

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE SECAGEM DE GRÃOS APLICADO
AO PROCESSO DE SECAGEM DE MALTE EM LEITO FIXO PROFUNDO

por

William Ávila Hellwig

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Hellwig, William Ávila

Avaliação de um modelo analítico de secagem de grãos aplicado ao processo de secagem de malte em leito fixo profundo / William Ávila Hellwig. -- 2019. 28 f.

Orientadora: Thamy Cristina Hayashi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Secagem. 2. Leito fixo profundo. 3. Modelo logarítmico. 4. Malte. I. Hayashi, Thamy Cristina, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

William Ávila Hellwig

AVALIAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE SECAGEM DE GRÃOS APLICADO
AO PROCESSO DE SECAGEM DE MALTE EM LEITO FIXO PROFUNDO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Bardo Ernst Joseff Bodmann

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2019

Hellwig, William Ávila. **Avaliação de um Modelo Analítico de Secagem de Grãos Aplicado ao Processo de Secagem de Malte em Leito Fixo Profundo**. 2019. 28. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O ciclo de secagem representa o processo de maior demanda energética na transformação da cevada em malte. Neste trabalho, é proposta a implementação numérica de um modelo logarítmico para simular a secagem do malte em um leito fixo profundo com o intuito de verificar a sua aplicabilidade. Os principais parâmetros que regem o processo são a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, juntamente com a velocidade com que o mesmo escoar através do leito de grãos. Os resultados do modelo adotado foram comparados com dados experimentais. As amostras foram retiradas a uma profundidade fixa da camada de grãos, em intervalos de vinte minutos entre cada coleta. A duração dos experimentos variou de uma a duas horas. As melhores concordâncias entre o modelo e os dados experimentais ocorreram para as situações mais úmidas de secagem e, para todos os experimentos realizados, as condições dos modelos conseguiram reproduzir de forma satisfatória os dados experimentais e a fase de secagem correspondente.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem, Leito fixo profundo, Modelo logarítmico, Malte.

Hellwig, William Ávila. **Evaluation of an Analytical Grain Drying Model Applied to the Deep Fixed Bed Malt Drying Process**. 2019. 28. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The drying cycle represents the process of greatest energy demand in the transformation of barley into malt. In this work, it is proposed the numerical implementation of a logarithmic model to simulate the malt drying in a deep fixed bed in order to verify its applicability. The main parameters governing the process are the temperature and relative humidity of the drying air, as well as the speed at which it flows through the grain bed. The results of the adopted model were compared with experimental data. Samples were taken at a fixed depth of the grain layer at intervals of twenty minutes between each collection. The duration of the experiments ranged from one to two hours. The best agreement between the model and the experimental data occurred for the wettest drying situations and, for all experiments performed, the conditions of the models were able to reproduce satisfactorily the experimental data and the corresponding drying phase.

KEYWORDS: Drying, Deep fixed bed, Logarithmic model, Malt.

NOMENCLATURA

A	Parâmetro para determinação da umidade de equilíbrio	-
B	Parâmetro para determinação da umidade de equilíbrio	-
C	Parâmetro para determinação da umidade de equilíbrio	-
C_{pda}	Calor específico do ar seco	[J/kgK]
H	Altura da unidade de transferência	[m]
K	Constante de secagem de camada fina	[1/s]
L_v	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]
Q	Taxa de deslocamento da zona de secagem	[kg/m ² s]
Q_r	Soma dos quadrados dos resíduos	-
RH	Umidade relativa do ar	-
S	Massa total do grão	[kg]
S_e	Erro padrão	-
S_p	Massa seca do grão	[kg]
T_a	Temperatura do ar de secagem	[K]
T_{am}	Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente	[K]
T_{a0}	Temperatura do ar de secagem de entrada	[K]
V_{a0}	Velocidade do ar de secagem de entrada	[m/s]
W	Massa de água	[kg]
X	Conteúdo de umidade do malte	-
X_{eq}	Conteúdo de umidade de equilíbrio do malte em base seca	-
X_p	Conteúdo de umidade do malte em base seca	-
X_w	Conteúdo de umidade do malte em base úmida	-
Y_{exp}	Ponto experimental	-
Y_{mod}	Ponto estimado	-
n	Número de pontos	-
t	Tempo	[s]
r	Diferença entre valores medidos e calculados	-
x	Coordenada de profundidade da camada de grãos	[m]

Símbolos gregos

θ	Tempo adimensional	-
ν	Razão de energia	-
ρ_{da}	Densidade do ar seco de secagem	[kg/m ³]
ν	Variável adimensional de profundidade da camada	-
ρ_{dp}	Densidade do malte seco	[kg/m ³]
τ	Tempo de residência do escoamento no comprimento da unidade de transferência	[s]
σ_r	Desvio padrão da diferença entre valores medidos e calculados	-

Subscritos

da	Ar seco
------	---------

<i>f</i>	Valor final
<i>i</i>	Valor inicial
<i>z</i>	Contador
0	Valor na entrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 Malteação de cevada.....	2
2.1.1 Maceração.....	2
2.1.2 Germinação.....	2
2.1.3 Secagem.....	3
2.2 Princípios de secagem	3
2.2.1 Teor de umidade	4
2.2.2 Umidade de equilíbrio	4
2.2.3 Curva de secagem.....	5
2.3 Secagem em camada fixa	6
2.4 Modelo matemático de secagem em camada fixa	7
2.4.1 Modelo de camada fina.....	7
2.4.2 Modelo logarítmico	8
3. CASO DE ESTUDO	10
3.1 Descrição das análises experimentais.....	10
3.2 Aplicação do modelo logarítmico.....	11
4. RESULTADOS	12
5. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A	18
APÊNDICE B.....	19
APÊNDICE C.....	20

1. INTRODUÇÃO

O setor cervejeiro é um dos mais tradicionais do Brasil e um dos mais relevantes na economia brasileira. Segundo dados da CervBrasil (2018), ele está presente em todas as cidades do país e conta com mais de 2,7 milhões de pessoas empregadas ao longo de sua cadeia produtiva, sendo um dos maiores empregadores e grande indutor da economia nacional. Sua atuação é responsável por 1,6% do PIB e 14% da indústria de transformação nacional. A produção de cevada, uma das matérias primas da cerveja, representa cerca de 100.000 hectares de área plantada. Com mais de 2.000 famílias empregadas e uma produção de 300.000 toneladas ao ano, o ramo de cevada ainda representa uma grande oportunidade de negócio.

De acordo com Kuntze *et al* (1995), a cevada germinada, ou malte de cevada, é a principal matéria prima usada nas cervejarias para a produção da cerveja. É nas maltarias que, através do processo de malteação, a cevada sofre todas as transformações bioquímicas e adquire as características finais de sabor, aroma e cor desejados para então iniciar o processo de produção nas cervejarias.

Conforme descrito por Bala (1983), o processo de malteação consiste basicamente de uma etapa inicial de umidificação dos grãos de cevada, denominada maceração, seguida de uma etapa de germinação controlada, em que o sistema enzimático do grão é ativado através do monitoramento da umidade e da temperatura do grão, fornecendo energia para o desenvolvimento do embrião. Após o grão ter sofrido todas as modificações bioquímicas e físicas no processo de germinação, o processo é interrompido pela etapa de secagem. O objetivo da secagem é cessar o processo germinativo, reduzindo de forma controlada o conteúdo de umidade do grão, para permitir sua estocagem de maneira segura. Além disso, é também nesta etapa que características como cor e sabor, que, a depender do tipo de cerveja a ser produzida, são atribuídos ao malte na fase conhecida como cura.

