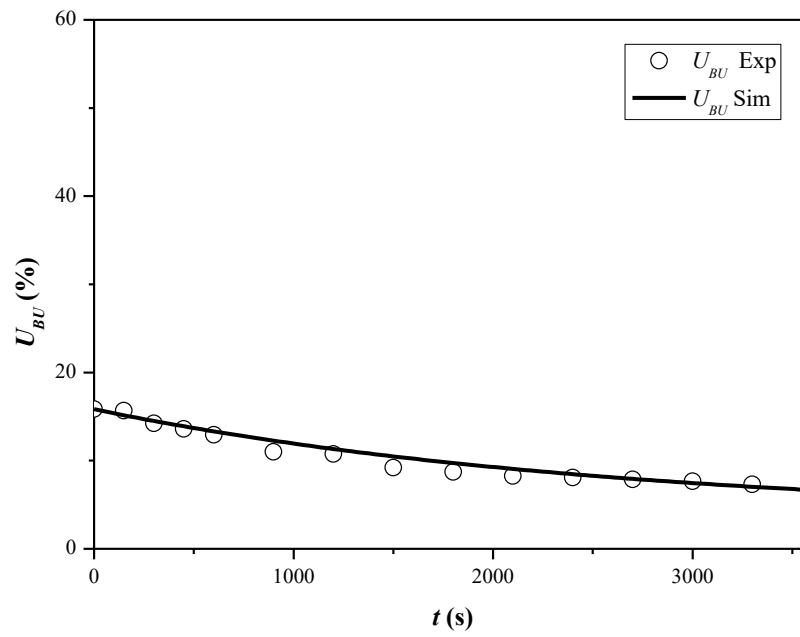


Figura D17– Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} na condição de 40°C e U_{mf} 1,3.

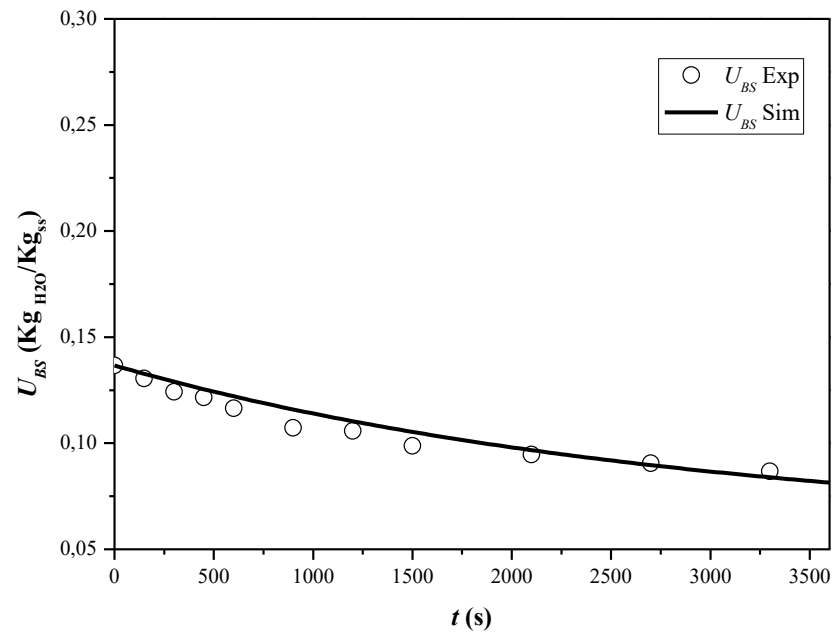


Figura D18– Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

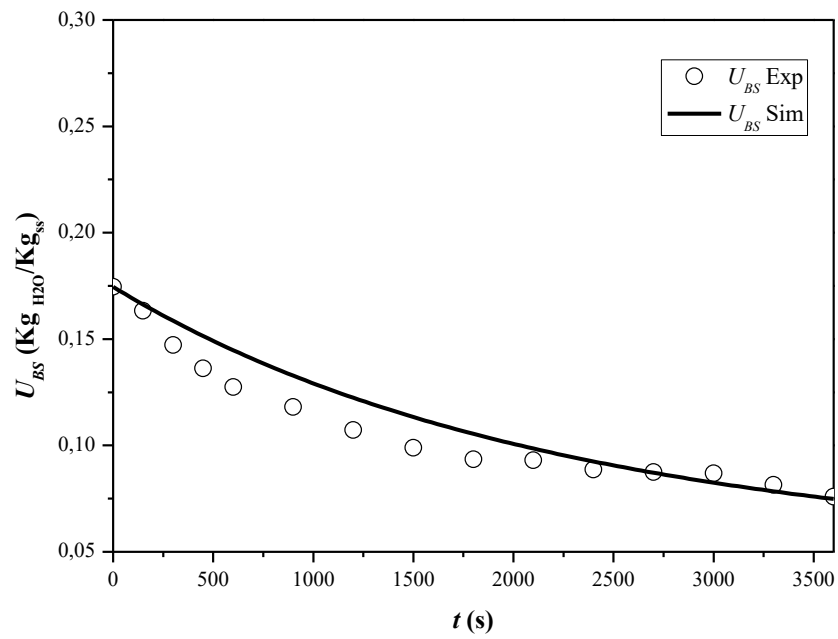


Figura D19– Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} na condição de 60°C e U_{mf} 1,1.

