

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA EM UM LEITO FIXO
ESPESSO DE GRÃOS DE SORGO COM REVERSÃO DE SENTIDO DO
ESCOAMENTO DE AR

LUAN DA SILVA BARBOSA

SÃO CARLOS – SP

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA EM UM LEITO FIXO
ESPESSO DE GRÃOS DE SORGO COM REVERSÃO DE SENTIDO DO
ESCOAMENTO DE AR**

LUAN DA SILVA BARBOSA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Coorientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS – SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luan da Silva Barbosa, realizada em 31/03/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fabio Bentes Freire (UFSCar)

Prof. Dr. Hugo Perazzini (UNIFEI)

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Dedico este trabalho aos meus pais, Luciano e Cícera
e aos meus irmãos, Luciel e Luana.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela conclusão desta etapa da minha vida, e pela Sua imensa Misericórdia para comigo apesar de mim.

Aos meus pais e meus irmãos que, mesmo distantes, em Alagoas, estiveram sempre presentes nas minhas intenções.

Ao Professor Fábio Bentes Freire, pela sua orientação, amizade, paciência, generosidade, ensinamentos e pelo seu grande exemplo de força e ânimo.

Ao Professor José Teixeira Freire, pessoa de imensa bondade, pelos seus ensinamentos e pela sua dedicação incansável em todos os momentos.

À Professora Maria do Carmo pelo valioso apoio e contribuições, tanto na disciplina de sistemas particulados, como na banca de defesa.

À Professora Geisa, pelas importantes sugestões dadas na etapa de qualificação.

Ao Professor Hugo Perazzini, pelas contribuições dadas na banca de defesa.

Ao técnico Edilson Milaré, por todo o suporte dado.

A todos os amigos que fiz no Centro de Secagem, por terem tornado o ambiente de estudo e pesquisa um lugar divertido e acolhedor, em especial, àqueles com quem tive mais convívio, Thalyne, Guilherme, Amarílis, Luana e Amanda.

À Thalyne, pela amizade já de longa data e pelo grande incentivo que me deu para vir fazer o mestrado em São Carlos, é sempre uma alegria tê-la por perto.

Aos amigos do grupo Tabaco & Livros, pela amizade e por compartilharem comigo uma das minhas grandes paixões, que é a leitura dos clássicos, em especial, ao Professor Ricardo Menotti e ao Professor Gustavo Oliveira.

Ao Osmar, pela amizade e pelo apoio nos diversos momentos em que precisei de ajuda durante a minha estadia em São Carlos.

À Virgem Maria, que cuida sempre de mim, e que me valeu num momento de perigo em que passei.

Por fim, a todos colegas e professores das disciplinas da pós-graduação, ao PPGEQ-UFSCar pela oportunidade e ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado, processo 132725/2020-7, e à CAPES, código de financiamento 001, pelo apoio financeiro.

*“No desdeñéis la palabra,
poeta. El mundo es ruidoso
y mudo: sólo Dios habla.”*

Antonio Machado

RESUMO

A secagem é uma das operações unitárias de custo mais elevado dentro da indústria, envolvendo complexos mecanismos de transferência de quantidade de movimento, de calor e de massa. O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um estudo sistemático da secagem em camada espessa, focando em aspectos específicos e particulares do sorgo granífero, além de promover uma melhoria instrumental e operacional do sistema de aquisição de dados do módulo experimental. Grãos de sorgo umidificados foram utilizados para compor o meio poroso do leito fixo. Foram feitas as medições de temperaturas e umidades ao longo do tempo para diferentes posições axiais no processo de secagem com e sem reversão do sentido do escoamento do ar a temperaturas de operação de 50 e 60°C e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹. A parametrização da reversão foi estabelecida para tempo inicial de aplicação da reversão em 10 minutos com intervalos de duração de 30 minutos. A secagem com aplicação da reversão reduziu os gradientes de temperatura e de umidade ao longo das posições axiais do leito quando comparada com a secagem convencional com escoamento de ar ascendente. Tanto os experimentos térmicos, como os experimentos de transferência de massa, demonstraram que a secagem do sorgo é controlada inteiramente pela difusão, sendo um processo mais lento do que a secagem de materiais inorgânicos. Os experimentos em camada fina no leito com ar aquecido a 40, 50 e 60°C e velocidade de 2,1 m·s⁻¹ até atingir o equilíbrio dinâmico demonstraram as duas fases de taxa decrescente típicas de secagem controlada pela difusão. Os modelos cinéticos que melhor se ajustaram aos dados de secagem em camada fina nas três temperaturas foram o de Page e de Overhults, com R² de 0,999. Foi realizada a comparação da secagem, em leito fixo e camada espessa, de sorgo com a de alumina e de cevada. Constatou-se a semelhança dos perfis de umidade e de temperatura entre o sorgo e a cevada, por serem ambos materiais orgânicos, como também se verificou que permanecem gradientes maiores ao final da secagem de cevada devido ao seu formato irregular, tamanho 4 vezes maior e menor condutividade térmica quando comparada à secagem de sorgo. Na comparação da secagem de sorgo com a secagem de alumina, pôde-se constatar a dificuldade que este material apresenta para poder representar bem um grão, pois, apesar de não encolher (uma característica ideal), sofre o processo de reumidificação quando aplicada a reversão do escoamento de ar, uma vez que metade do tempo de secagem é controlado pelo mecanismo convectivo.