A secagem do malte verde, conforme é denominado após a etapa de germinação, é realizada em estufas e resulta da passagem forçada de ar aquecido do ambiente pelo leito composto dos grãos. Os fatores que regulam a taxa de secagem incluem: o volume de ar que passa através da camada de grão por unidade de tempo, a profundidade da camada de grãos, a uniformidade de compactação da camada, o conteúdo de umidade do grão (seu estado higroscópico), a temperatura e a umidade do ar de secagem de entrada e saída do leito de grãos e, por fim, o calor específico do malte. Segundo Briggs (1998), outros fatores significativos são a temperatura do ar entre os grãos e o seu grau de contração durante a secagem.

De acordo com Lopez *et al* (1998), secadores de leito fixo são os mais comuns entre os secadores agropecuários. Trabalhos visando identificar a influência dos parâmetros da secagem em leito profundo foram desenvolvidos por Bakker-Arkema *et al* (1967), Boyce (1965), Brooker *et al* (1974), Hukill (1954), Spencer (1969), entre outros.

Além de ser determinante para a definição das características finais do malte, a secagem também desempenha um papel crítico no que se refere à viabilidade econômica de uma maltaria por ser a etapa do processo de maior demanda energética. A eficiência da secagem está relacionada com a capacidade que o ar tem de absorver umidade enquanto escoar através da camada de grãos.

Neste âmbito, este trabalho tem por objetivo implementar um modelo matemático do fenômeno da secagem a fim de avaliar como cada um dos fatores descritos influencia no desenvolvimento da secagem. Ao prever estes parâmetros, é possível projetar secadores mais eficientes e trazer melhorias para os sistemas de secagem já existentes. A simulação computacional pode ser aplicada para otimização e melhoria do controle de processo conforme Zare *et al* (2009). Para que se tenha um processo de secagem automatizado, a simulação é um elemento essencial para retroalimentar o sistema e garantir uma secagem otimizada, de modo a buscar eficiência em tempo e consumo sem comprometer a qualidade final do produto.

2. FUNDAMENTAÇÃO

No intuito de desenvolver um modelo que descreva o fenômeno da secagem do malte, é essencial o entendimento dos processos de transformação que a cevada sofre nas maltarias até se dar início ao processo de secagem. Além disso, é necessária a compreensão teórica do fenômeno. Diversos modelos podem ser aplicados para descrever a física do processo. Conhecer as condições de aplicação e a peculiaridade de cada um é crucial na interpretação correta dos resultados.

2.1 Malteação de cevada

De acordo com Briggs (1998), a malteação é possivelmente o mais antigo sistema de biotecnologia existente no mundo. Estima-se que o processo, juntamente com o de produção de cerveja, é praticado há pelo menos seis mil anos. O processo nada mais é do que a germinação controlada de grãos ou sementes. Nas regiões industrializadas do mundo, o malte feito a partir da cevada é de longe o de maior relevância, afirma Briggs (1998).

Ao ser recebida nas maltarias, antes de iniciar sua transformação em malte, a cevada é limpa e pré-selecionada para então ser estocada em silos. A malteação tem como objetivo promover a produção de enzimas no grão de cevada e as mudanças na sua composição química. Kunze (2004) afirma que o malte possui características visuais semelhantes às da cevada da qual foi produzido.

O processo de transformação da cevada em malte é composto por três macro etapas: maceração, germinação e secagem, conforme Hamalainen *et al* (2007).

2.1.1 Maceração

Briggs (1998) descreve que o objetivo da maceração, além de lavar e limpar a cevada, é permitir que ela, durante esse processo, absorva água de forma constante e uniforme até um nível especificado. O objetivo é que, ao final do processo, o grão se encontre no estado fisiológico ideal.

No momento em que a cevada encontra-se estocada, as enzimas que são importantes para o processo de malteação encontram-se em grande parte em atividade reduzida ou até mesmo inativas. Durante o processo de maceração, água é fornecida aos grãos. Como resultado, as enzimas tornam-se ativas e o processo conhecido como germinação se inicia, confirma Kunze (2004).

Os grãos de cevada, dispostos em funis, são mergulhados em água, com períodos úmidos alternados com períodos secos. O conteúdo de umidade da cevada é elevado a cerca de 42-45% nesta etapa, quando se dá início o processo de germinação.

2.1.2 Germinação

Durante a germinação, uma nova planta é formada dentro do grão de cevada. Para que a germinação ocorra, o grão necessita de uma grande quantidade de energia para transformar as substâncias internas produzidas através da respiração e de outros processos metabólicos. Antes do grão estar em condições de reagir com o ambiente, as reservas energéticas presentes no seu endosperma devem ser extraídas para que se dê início o seu desenvolvimento, estabelece Kunze (2004).

Durante a etapa de germinação, a cevada é mantida em caixas de germinação. A cevada é posicionada sobre um plano perfurado que permite o escoamento de ar através do leito. Um sistema de revolvimento é acoplado à caixa com o objetivo de homogeneizar e nivelar a camada

de grãos, auxiliar na respiração, e evitar passagens preferenciais de ar ao longo da caixa. O revolvimento se dá por meio do acionamento da máquina de revolvimento, que é composta de roscas transversais e se desloca na extensão da caixa.

Um alto teor de umidade é mantido durante o processo, com temperaturas variando entre 13 e 16°C. Tais temperaturas são necessárias por se tratar de um processo exotérmico, em que existe a transferência de energia do interior dos grãos para o meio externo.

2.1.3 Secagem

A etapa de germinação é interrompida através da secagem do malte verde, ou malte úmido, a fim de evitar que o grão continue sofrendo transformações e prevenir perdas, afirma Kunze (2004). Além disso, segundo Boulton *et al* (2001), a secagem tem o objetivo de prevenir a inativação das enzimas do malte que serão necessárias nas etapas que antecedem o processo de fermentação nas cervejarias. O malte verde, após finalizada a etapa de germinação, não pode ser diretamente estocado e não está em condições de ser transportado para as cervejarias devido a sua volatilidade.

Para que os objetivos da secagem sejam alcançados, deve haver uma redução do conteúdo de umidade dos grãos. A umidade é reduzida de aproximadamente 40% para menos de 5% a fim de tornar o malte estável e manter a sua preservação. Com esta redução, os processos de germinação e de modificação são interrompidos pelo encerramento das atividades enzimáticas, conforme Kunze (2004).

Os programas de secagem se iniciam a baixas temperaturas e vão gradativamente se intensificando com o aumento da temperatura do ar de secagem. Na primeira fase, antes da exposição a temperaturas mais elevadas, o grão é pré-aquecido com o objetivo de proteger as enzimas. A segunda etapa da secagem é conhecida como “secagem livre”. Neste período, o malte está úmido e a água presente na superfície do grão pode ser facilmente removida com um alto fluxo de ar, que é o fator determinante da taxa de remoção de umidade nesta etapa. Se o ar de saída do leito de grãos está na sua condição de máxima absorção de umidade, o processo de secagem opera na sua máxima eficiência, afirmam Lewis *et al* (2002). Para atingir essa condição, pequenos ajustes são feitos aumentando a temperatura do ar de secagem.

Encerrada a fase de secagem livre, água deve se transferir do interior do grão até sua superfície através do processo de difusão. Este terceiro estágio é conhecido como “secagem forçada”, e seu conteúdo de umidade é reduzido para aproximadamente 12 a 10%. Lewis *et al* (2002) complementam que, nesta etapa, a temperatura do ar é elevada para a faixa de 70 a 75°C para acelerar o processo difusivo de transferência de massa.