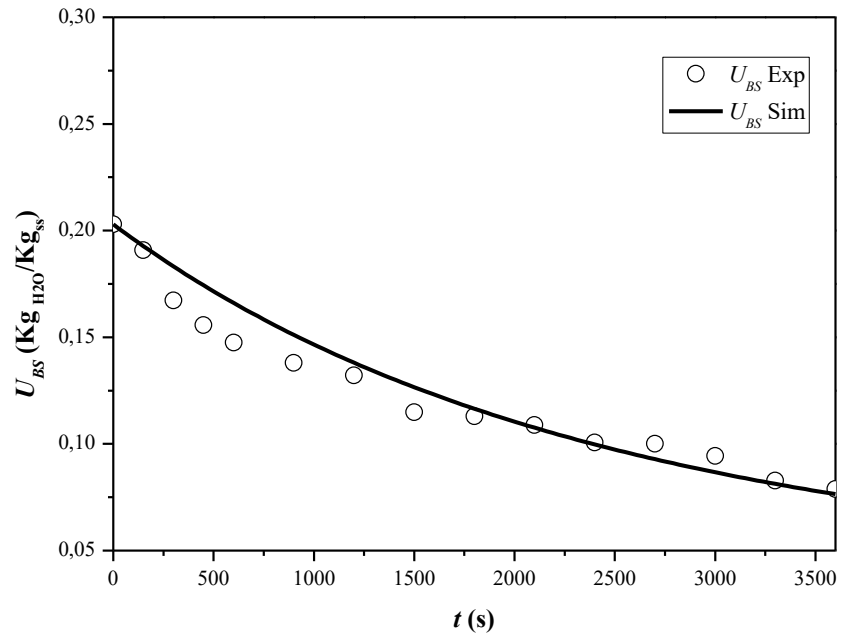


Figura D20– Resultados experimentais e simulados para a U_{BS} na condição de 60°C e U_{mf} 1,3.

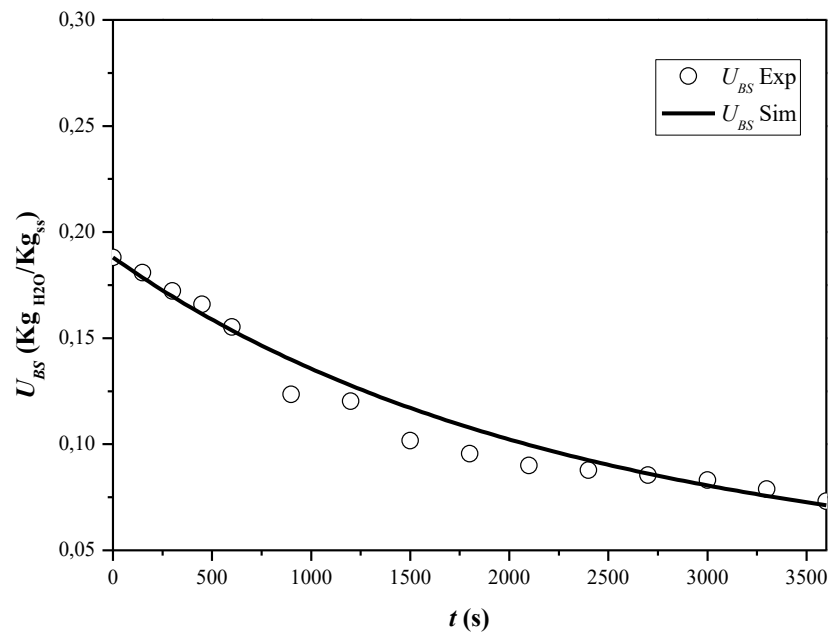


Figura D21– Resultados simulados para a T_s em função do t na condição de 40°C e U_{mf} 1,3.