Palavras-chave: Secagem. Leito Fixo. Reversão. Sorgo. Mecanismo difusivo. Mecanismo convectivo.

ABSTRACT

Drying is one of the highest cost unit operations in the chemical industry, with complex momentum, heat and mass transfer mechanisms. The main objective of this work was to develop a systematic study on thick layer drying, focusing on specific and particular aspects of the sorghum grain, in addition to improving the instrumentation and operation of the data acquisition unit. Sorghum grains were pre-humidified before being placed into the fixed bed. Temperature and moisture measurements were taken over time for different axial positions during drying with and without reversal of the air flow direction at operating temperatures of 50 and 60°C and air velocity of 2,1 m·s⁻¹. The reversal started at the initial time of 10 min with a change in the air flow direction every 30 min. Reverse drying effectively decreased temperature and moisture gradients along the axial positions compared to conventional drying with upward airflow. Both thermal and mass experiments demonstrated that the drying of sorghum is controlled entirely by diffusion, being a slower process than the drying of inorganic materials. Previous thin layer essays at 40, 50 and 60°C and air velocity of 2,1 m·s⁻¹ showed that drying had the two phases of decreasing rates usual in diffusion-controlled processes. In fact, both heat and mass transfer measurements showed that the drying of sorghum was entirely diffusion controlled, being a slower process than the drying of inorganic materials. The kinetic models that best fit the thin layer drying data at the three temperatures were the Page and Overhults models, with R² of 0.999. A comparison was made between the drying, in a fixed bed and thick layer, of sorghum with that of alumina and barley. The similarity of the moisture and temperature profiles between sorghum and barley was observed, as they are both organic materials, as well as greater gradients remain at the end of barley drying due to its irregular shape, 4 times larger size and lower thermal conductivity when compared to drying sorghum. Comparing the drying of sorghum with the drying of alumina, it was possible to verify the difficulty that this material presents in order to represent a grain well, because, despite not shrinking (an ideal characteristic), it undergoes the re-wetting process when the reversion of air flow is applied, since half of the drying time is controlled by the convective mechanism.

Keywords: Drying. Fixed bed. Reversal. Sorghum. Diffusive mechanism. Convective mechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema dos quatro tipos básicos de secadores de grãos convectivos.....	21
Figura 2.2: Silo secador com ar natural.....	22
Figura 2.3: Curva típica de secagem de sólido em camada fina (umidade do sólido e taxa de secagem em função do tempo).	26
Figura 2.4: Taxa de secagem em função da umidade do sólido.....	27
Figura 2.5: Corte transversal do grão de sorgo.....	30
Figura 2.6: Esquema do modelo de parâmetros concentrados elaborado por Perazzini (2011).	34
Figura 2.7: Representação gráfica do modelo em cascata de Freire <i>et al.</i> (2017).....	35
Figura 3.1: Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (desenho fora de escala).	46
Figura 3.2: Esquema do sentido do escoamento do ar no secador de leito fixo (desenho fora de escala): a) Escoamento ascendente. b) Escoamento descendente.	47
Figura 3.3: Microcontroladores Arduino® UNO instalados no equipamento.	48
Figura 3.4: Experimentos de secagem de grãos de sorgo em camada espessa.....	50
Figura 3.5: Detalhes da célula de secagem para os experimentos térmicos (desenho fora de escala).....	52
Figura 3.6: Ilustração da célula de secagem fracionada (desenho fora de escala).	54
Figura 3.7: Procedimento para obtenção da umidade média de cada fração do leito na secagem com e sem reversão do escoamento do ar (desenho fora de escala).....	55
Figura 4.1: Valores de temperatura e umidade relativa do ar em função do tempo nas extremidades do leito de sorgo em um experimento de secagem em camada espessa sem reversão ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	57
Figura 4.2: Adimensional de umidade médio em função do tempo, para a secagem de grãos de sorgo em camada fina nas temperaturas de 40°C , 50°C e 60°C e velocidade do ar de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	59
Figura 4.3: Taxa de secagem em função da umidade em base seca, para as temperaturas de 40°C , 50°C e 60°C e velocidade do ar de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	59
Figura 4.4: Umidade adimensional em função do tempo, predita pelos modelos empíricos e semi-empíricos aos	61