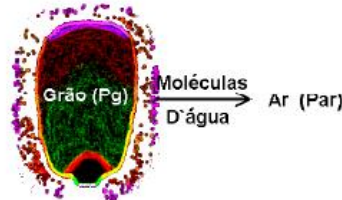
Quando o conteúdo de umidade do grão se aproxima dos 5%, inicia-se o estágio conhecido como cura. A temperatura do ar é novamente elevada, variando de 80 a 110°C dependendo do tipo de malte a ser produzido. Neste processo são definidas as características finais de cor, aroma e sabor do malte. Em virtude da alta necessidade térmica, a secagem é a etapa de maior demanda energética de todo processo de malteação, consumindo aproximadamente 75 a 80% de toda energia utilizada, concluem Lewis *et al* (2002).

2.2 Princípios de secagem

Bala (2017) afirma que a secagem é definida como sendo a remoção de umidade dos grãos através do emprego de calor. É uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas que tem por finalidade retirar parte da água neles contida. A transferência da água do meio interno, grão, para o meio externo, ar, se dá através da existência de gradientes de pressão de vapor de água e de gradientes de temperatura entre o interior e a superfície do grão a ser seco. Esses gradientes servem de força motriz para que ocorram as transferências de calor e de massa

no sistema. A condição necessária para que ocorra a secagem de um produto é que a pressão de vapor sobre a superfície do produto seja maior do que a pressão de vapor de água no ar de secagem, conforme a Fig. 1, descreve Silva (2008).

Figura 1 - Ilustração do fenômeno da secagem no grão.



Fonte: Silva (2008)

Os secadores podem ser divididos em sistemas estacionários e sistemas contínuos. Nos estacionários, os grãos são expostos ao ar de secagem e posicionados em camadas estáticas dentro de estufas ou silos. Já nos sistemas contínuos, os grãos se movem continuamente na câmara de secagem. De acordo com Aregba *et al* (2005), os sistemas contínuos são classificados em cruzados, concorrentes e contra-correntes. Sistemas de camada fixa, também conhecidos como sistemas de leito fixo, são dos tipos mais comuns de secadores de grãos, projetados para secagem heterogênea em camada profunda (profundidade superior a 20 cm), em que a secagem é mais rápida na entrada do secador quando comparada a sua saída, afirmam Lopez *et al* (1998).

2.2.1 Teor de umidade

De acordo com Pabis *et al* (1998), o termo teor de umidade, ou conteúdo de umidade, se refere à média de umidade existente em um grão. Essa umidade pode ser expressa de duas maneiras. O conteúdo de umidade expresso em base seca, X_p , deste sólido é definido como

$$X_p = W/S_p \quad (1)$$

O conteúdo de umidade do sólido, X_w , pode também ser expresso em base úmida da seguinte forma

$$X_w = W/S \quad (2)$$

Para converter o teor de umidade da base seca para base úmida utiliza-se a Eq. (3)

$$X_w = X_p/(1 + X_p) \quad (3)$$

Segundo Bala (2017), o conteúdo de umidade em base úmida é geralmente usado no âmbito comercial e universalmente adotado por fazendeiros, agricultores e comerciantes. Já o conteúdo de umidade em base seca é predominantemente utilizado por pesquisadores e aplicado em cálculos de engenharia.

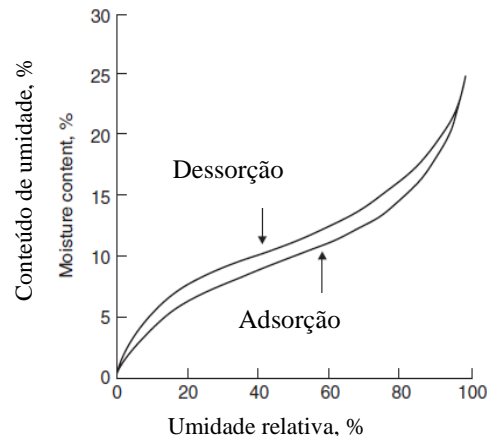
2.2.2 Umidade de equilíbrio

Segundo Bala (2017), a umidade de equilíbrio é definida como o conteúdo de umidade de um material após a sua exposição a um ambiente específico por um período suficientemente longo de tempo.

A relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio de qualquer material em função da umidade relativa do ar, a uma temperatura de ar constante, é representada por uma isoterma. A isoterma de adsorção ocorre quando o material está exposto a um ambiente úmido, e a isoterma de dessorção quando exposto a um ambiente seco.

A forma da isoterma de equilíbrio para produtos agrícolas corresponde a isotermas de materiais coloidais capilares-porosos e seguem uma curva sigmoide conforme a Fig. 2.

Figura 2 – Representação das isotermas de adsorção e dessorção.



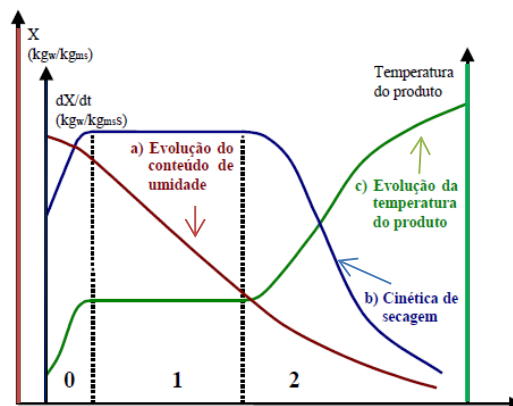
Fonte: Adaptado de Bala (2017)

2.2.3 Curva de secagem

Considerando um corpo úmido no qual há água em sua superfície, submetido a um ar de secagem com temperatura e umidade relativa que permanecem constantes, inicia-se uma transferência de calor do ar para o produto devido à diferença de temperatura entre os dois meios. Ao mesmo tempo em que ocorre a transferência de calor, ocorre também a transferência de massa na forma de vapor de água devido à diferença de pressão parcial de vapor existente entre o ar e a superfície do produto.

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem pode ser representada esquematicamente em três períodos, afirma Park (2008). A Fig. 3 ilustra a evolução do conteúdo de umidade do grão, da sua temperatura e da taxa de secagem ao longo do tempo.

Figura 3 – Evolução da taxa de secagem, da temperatura do grão e da cinética de secagem e seus respectivos períodos ao longo da secagem.



Fonte: Adaptado de Park (2008)

O período 0 corresponde à fase em que o sistema entra em regime operacional. Neste momento, a temperatura do ar é maior que a temperatura do grão e então a transferência de calor para o produto ocorre até que essa se iguale à taxa de transferência de massa do grão para o ar, correspondente à evaporação da água.

No período 1, a taxa de secagem permanece constante e a água presente no grão evapora como água livre. A pressão de vapor de água na superfície do grão é constante e corresponde à pressão de vapor de água pura na temperatura do produto. A temperatura do grão permanece constante e de magnitude igual à temperatura de bulbo úmido. Segundo Pabis *et al* (1998), se todas as perdas forem negligenciadas, todo o calor transferido para o sólido é utilizado para a evaporação da água.