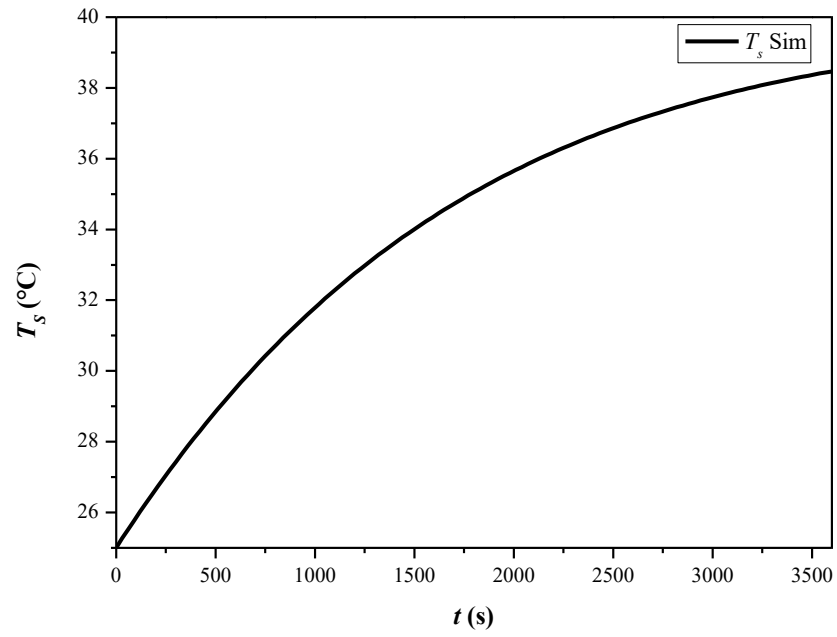


Figura D22– Resultados simulados para a T_s em função do t na condição de 50°C e U_{mf} 1,2.

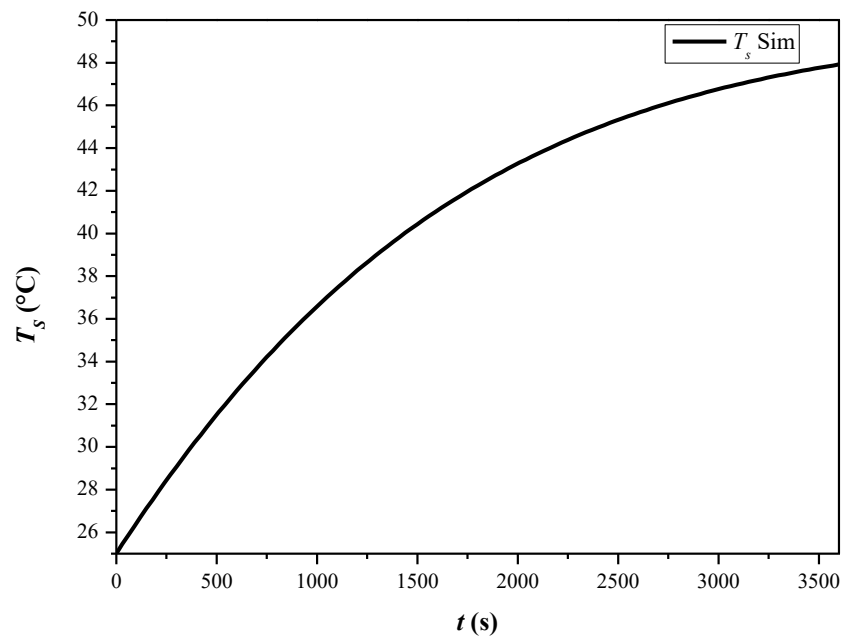


Figura D23– Resultados simulados para a T_s em função do t na condição de 60°C e U_{mf} 1,1.

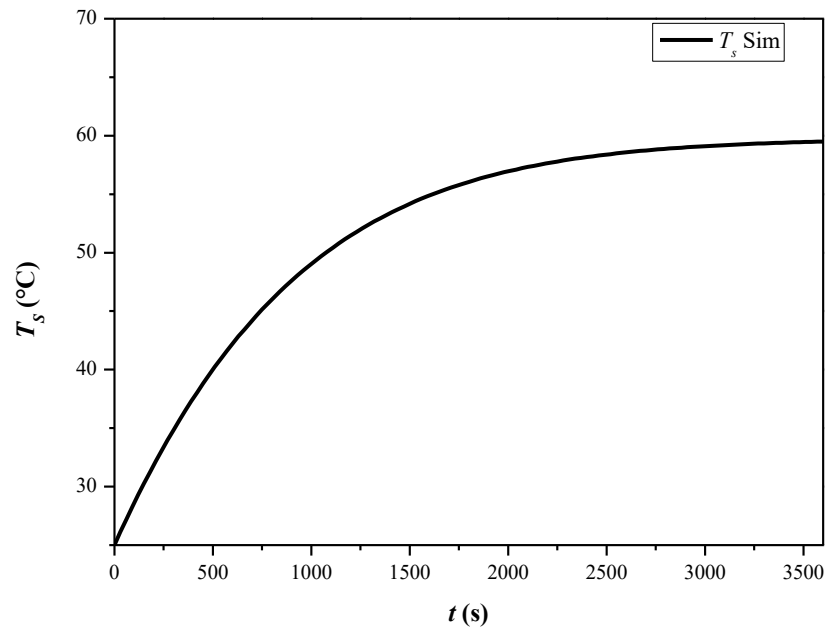


Figura D24– Resultados simulados para a T_s em função do t na condição de 60°C e U_{mf} 1,3.