Figura 4.5: Leito fixo espesso de grãos de sorgo a) antes e b) depois da secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	62
Figura 4.6: Adimensional de umidade médio e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	62
Figura 4.7: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de sorgo ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	64
Figura 4.8: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de sorgo ($T = 60^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	64
Figura 4.9: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de esferas de alumina ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	65
Figura 4.10: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de cevada sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	67
Figura 4.11: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$). a) Tempo total de experimento; b) Ampliação dos 100 primeiros minutos.....	68
Figura 4.12: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 60^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$). a) Tempo total de experimento; b) Ampliação dos 100 primeiros minutos.....	69
Figura 4.13: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de esferas de alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).....	71
Figura 4.14: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 10 \text{ min}$).....	72
Figura 4.15: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de sorgo sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)...	73
Figura 4.16: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de esferas de alumina sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).....	75

Figura 4.17: Umidade adimensional média em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de cevada sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).	76
Figura 4.18: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de sorgo com a reversão do sentido do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10\text{ min}$; $\Delta t = 30\text{ min}$).....	77
Figura 4.19: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de esferas de alumina com a reversão do sentido do ar ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10\text{ min}$; $\Delta t = 30\text{ min}$).	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Condição de operação dos experimentos de secagem dos grãos de sorgo em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.	50
Tabela 4.1: Dados de caracterização dos grãos de sorgo.....	56
Tabela 4.2: Parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos para os dados de secagem de sorgo em camada fina ($U = 2, 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Modelos para ajuste de isotermas de sorção de alimentos.....	29
Quadro 3.1: Principais propriedades do sorgo granífero BRS 330.....	38
Quadro 3.2: Especificações do hexano utilizado na picnometria líquida.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Fundamentos da Secagem	19
2.2	Secagem de Grãos em Leito Fixo	20
2.3	Reversão de escoamento	22
2.4	Secagem em camada fina	24
2.5	Modelos de secagem em camada fina	27
2.6	Equilíbrio higroscópico	29
2.7	Sorgo Granífero	29
2.8	Modelos Matemáticos de Secagem de Grãos	31
2.9	Modelos Implementados no Centro de Secagem – UFSCar	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Propriedades do sorgo utilizado	38
3.2	Caracterização do Material	39
3.2.1	Dimensões características	39
3.2.2	Massa específica	40
3.2.2.1	Massa específica aparente	41
3.2.2.2	Massa específica real	42
3.2.3	Porosidade	43
3.3	Caracterização do leito	43
3.4	Umidade dos grãos	44
3.5	Umidificação do sorgo	45
3.6	Aparato Experimental	46
3.7	Medição de umidade nas extremidades do leito fixo	48
3.8	Secagem em camada fina	49
3.9	Secagem em camada espessa	49
3.9.1	Experimentos térmicos	51
3.9.2	Experimentos de transferência de massa	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56

4.1	Caracterização dos grãos de sorgo e do leito.....	56
4.2	Medição de umidade nas extremidades do leito fixo	57
4.3	Secagem de sorgo em camada fina.....	58
4.4	Modelos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina	60
4.5	Secagem de sorgo em camada espessa	62
4.5.1	Transferência de calor na secagem de sorgo em camada espessa com escoamento do ar ascendente.....	63
4.5.2	Transferência de calor na secagem de sorgo em camada espessa com reversão do sentido do escoamento de ar	67
4.5.3	Transferência de massa na secagem de sorgo em camada espessa	73
5	CONCLUSÕES.....	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores produtores e exportadores de grãos do mercado mundial, e vislumbra um futuro promissor neste setor. O Ministério da Agricultura previu um crescimento de 27% na produção de grãos do Brasil para a década atual. Em seu relatório, o ministério estimou que será atingida uma produção de 318,3 milhões de toneladas de grãos, frente ao recorde atual 2019/2020 de 250 milhões de toneladas (MAPA, 2020). Ainda no mesmo relatório, estimou-se um aumento significativo dos estoques em 2021. Perante este cenário, constata-se a necessidade de tecnologias de colheita, armazenagem, transporte e processamento de grãos para os próximos anos.