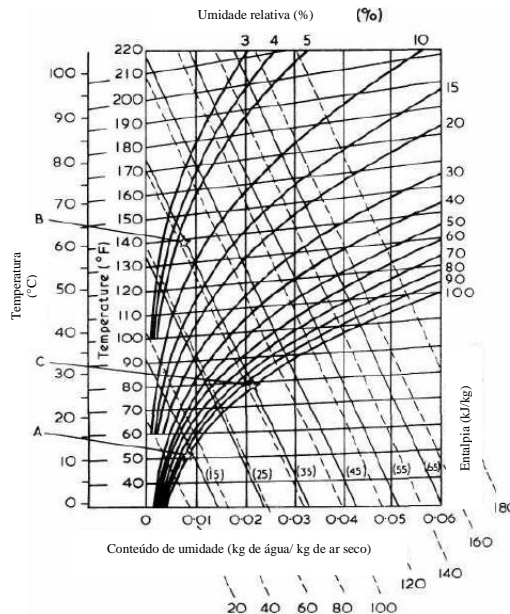
O período 2 é caracterizado pelo decaimento da taxa de secagem. O valor do conteúdo de umidade correspondente a esta transição é conhecido como conteúdo crítico de umidade. Nesta etapa, a taxa de secagem decresce porque a resistência à transferência de água no interior do sólido é maior do que da superfície do sólido para o meio externo. Nestas condições, a energia fornecida causa uma elevação na temperatura do grão. Se o tempo é suficientemente longo, a taxa de secagem tende a zero e o grão atinge o seu conteúdo de umidade de equilíbrio para a dada condição do ar de secagem.

2.3 Secagem em camada fixa

Na secagem em camada fixa, ou leito fixo, os grãos permanecem estáticos durante todo o processo, que geralmente ocorre em estufas de seção transversal retangular em que o ar é impulsionado por ventiladores centrífugos ou axiais através de radiadores que permitem o seu aquecimento. A fim de evitar passagens preferenciais do ar de secagem, a camada de malte distribuída na estufa deve ter a altura mais uniforme possível.

Conforme o ar quente, a uma temperatura constante, vai ao encontro do leito de malte verde, as camadas inferiores são as primeiras a secar e, ao passar na extensão do leito, o ar se resfria à medida em que evapora a umidade dos grãos. No momento em que o ar entra em equilíbrio com o leito, a evaporação cessa. O fenômeno pode ser descrito como uma zona de secagem, de aproximadamente 20 cm de altura, em que a frente de secagem vai avançando em direção às camadas superficiais. Até que isso ocorra, o ar de exaustão sai à temperatura constante e no estado de saturado. Este período corresponde à fase de secagem livre. A menos que o ar de secagem remova umidade na sua máxima capacidade, isto é, que não emerja da camada superficial saturado, calor estará sendo desperdiçado, afirma Briggs (1998). O diagrama de secagem de Mollier, apresentado na Fig. 4, é utilizado para fazer aproximações sobre a secagem. Nele, parte-se do pressuposto de que o sistema ar-grão-umidade no leito é adiabático, ou seja, o sistema está em equilíbrio térmico e não há adição ou perda de calor.

Figura 4 – Diagrama de secagem de Mollier. Ponto A: ar ambiente. Ponto B: ar ambiente aquecido. Ponto C: ar de exaustão do leito de secagem.



Fonte: Adaptado de Briggs (1998)

Quando a frente de secagem atinge a camada mais superficial do leito, ocorre o que é conhecido como ponto de quebra. A partir deste momento, a umidade relativa do ar de saída começa a cair à medida em que sua temperatura aumenta. Esta fase corresponde ao período decrescente da taxa de secagem. A elevação da temperatura do ar de exaustão é geralmente utilizada como referência para se dar início à fase de cura, completa Briggs (1998).

2.4 Modelo matemático de secagem em camada fixa

O tempo e a eficiência da secagem dependem das condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem a ser empregado no sistema. É essencial o controle dos parâmetros de temperatura e conteúdo de umidade do grão durante a secagem, a fim de preservar e desenvolver as características finais do grão durante o processo. O uso de modelos matemáticos tem o intuito de melhor prever a evolução desses parâmetros e possibilitar uma análise de desempenho, visando a otimização dos sistemas de secagem.

Conforme Pabis *et al* (1998), os modelos de camada fixa, ou leito fixo, podem ser divididos em três categorias: modelos de equilíbrio; modelos de não equilíbrio, também conhecidos como modelo das equações diferenciais parciais; e, por fim, modelos logarítmicos.

2.4.1 Modelo de camada fina

Uma camada fina de grãos é uma camada submetida a uma secagem por convecção que pode ser modelada pelas mesmas equações que um grão isolado submetido a um ar de secagem, afirmam Pabis *et al* (1998).

O conceito de camada fina é também aplicado aos modelos de camada fixa, compostos por multicamadas de grãos. Por definição, não há gradientes de temperatura ou de conteúdo de umidade em uma camada fina. A equação de camada fina, assim como o conteúdo de umidade de equilíbrio, compõe o sistema de equações utilizado para a modelagem dos sistemas de secagem de camada fixa.

2.4.2 Modelo logarítmico

O modelo logarítmico se baseia em uma solução analítica, e não requer um alto custo computacional para a implementação da sua solução numérica. Devido às complexas técnicas iterativas e de discretização inerentes aos outros modelos, o modelo logarítmico se torna atraente como alternativa de aplicação para entender as influências dos parâmetros de secagem e a eficiência do processo.

O primeiro modelo logarítmico foi desenvolvido por Hukill (1954) para modelagem de processo de secagem de grãos. De acordo com Pabis *et al* (1998), o modelo é baseado na relação direta entre a taxa de secagem de uma camada de grãos em um leito profundo e o gradiente de temperatura do ar através dessa camada.

Aregba *et al* (2005) afirmam que o balanço de energia dentro do volume de controle isolado da camada de grãos assume que o calor sensível perdido pelo ar fluindo através do leito é equivalente ao calor latente devido à evaporação da umidade. A equação é definida por

$$\rho_{da}V_{a0}C_{pda} \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial x} = L_v\rho_{dp} \frac{\partial X_p(x,t)}{\partial t} \quad (4)$$

A Eq. (4) mostra a relação de duas variáveis. Para obter outra relação independente, Baughman *et al.* (1971) propõem a simplificação da equação introduzindo o conceito da taxa de deslocamento da zona de secagem Q em $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$

$$Q = (T_a(0,t) - T_a(x,0))/(X_p(x,0) - X_p(0,t))(\rho_{da}V_{a0}C_{pda}/L_v) \quad (5)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (5)

$$\rho_{dp} \frac{\partial X_p(x,t)}{\partial t} = -Q \frac{\partial X_p(x,t)}{\partial x} \quad (6)$$

As seguintes variáveis baseadas na Teoria das Unidades de Transferência (NTU) são definidas:

Altura da unidade de transferência (HTU) H , em m, dada pela Eq. (7)

$$H = \frac{1}{K} \rho_{da}V_{a0}C_{pda}(T_a(0,t) - T_{am})/(L_v\rho_{dp}(X_{pi} - X_{eq})) \quad (7)$$

Em que K é a constante de secagem da equação cinética de camada fina, em $1/\text{s}$.