Nas fazendas, o armazenamento dos grãos colhidos tem importância fundamental, tanto como complemento das estruturas de armazenagem estabelecidas na zona urbana, como para diminuir danos e perdas a que os grãos estão sujeitos (JASPER *et al.*, 2006). Segundo dados da Embrapa (2015), o armazenamento inadequado da produção de grãos tem acarretado 15% de perdas devido a ataques de roedores, insetos, fungos e micotoxinas, chegando a alcançar, em pequenas propriedades familiares, mais de 40% na produção de milho em espiga.

Na armazenagem de grãos, a secagem por convecção forçada se destaca como uma das operações mais importantes numa sequência de outros cuidados associados ao beneficiamento, visando uniformizar a umidade e impedir a proliferação de microrganismos e o ataque de insetos e roedores. Segundo Defendi (2013), o que determina a qualidade do produto armazenado é a sua umidade, a qual é controlada pela operação de secagem, uma vez que baixas quantidades de água reduzem reações de escurecimento enzimático e taxas de respiração relacionadas ao metabolismo do grão que leva ao seu apodrecimento. Além disso, a melhora que a secagem proporciona à estabilidade do produto diminui os custos e pesos de transporte e minimiza os requisitos de embalagem (RUIZ-LÓPEZ *et al.*, 2008).

A secagem de grãos é uma operação de importância fundamental, envolvendo fenômenos físicos complexos de transferência de calor e de massa e, por ser um processo térmico, alta demanda energética. Disso, verifica-se a necessidade de controle e otimização da secagem, sendo os modelos matemáticos ferramentas bastante úteis para este fim. Panigrahi *et al.* (2019) afirmam que os modelos matemáticos vêm sendo utilizados para descrever tanto fenômenos teóricos quanto observados, simulando e predizendo resultados independentemente das condições prevalentes em aplicações diversas.

Os modelos matemáticos aplicados ao processo da secagem têm como base os fenômenos de transporte. Com respaldo nos modelos matemáticos de secadores de grãos, simulações são efetuadas para prever o comportamento ao longo do tempo e da posição no leito, estimando principalmente as variáveis de temperatura e umidade dos grãos. Experimentos são desenvolvidos para a medida dessas variáveis, possibilitando uma verificação entre dados previstos e medidos, indicando a qualidade da previsão do modelo.

Grãos como os de soja, amendoim, feijão, arroz, milho, café, lentilha, sorgo, entre outros que são provenientes do cultivo agrícola, têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, sendo considerados materiais higroscópicos. Suas características físicas podem sofrer alterações durante a secagem, como, por exemplo, alteração de volume dos poros por encolhimento, modificando a dinâmica da transferência de calor e de massa (ALBINI, 2019; BALA, 2017; PRADO, 2004). Devido a tais alterações, modelar a secagem desse tipo de material num leito de secagem de camada espessa envolve dificuldades do ponto de vista da simulação computacional, pois os parâmetros de transferência das equações, que são relacionados às características físicas dos grãos, modificam ao longo do tempo de secagem e também ao longo da posição no leito, exigindo maior esforço computacional quando comparado a simular modelos cujos parâmetros se mantêm constantes ao longo do tempo e da posição.

Dois estudos interessantes que propõem contornar a dificuldade trazida pelas modificações ocorridas ao longo do tempo e da posição no leito são o de Perazzini (2011) e o de Freire *et al.* (2017). O primeiro propôs a simulação do modelo de secagem de resíduos cítricos, representado por balanços de massa e energia das fases sólido e ar, num leito rotativo com reciclo, considerando que cada ciclo de secagem fosse um tanque de mistura perfeita acoplado ao ciclo anterior. Desse modo, o modelo se reduz a um sistema de equações diferenciais ordinárias, dependentes somente do tempo de residência das partículas em cada ciclo de secagem.

Freire *et al.* (2017) desenvolveram e verificaram um modelo adaptativo de mistura perfeita que utilizava medidas de temperatura e de umidade do ar para atualizar os coeficientes de transferência de calor e de massa durante a secagem de bagaço de laranja em leito de jorro. Para contornar o problema do esforço computacional dessa atualização ao longo do tempo, foi utilizada uma estrutura matemática de cascata em que as equações de balanço de energia e de massa foram desacopladas dentro do curto intervalo entre medidas consecutivas. Sendo assim, ao invés de se trabalhar com a solução numérica de um sistema com quatro equações

diferenciais ordinárias não-lineares, o esquema de cascata permitiu que se trabalhasse com duas equações a cada instante.

Ainda um aspecto fundamental a ser considerado para integrar modelos de secagem de grãos em camada espessa é a relação de equilíbrio entre o sólido úmido e o ar de secagem para diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar, também chamado de equilíbrio higroscópico (ZEYMER, 2021). Esta relação pode ser definida pelas equações de equilíbrio de sorção e dessorção pertinentes ao tipo de sólido a ser seco.

Além das relações de equilíbrio higroscópico entre os grãos úmidos e o ar de secagem, para se obter uma boa simulação da secagem em camada espessa, é necessário compreender a cinética de secagem dos grãos em camada fina. Do ponto de vista da modelagem matemática, que se fundamenta nos fenômenos de transferência de calor e massa, a escolha de um modelo de secagem em camada fina afeta significativamente os resultados da simulação em camada espessa (ALBINI, 2019), existindo diversos modelos cinéticos de secagem em camada fina, sendo eles modelos teóricos, empíricos ou semi-empíricos.

A secagem em leito fixo, na qual o leito de partículas permanece parado enquanto o ar percola cedendo calor e absorvendo umidade, é mais utilizada quando se trata de grãos, pois, em comparação com a secagem em leito móvel (fluidizado, em jorro ou vibro-fluidizado), tem-se uma operação com menor impacto mecânico, proporcionando uma melhor conservação dos grãos durante o processo (PRADO; SARTORI, 2011), sendo um tipo de configuração indicada para processos em batelada e pequena escala, materiais sensíveis ao impacto mecânico e para estudos dos fenômenos de transferência associados à secagem (GENARO, 2021).

Diferentemente da secagem com movimentação do leito, a de leito fixo acentua os gradientes de temperatura e umidade das partículas, e essa não uniformidade é um efeito indesejado no quesito de qualidade dos grãos. Uma opção possível é a adição de um dispositivo mecânico de mistura no secador para alcançar mais homogeneidade, este, no entanto, é um artifício que pode danificar os grãos além de aumentar os custos fixos e de operação do secador (BERBERT et al., 1994). Para manter os grãos fixos no leito e ainda assim promover um certo grau de uniformidade na temperatura e na umidade, uma opção mais vantajosa é a reversão periódica do escoamento do ar de secagem no leito, que em geral é configurado para ocorrer somente no sentido ascendente, promovendo também o escoamento no sentido descendente (MUJUMDAR, 1995; ALBINI, 2019; GENARO et al., 2021; RATTI).

Estudos realizados por diversos autores, e que são discutidos no presente trabalho, avaliaram a eficácia dessa reversão, inclusive checando os melhores momentos para iniciar a reversão e os melhores períodos de reversão ao longo do processo de secagem, como também foram propostas simulações computacionais de modelos matemáticos de secagem em camada espessa considerando a reversão periódica do escoamento de ar (BERBERT et al., 1994; MUJUMDAR, 1995; RATTI; RUIZ-LÓPEZ et al., 2008; ALBINI, 2019; GENARO, 2021).

Dadas as circunstâncias apresentadas, o presente trabalho tem o objetivo principal de desenvolver um estudo experimental da secagem de grãos de sorgo em leito fixo e camada espessa, com e sem a reversão do sentido do escoamento do ar de secagem, considerando aspectos específicos e particulares do sorgo granífero, além de promover uma melhoria instrumental e operacional do sistema de aquisição de dados do módulo experimental. Tendo isso em vista, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física dos grãos de sorgo e do leito;
- Estudar o comportamento cinético da secagem dos grãos de sorgo em camada fina por meio de experimentos em leito fixo para disponibilizar informações necessárias à modelagem em camada espessa;
- Realizar experimentos de secagem dos grãos de sorgo previamente umidificados em camada espessa no leito fixo para obter os dados de temperatura e umidade ao longo do tempo em diferentes posições no leito;
- Disponibilizar a medição de umidade relativa do ar nas extremidades inferior e superior do leito durante a secagem em camada espessa através da instalação de sensores;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos da Secagem