O tempo de residência do escoamento na altura da unidade de transferência H , em s, é definido pela Eq. (8)

$$\tau = H/V_{a0} \quad (8)$$

Já a razão da máxima energia volumétrica necessária para a evaporação pela energia disponível no ar de secagem ν , adimensional, é dada pela Eq. (9)

$$\nu = L_v\rho_{dp}(X_{pi} - X_{eq})/(\rho_{da}V_{a0}C_{pda}(T_a(0,t) - T_{am})) \quad (9)$$

O modelo é reescrito em termos das variáveis adimensionais:

- Razão de umidade

$$X(x, t) = (X_p(x, t) - X_{eq}) / (X_{pi} - X_{eq}) \quad (10)$$

- Razão de temperatura

$$T(x, t) = (T_a(x, t) - T_{am}) / (T_{a0} - T_{am}) \quad (11)$$

- Variável adimensional de tempo

$$\theta(t) = Kt \quad (12)$$

- Variável adimensional de profundidade

$$v(x) = x(L_v K \rho_{ap} (X_{pi} - X_{eq})) / (\rho_{da} V_{a0} C_{pda} (T_{a0} - T_{am})) \quad (13)$$

Hukill (1954) propôs as seguintes condições iniciais e de contorno

$$(T_a(x, 0) - T_{am}) / (T_a(0, t) - T_{am}) = e^{-x/H} \quad (14)$$

$$T_a(0, t) = T_{a0} \quad (15)$$

$$(X_p(0, t) - X_{eq}) / (X_p(x, 0) - X_{eq}) = e^{-Kt} \quad (16)$$

$$X_p(x, 0) = X_{pi} \quad (17)$$

Com as Eq. (10) – Eq. (13), e Eq. (5), o conjunto de equações do modelo logarítmico para a umidade é

$$\frac{\partial X(v, \theta)}{\partial \theta} = - \frac{1}{1 - X(0, \theta)} \frac{\partial X(v, \theta)}{\partial v} \quad (18)$$

$$X(0, \theta) = e^{-\theta} \quad (19)$$

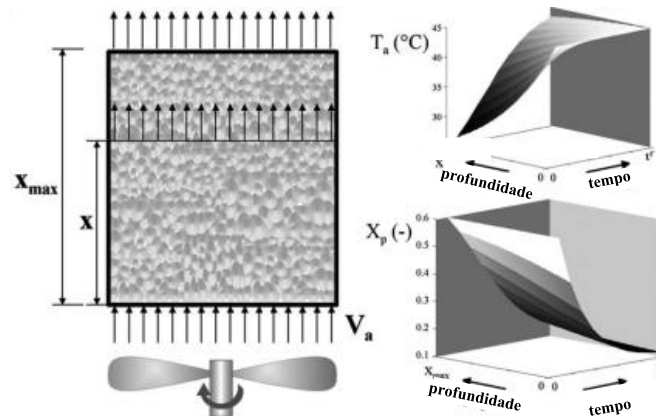
$$X(v, 0) = 1 \quad (20)$$

A solução do sistema de equações é obtida através do método das equações características, e é descrita pela Eq. (21)

$$X(v, \theta) = e^v / (e^v + e^\theta + 1) \quad (21)$$

A Eq. (21) reproduz a superfície de distribuição do conteúdo de umidade para as variáveis independentes de tempo e profundidade, como mostra a Fig. 5.

Figura 5 – Representação esquemática do domínio de cálculo e das distribuições de temperatura e de umidade na camada de grãos do modelo de secagem em camada fixa.



Fonte: Adaptado de Aregba *et al* (2005)

3. CASO DE ESTUDO

O processo de secagem descrito no presente trabalho ocorre em uma estufa retangular de dimensões 15 x 15 m. Conforme Tancredo (2015), no plano inferior da estufa, ar ambiente é impulsionado sobre radiadores e, posteriormente, sobre a camada de grãos a uma vazão de aproximadamente 100 m³/s. Antes de passar pelos radiadores, o ar escoa no interior de um vão formado entre o teto e o telhado do prédio. O telhado é pintado com tinta escura especial com o objetivo de elevar sensivelmente a temperatura do ar antes da entrada nos radiadores. São utilizados dois ventiladores axiais, ambos operando a 705 rpm. Os radiadores são alimentados com água à temperatura de 160°C. A água é fornecida através de uma caldeira flamotubular com pressão de operação de 6,5 bar. O combustível de queima da caldeira é o gás natural.

A fim de avaliar a significância do modelo proposto, foram extraídas amostras durante o processo de secagem para comparar os valores obtidos através do modelo logarítmico com os valores experimentais.

3.1 Descrição das análises experimentais

O experimento foi realizado nas primeiras duas horas da etapa inicial da secagem, para quatro diferentes condições de secagem. A altura total da camada de grãos em todos os experimentos foi de 60 cm. As amostras foram coletadas a 7 cm de altura da base, em intervalos de 20 min, com o auxílio de um calador graneleiro, conforme ilustrado na Figura 1C, localizada no Apêndice C. Visando a reduzir as possíveis heterogeneidades da distribuição dos grãos no leito de secagem, todas as amostras foram realizadas no mesmo ponto da estufa, para todas as condições de secagem.

A análise das amostras coletadas foi realizada em laboratório. Para determinação dos conteúdos de umidade, utilizou-se o Método da Estufa em uma Estufa de Secagem e Esterilização Mod. 320-SE da marca FANEM. A balança utilizada foi uma Sartorius TE214S. Esse método é comumente aplicado para determinação de umidade em grãos e consiste em:

1. Moer amostras duplicatas de 5-6 g cada e pesá-las utilizando uma balança de precisão.
2. Aquecer as amostras em estufa por 3 h a 106°C.
3. Remover as amostras da estufa e descansá-las em um dessecador. Após 30 min, pesá-las novamente e calcular a umidade em base úmida através da Eq. (22):

$$X_w = (S_i - S_f)/S_i \quad (22)$$

3.2 Aplicação do modelo logarítmico

Para a aplicação do modelo logarítmico, foram adotadas as seguintes premissas:

1. A variação do calor sensível do ar devido à absorção de umidade é desprezível.
2. O calor sensível necessário para elevar a temperatura do grão é insignificante comparado ao calor latente de vaporização da umidade.
3. O calor sensível necessário para elevar a temperatura do vapor de água removido é mínimo.
4. A densidade do grão e o calor latente de vaporização são constantes durante o processo.
5. A redução de volume da camada de grãos devido à secagem é desprezível.
6. A transferência de massa e de calor por condução entre os grãos é desprezada.
7. O sistema ar-grão-umidade no leito é adiabático.

As temperaturas do ar ambiente externo, do ar de secagem, assim como do ar de exaustão foram registradas através do uso de sensores PT100. A umidade do ar externa e a umidade do ar de exaustão foram medidas por meio de sensores RHT-WM. Todos os sensores estavam localizados nos planos de entrada e de saída da estufa. Os dados foram armazenados no sistema através de um sistema de aquisição de dados (*data logger*) e então coletados para análise.

Para determinação das constantes utilizadas no modelo, foram utilizadas as seguintes relações:

- Para o calor latente de vaporização, de Bala (1983)

$$L_v = (2500,6 - 2,36T_a)(1 + 0,5904 \exp(-0,1367X_p))/1000 \quad (23)$$

- Para a densidade do malte seco, de Bala (1983)

$$\rho_{dp} = 527 - 4,4481X_w \quad (24)$$

- Para a constante de secagem, da secagem de camada fina, de Bala (1983)

$$K = 186600 \exp\left(-\frac{6819,52}{273,15+T_a}\right) \quad (25)$$

- Para o conteúdo de equilíbrio de umidade do malte, de Lopez *et al* (1998)

$$X_{eq} = (A \cdot B \cdot C \cdot RH) / ((1 - C \cdot RH) \cdot (1 + (B - 1) \cdot C \cdot RH)) \quad (26)$$

Sendo,

$$A = 0,01183 \exp\left(\frac{469,017}{T_a}\right) \quad (27)$$

$$B = \exp\left(\frac{943,854}{T_a}\right) \quad (28)$$

$$C = \exp\left(-\frac{28,639}{T_a}\right) \quad (29)$$

Na Tabela 1 são exibidos os valores adotados para as constantes do ar de secagem.