A secagem industrial é uma das operações unitárias de maior complexidade da indústria, envolve simultaneamente os fenômenos de transporte de momento, de calor e de massa. Tem a finalidade de reduzir a umidade de um sólido a valores adequados para o processamento ou armazenamento. É empregada em diversos setores, tais como: agrícola, biotecnológico, alimentar, de polímeros, de cerâmica, farmacêutico, de papel e celulose, de processamento mineral e de processamento de madeira (MUJUMDAR, 2006).

De maneira geral, pode-se dizer que a secagem consiste num processo térmico em que determinado sólido úmido é colocado numa atmosfera da qual energia é recebida na forma de calor, e a água do interior do sólido migra, devido ao calor recebido, para a superfície e é evaporada para a atmosfera circundante. Tal definição de secagem exclui as operações de desidratação mecânica, como filtração, centrifugação e sedimentação, como também extração supercrítica de géis e peneiramento molecular. Com isso, Mujumdar (2006) afirma que a mudança de fase e a produção de uma fase sólida seca como produto final são características essenciais do processo de secagem.

A transferência de energia na forma de calor pode ocorrer por condução, convecção ou radiação. É possível que as três formas de transferência de calor ocorram simultaneamente, sendo que o tipo de transferência de calor mais encontrado nos secadores industriais é por convecção, onde o fluido de secagem utilizado é o ar aquecido. Isto porque as condições de secagem podem ser prontamente controladas pela temperatura e umidade do ar quente que constitui a atmosfera circundante do material a ser seco (KEEY, 1972). Além disso, o ar pode trocar calor com o sólido por meio de convecção natural ou forçada. Usa-se a convecção forçada porque leva-se a maiores taxas de transferência de calor e de massa (PERRY; GREEN, 1998).

Existe uma grande diversidade de equipamentos usados para promover a secagem. Segundo Mujumdar (2006), a secagem é talvez a operação unitária mais antiga, mais comum e mais diversificada da engenharia química, tendo sido registrados até a época mais de 400 tipos de secadores industriais, sendo mais de 100 tipos comumente encontrados distribuídos nos diversos setores já mencionados. Além disso, a secagem compete com a destilação em ser a operação unitária de maior dispêndio energético devido ao alto calor latente de vaporização, e à ineficiência inerente ao uso de ar quente como o meio mais comum de secagem. Esses fatores

estimulam os pesquisadores a desenvolver modelos matemáticos que representem adequadamente a secagem, facilitando o controle e a otimização do processo.

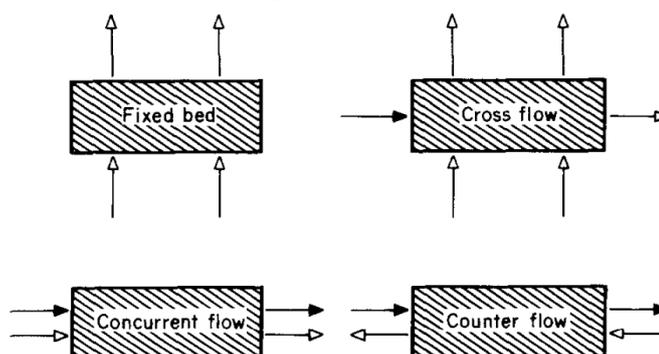
Para a seleção do equipamento de secagem adequado, Alonso e Park (2005) investigaram a necessidade do levantamento de algumas informações do processo em que a etapa de secagem está inserida, do produto final desejado e da matéria-prima utilizada, tais como: produtividade requerida em termos de base seca (kg/h), se o processo anterior à secagem dá-se em batelada ou contínuo, propriedades físicas e químicas da matéria-prima, especificações do produto seco, disponibilidade dos dados de secagem, recuperação de solventes, custos de produção na planta, riscos associados a possíveis perdas de pó para a atmosfera, e restrições relacionadas ao local de operação (como restrições de espaço, disponibilidade de fontes de calor, facilidade de supervisão de processo e manutenção).

Na indústria de produção de grãos, desde a colheita até o processamento, a armazenagem tem importância fundamental com relação à manutenção da qualidade do produto, e é na etapa de armazenagem que a operação de secagem contribui para essa garantia. A umidade máxima requerida para o armazenamento de cereais evitando o crescimento de microrganismos danosos é em torno de 12 a 14% em base úmida (NAVARRO; NOYES, 2001). A secagem por convecção, fazendo uso de uma corrente de ar quente abaixo da velocidade mínima de fluidização, geralmente nos próprios silos de armazenagem, já constitui propriamente a secagem em leito fixo.

2.2 Secagem de Grãos em Leito Fixo

Parry (1985) classifica os secadores convectivos de grãos em quatro tipos: batelada (leito fixo), em que os grãos permanecem parados e o ar de secagem passa por eles de forma ascendente; de fluxo concorrente, onde os grãos e o ar entram em contato em fluxos de mesmo sentido; de fluxo contracorrente, em que o contato se dá em fluxos de sentidos opostos; e de fluxo cruzado, em que o contato se dá por fluxos perpendiculares, conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquema dos quatro tipos básicos de secadores de grãos convectivos.



Fonte: Parry (1985)

Frente aos secadores que envolvem movimentação do leito, como os de leito de jorro, leito fluidizado, leito rotativo, de fluxos concorrentes, cruzados ou contracorrentes, os secadores de leito fixo se apresentam como ideais para a secagem de grãos, que necessitam manter suas propriedades físico-químicas, o que a movimentação do leito poderia prejudicar por meio de danos mecânicos (SOUZA et al., 2015). Além disso, a secagem de partículas úmidas em leito fixo é uma operação de baixo custo de investimento e de manutenção (WANG; CHEN, 1999).

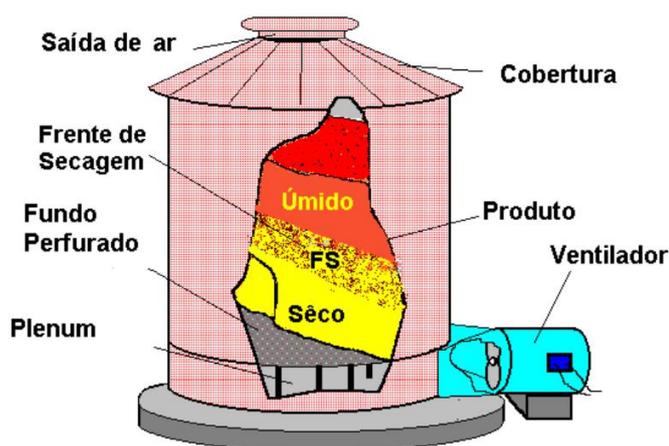
Desde em pequenas propriedades rurais até em grandes indústrias do setor agrícola, os próprios silos de armazenagem de grãos costumam ser utilizados como secadores de leito fixo. Conforme estudo técnico e econômico de Jasper *et al.* (2006), a aquisição de sistemas de secagem silo-secador pelo próprio produtor de grãos é rentável para propriedades acima de 20 hectares, sendo mais vantajoso para propriedades de menor área a terceirização do processo de secagem.

Na operação de secagem em leito fixo, ar é soprado para dentro do silo, que está preenchido com os grãos úmidos, de forma a ceder calor e receber a umidade dos grãos ao longo leito por meio de mecanismos convectivos, e vai para a atmosfera levando a umidade. O esquema de um secador de leito fixo (silo secador) pode ser visto na Figura 2.2 e é descrito a seguir, conforme Silva *et al.* (2012).

O ar é soprado na câmara inferior (*plenum*) por um ventilador situado na base do silo. O piso deve ter no mínimo 15% de área perfurada, para poder promover a distribuição do ar uniformemente. Na camada mais inferior do leito, já é atingido o equilíbrio higroscópico, isto é, o ar e os grãos atingem níveis de umidade que não tendem a variar na condição de temperatura e umidade com que o ar está entrando no silo, sendo uma região de produto seco. Numa camada

intermediária, chamada frente de secagem, ocorre a transferência de umidade dos grãos para o ar. Na camada mais superior do leito, os grãos estão com a umidade próxima à umidade inicial, pois o ar, à medida que ascende, vai se aproximando da saturação, diminuindo a capacidade de secagem. A vazão de ar deve ser suficiente para fazer a frente de secagem chegar ao topo do leito evitando a deterioração dos grãos. Em localidades com alta umidade relativa do ar, recomenda-se o uso de um aquecedor na jusante do ventilador (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2012).

Figura 2.2: Silo secador com ar natural.