Tabela 1 - Constantes do ar de secagem utilizadas no modelo logarítmico.

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valor
Calor específico do ar seco	$C_{p_{da}}$	J/kg/K	1004,8
Densidade do ar seco	ρ_{da}	kg/m ³	1,29
Velocidade do ar de secagem	V_{a0}	m/s	0,44

Na Tabela 2 são apresentados os valores medidos e adotados no modelo para a temperatura, assim como para a respectiva umidade relativa do ar de secagem em cada condição.

Tabela 2 – Valores médios de temperatura e umidade do ar de secagem para as condições de secagem

Condição de secagem	Umidade relativa do ar de entrada (%)	Temperatura do ar de entrada (°C)	Temperatura do ar de exaustão (°C)	Umidade relativa do ar de exaustão (%)
1	10,88	52,78	27,71	88,36
2	20,62	50,27	30,02	86,68
3	14,64	49,09	27,27	84,13
4	20,52	49,76	30,72	80,65

A fim de avaliar o grau de correspondência entre o modelo e os resultados experimentais, utilizou-se o erro padrão e a soma dos quadrados dos resíduos. A diferença entre o valor amostral e o valor calculado pelo modelo para cada ponto foi determinado utilizando

$$r = Y_{exp} - Y_{mod} \quad (30)$$

Para cada condição de secagem, foi realizado o cálculo do erro padrão através de

$$S_e = \sigma_r / \sqrt{n} \quad (31)$$

Para o cálculo da soma dos quadrados das diferenças foi utilizada a Eq. (32)

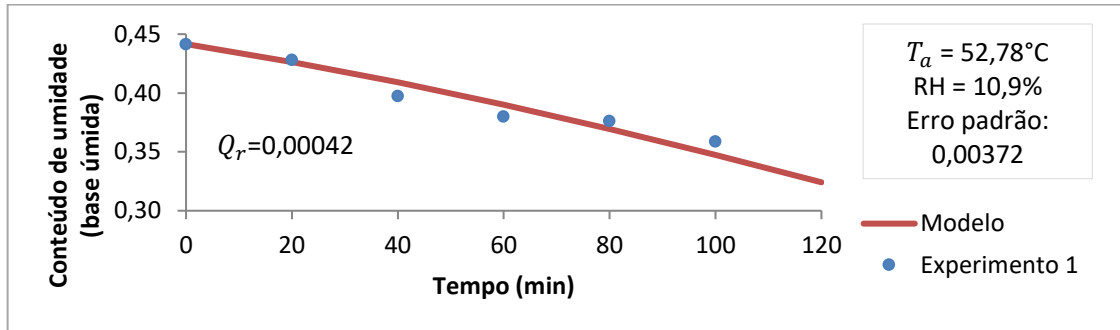
$$Q_r = \sum_{z=1}^n (Y_{exp_z} - Y_{mod_z})^2 \quad (32)$$

Os registros dos resultados amostrais encontram-se no Apêndice A. Já os resultados obtidos para os cálculos de erros padrão e soma dos quadrados das diferenças encontram-se no apêndice B.

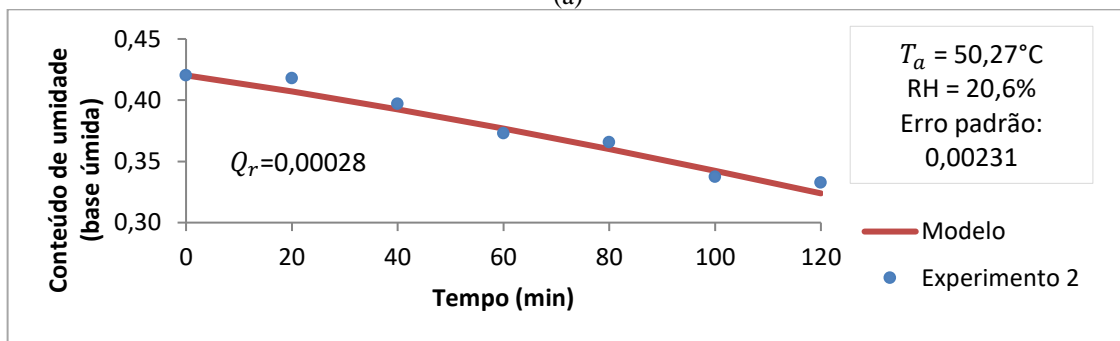
4. RESULTADOS

Para avaliar a aplicabilidade do método de determinação do conteúdo de umidade durante a secagem, foi realizada a comparação da evolução da umidade calculada com os resultados experimentais das diferentes condições de secagem. Os resultados são apresentados na Fig. 7.

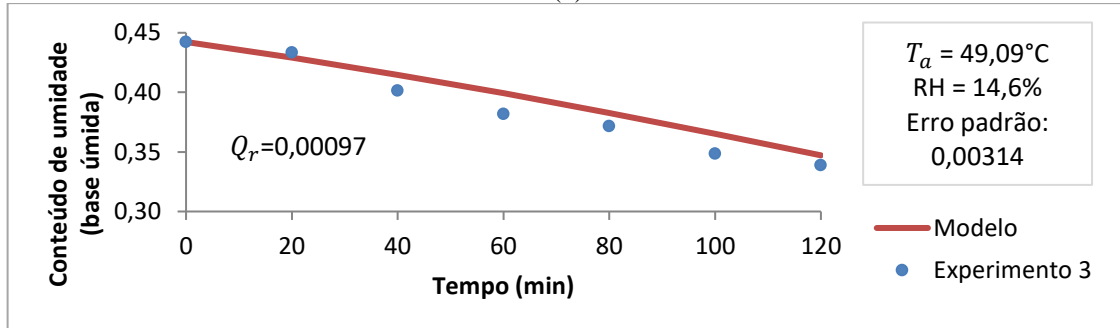
Figura 7 – (a) Comparação do resultado experimental 1 com o resultado calculado; (b) Comparação do resultado experimental 2 com o resultado calculado; (c) Comparação do resultado experimental 3 com o resultado calculado; (d) Comparação do resultado experimental 4 com o resultado calculado.



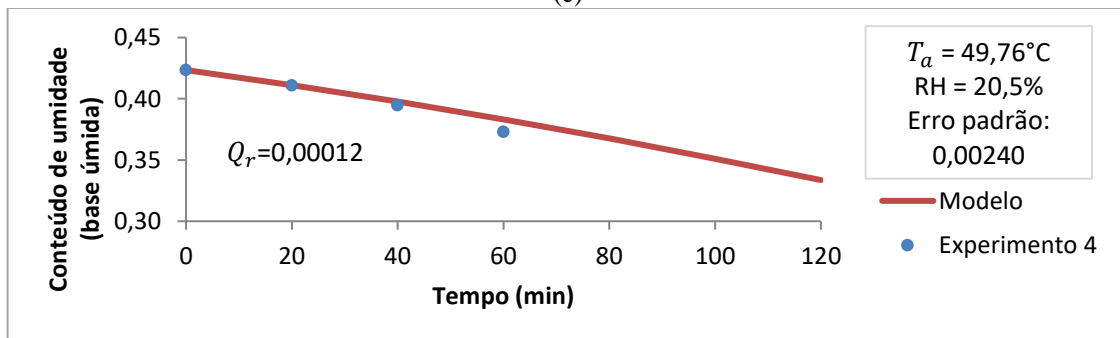
(a)



(b)



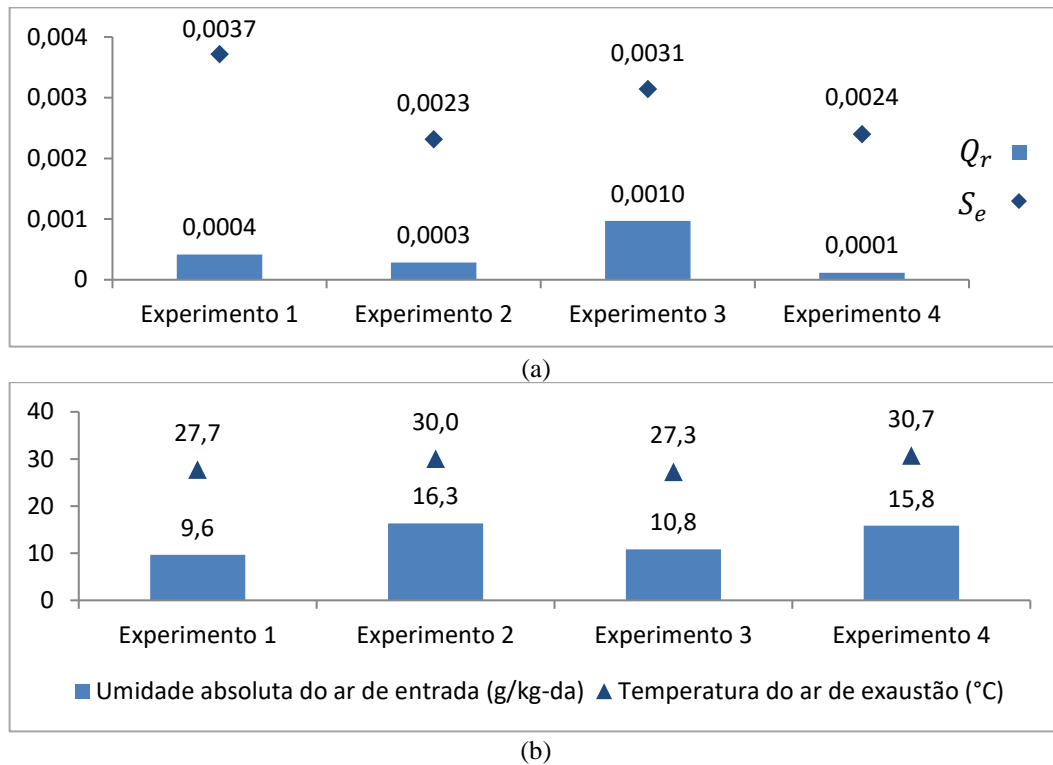
(c)



(d)

A comparação das medidas de discrepância entre os resultados calculados e as medições experimentais está ilustrada na Fig. 8.

Figura 8 – (a) Valores de erro padrão e da soma dos quadrados das diferenças para cada experimento; (b) Condições de umidade absoluta média do ar de entrada e temperatura de exaustão média do ar para cada experimento.



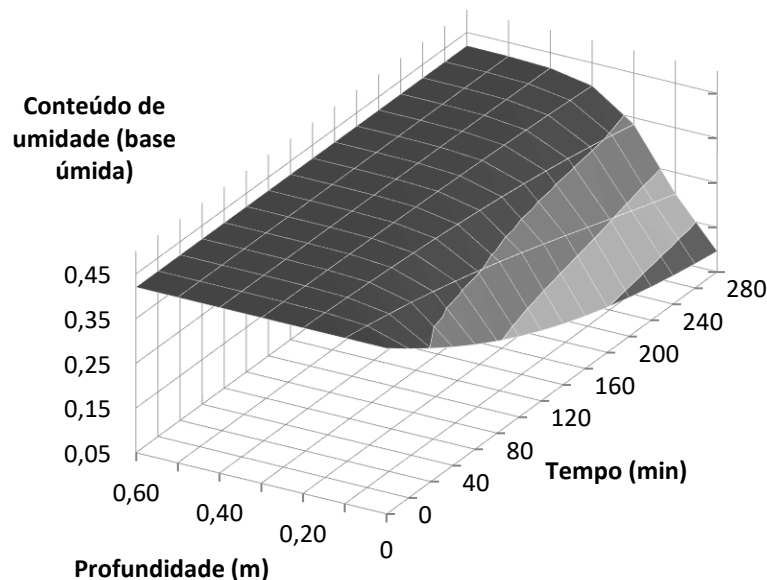
Para as situações de secagem dos experimentos 2 e 4, o modelo calculado apresentou as menores dispersões dos resíduos, proporcionalmente ao número de amostras, e também as menores somas quadráticas, resultando em uma maior compatibilidade entre os pontos calculados e os pontos experimentais. Esses resultados foram obtidos para os dias mais úmidos. Observa-se ainda que, para condições mais úmidas de secagem, a temperatura de equilíbrio atingida pelo ar de exaustão é maior quando comparada à temperatura de equilíbrio para uma condição mais seca de ar de secagem, resultado que vai de acordo com o diagrama de Mollier apresentado. Para todos os experimentos realizados, o modelo se apresenta de forma quase linear, caracterizando o período de taxa constante de secagem.

Não se pode relacionar a precisão do modelo com as condições experimentais obtidas neste trabalho, devido ao fato dos experimentos terem sido realizados numa instalação industrial, durante o processo de produção de malte, e não num ambiente apropriado e especificamente dedicado a experimentos científicos. Não houve, devido às restrições impostas por normas operacionais, normas de segurança e por metas de produtividade da empresa, a desejável liberdade para variar a amplitude dos diversos fatores como tempo de secagem, temperatura do ar, umidade do ar, número de experimentos e número de amostras, inerentes aos experimentos. Vários fatores também contribuíram para estes resultados. Dentre eles, vale destacar que os experimentos foram realizados em dias distintos; que os graus de compactação dos grãos ao serem distribuídos na estufa não foram iguais para todas as secagens; que o material de coleta disponível tinha pouca precisão; e o fato de existir a transição inicial para o regime operacional de secagem. Junto disso, as amostras foram obtidas de distintos lotes de produção, apresentando, portanto, diferentes características na sua composição físico-química devido aos programas prévios de maceração e de germinação. Para finalizar, as considerações adotadas

para a aplicação do modelo e a utilização de bibliografia externa para obtenção das equações das propriedades do malte também impactaram no resultado.

A Fig. 9 apresenta a distribuição teórica da umidade do grão, em função do tempo e da profundidade da camada, para a condição de secagem em que o modelo apresentou a maior concordância com os dados experimentais.

Figura 9 – Distribuição da umidade na camada de grãos em função do tempo de secagem.



5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo implementar o modelo logarítmico de Hukill (1954) para descrever o fenômeno da secagem de malte em leito fixo profundo a fim de obter uma ferramenta computacional para estudar a influência das condições operacionais sobre o desempenho do processo. Os dados utilizados foram obtidos através da medição das propriedades durante o processo de secagem em um ambiente industrial. O modelo reproduziu bem a secagem para as condições do processo em que foram extraídas as amostras. Foi feita a simulação da etapa de secagem com taxa constante. Os resultados calculados apresentaram maior concordância com os dados experimentais para as condições mais úmidas de ar de secagem.

Considerando as restrições impostas à realização do trabalho pelas exigências operacionais da unidade fabril onde os experimentos foram realizados, houve uma limitação na faixa de condições operacionais para as quais se conseguiu os resultados experimentais. Ainda assim, esse trabalho preliminar mostrou o potencial de utilização do modelo proposto para estudos do processo de secagem. Para futuros trabalhos, é sugerido que os experimentos sejam realizados em um ambiente concebido especificamente para testes científicos. Tal condição se torna ideal para que seja possível variar a faixa de condições operacionais que são determinantes na dinâmica da secagem com a devida precisão e controle do processo.

Por fim, em face do objetivo proposto, os resultados foram satisfatórios em relação à expectativa inicial estabelecida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aregba A. W., Sebastian P., Nadeau J. P., (2005). **Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model.** Journal of Food Engineering, 77, 27-40.
- Bakker-Arkema, F. W., Bickert, W. G., and Morey R. V., (1967). **Combined heat and mass transfer in-bin grain drying.** Landtechn. Forsch, 17:175-183.
- Bala, B. K., (1983). **Deep Bed Drying of Malt.** PhD. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
- Bala, B. K., (2017). **Drying and Storage of Cereal Grains.** Second edition. Chichester. John Wiley & Sons, Inc.
- Baughman, G. R., M. Y. Hamdy, and H. J. Barre, (1971). **Analog computer simulation of deep bed drying of grain.** Trans. ASAE 12:1058-1060.
- Boulton, C., & Quain, D., (2001). **Brewing Yeast and Fermentation.** First edition. Oxford: Blackwell Publishing.
- Boyce, D. S., (1965). **Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying.** J. Agric. Engrg. Res 10:333-341.
- Briggs, D. E., (1998). **Malts and Malting.** First edition. London. Published by Blackie Academic & Professional.
- Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema, and C. W. Hall, (1974). **Drying Cereal Grains.** AVI, Westport, CT.
- CervBrasil (2018), **Mercado Cervejeiro.** Acesso em setembro de 2019, disponível em http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/mercado-cervejeiro/
- Hamalainen, J. J., Reinikainen, P., (2007). **A simulation Model for Malt Enzyme Activities in Kilning.** J Inst Brew, 113: 159-167.
- Hukill, W. V., (1954). **Grain Drying.** in: J.A., Anderson. A.W. Alcock (Eds.), Storage of cereal grain and their products. Amer. Ass. Cereal Chem, St. Paul, Minn.
- Kunze, W., (2004). **Technology Brewing and Malting.** Third edition. Berlin. Published by Die Deutsche Bibliothek.
- Kunzte, T. M. and Saxén, H., (1995). **Simulation of deep-bed kilning of malt.** Ind. Eng. Chem. Res., 33, 321-328.
- Lewis, M. K., Young, T. W., (2002). **Brewing.** Second edition. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Lopez, A., Pique, M.T., Romero, A., (1998). **Simulation on deep bed drying of hazelnuts.** Drying Technology 16, 651-665.

Pabis S. Jayas D. S. Cenkowski S., (1998). **Grain Drying Theory and Practice**. First Edition. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Park K. J. B., (2008). **Construção de um Software de Simulação e Seleção de Equipamentos para Processos de Secagem**. Kil Jin Brandini Park. Campinas, SP: (s.n.).

Silva, J. S., (2008). **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Segunda edição. Editora Aprenda Fácil. Viçosa-MG.

Spencer, H. B., (1969). **A mathematical simulation of grain drying**. J. Agric. Engrg. Res. 14:226-235.

Tancredo, J. T., (2015). **Estudo de caso de melhoria na etapa de secagem de uma maltaria no RS**. 2015.48 f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Zare, D. Chen, G., (2009). **Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying**. J Comput Electron Agric, 68, 78-87.

APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM LABORATÓRIO PARA AS CONDIÇÕES DE SECAGEM

Tabela 1A – Valores das amostras obtidos para a primeira condição de secagem.

Amostra	Tara (g)	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Umidade base úmida (decimal)
A1	7,7156	12,8496	10,5826	0,4416
A2	7,6072	12,6299	10,4790	0,4282
A3	7,4983	12,5247	10,5267	0,3975
A4	8,2452	13,3039	11,3808	0,3801
A5	8,4675	13,5931	11,6651	0,3762
A6	8,2666	13,3039	11,4957	0,3590

Tabela 2A – Valores das amostras obtidos para a segunda condição de secagem.

Amostra	Tara (g)	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Umidade base úmida (decimal)
A1	8,2717	13,3194	11,1980	0,4203
A2	9,7249	14,8087	12,6843	0,4179
A3	7,7297	12,9812	10,8968	0,3969
A4	7,5101	12,6804	10,7527	0,3729
A5	8,2508	13,3958	11,5154	0,3655
A6	8,4681	13,6092	11,8747	0,3373
A7	7,6470	12,6957	11,0163	0,3326

Tabela 3A – Valores das amostras obtidos para a terceira condição de secagem.

Amostra	Tara (g)	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Umidade base úmida (decimal)
A1	8,2754	13,3519	11,1067	0,4423
A2	9,7253	14,8459	12,6260	0,4335
A3	7,7312	12,8789	10,8118	0,4015
A4	7,5116	12,6708	10,7011	0,3818
A5	8,2507	13,4472	11,5157	0,3717
A6	8,4705	13,6692	11,8569	0,3486
A7	7,6477	12,8143	11,0642	0,3387

Tabela 4A – Valores das amostras obtidos para a quarta condição de secagem

Amostra	Tara (g)	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Umidade base úmida (decimal)
A1	8,7216	13,4043	11,2310	0,4234
A2	9,7238	14,7663	12,6945	0,4109
A3	7,7301	12,8810	10,8488	0,3945
A4	7,5101	12,6621	10,7411	0,3729

APÊNDICE B – COMPARAÇÃO DOS VALORES CALCULADOS ATRAVÉS DO MODELO COM OS VALORES EXPERIMENTAIS

Tabela 1B – Valores experimentais e valores calculados com suas respectivas diferenças

Condição de secagem	Valores experimentais	Valores calculados	Diferença
Primeira condição de secagem	0,4416	0,4416	0,00000
	0,4282	0,4262	0,00202
	0,3975	0,4090	-0,01151
	0,3801	0,3900	-0,00991
	0,3762	0,3694	0,00674
	0,3590	0,3473	0,01161
	S_e		0,00372
	Q_r		0,00042
Segunda condição de secagem	0,4203	0,4203	0,00000
	0,4179	0,4070	0,01086
	0,3969	0,3925	0,00437
	0,3729	0,3769	-0,00398
	0,3655	0,3601	0,00536
	0,3373	0,3424	-0,00505
	0,3326	0,3239	0,00878
	S_e		0,00231
Q_r		0,00028	
Terceira condição de secagem	0,4423	0,4423	0,00000
	0,4335	0,4290	0,00446
	0,4015	0,4147	-0,01314
	0,3818	0,3992	-0,01744
	0,3717	0,3827	-0,01105
	0,3486	0,3653	-0,01671
	0,3387	0,3471	-0,00840
	S_e		0,00314
Q_r		0,00097	
Quarta condição de secagem	0,4235	0,4235	0,00000
	0,4109	0,4112	-0,00033
	0,3945	0,3978	-0,00323
	0,3729	0,3832	-0,01035
	S_e		0,00240
	Q_r		0,00012

APÊNDICE C – IMAGEM DA FERRAMENTA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS

Figura 1C – Imagem do calador graneleiro utilizado para extração das amostras.