Fonte: Silva; Afonso; Donzelles (2008)

Aplicado em pequenas dimensões (camada fina), o leito fixo é utilizado para estudos da cinética de secagem de materiais dos quais se tem pouca informação no que concerne às propriedades de transferência de calor e massa, ajudando no entendimento dos fenômenos de transporte em dimensões maiores (camada espessa) (ALBINI, 2019).

2.3 Reversão de escoamento

Uma característica desfavorável, com relação aos secadores de movimentação do leito, é a de que os secadores de leito fixo, ao final da secagem, ficam com a distribuição de umidade e temperatura das partículas não uniforme, isto é, há um acentuado gradiente tanto de temperatura como de umidade dos grãos ao longo do secador na direção do escoamento do ar de secagem. Essa não uniformidade no leito de secagem é indesejada porque resulta num produto não homogêneo, podendo acarretar perdas significativas em operações subsequentes, como é o caso de grãos de café que, ao passar pela torrefação, os grãos com umidade alta podem

não pirolisar e aqueles com umidade muito baixa podem ficar chamuscados (BERBERT *et al.*, 1994).

Tal desvantagem pode ser contornada com a reversão periódica do sentido do escoamento do ar de secagem, conforme trabalhos realizados por Berbert *et al.* (1994), Ratti e Mujumdar (1995), Ruiz-López *et al.* (2008), Albini (2019) e Genaro (2021). Comparado a secadores que envolvem agitação mecânica ou mesmo secadores com velocidade do ar acima da mínima de fluidização, os secadores que mantêm o leito fixo, isto é, sem a movimentação das partículas, promovendo a simples reversão periódica do sentido do escoamento do ar, trazem algumas vantagens: evitam deformações nos sólidos acarretadas por impacto mecânico; podem ser projetados a partir de equipamentos convencionais já instalados com escoamento do ar ascendente; custos fixos e operacionais mais baixos pelo menor gasto de energia, que seria necessária para manter um agitador mecânico ou maior escoamento de ar (GENARO, 2021).

Berbert *et al.* (1994) promoveram a secagem de grãos de café em leito fixo com e sem a reversão do escoamento do ar de secagem a duas diferentes temperaturas, 50°C e 70°C. Foi observado que, apesar de ter sido necessário um tempo de secagem um pouco maior (16 h) para que a umidade média ao longo de todo o leito fosse a mesma que a da secagem sem reversão (15 h), a secagem com reversão proporcionou um gradiente de umidade menos acentuado, diminuindo em 65% (50°C) e 50% (70°C) a diferença entre a maior e a menor umidade encontradas ao longo do leito ao final da secagem em comparação com a secagem sem a reversão. Mesmo com maiores taxas, diminuindo para menos da metade o tempo de secagem (7 h), a temperatura de 70°C proporcionou gradientes de umidade considerados altos para o padrão de qualidade do café, tanto no processo com reversão como no processo sem reversão.

No mesmo trabalho, também foi medida e observada a temperatura em diferentes camadas ao longo do leito durante a secagem com ar de entrada a 50°C. No processo sem reversão, as temperaturas de todas as camadas se elevaram rapidamente no início da secagem, depois a taxa de crescimento foi diminuindo até cada uma delas atingir o estado estacionário; a temperatura na camada mais próxima da entrada do ar aquecido atingiu o equilíbrio dinâmico mais rapidamente que as camadas posteriores, sendo a temperatura da camada mais afastada da entrada de ar a mais lenta. Ao final da secagem, ficou estabelecido uma diferença de 47°C a 40°C, desde a camada mais próxima da entrada do ar até a camada mais distante. No processo de secagem com reversão periódica (a cada 3 e 6h), o equilíbrio dinâmico da temperatura era perturbado de modo que os pontos mais próximos à entrada do ar com o escoamento no sentido

direto passavam das maiores temperaturas para as mais baixas ao ser realizada a reversão, em seguida atingindo de novo as temperaturas mais altas quando era feita a reversão para o sentido inicial. Dessa forma, observou-se que a reversão periódica do sentido do escoamento do ar aquecido promoveu um caráter de mistura à secagem do café em leito fixo, o que foi atestado pela diminuição do gradiente de umidade.

Ratti e Mujumdar (1995) simularam a aplicação da reversão na secagem de cenoura, maçã e batata (picadas em formatos cilíndricos e de discos) em leito fixo de camada fina e de camada espessa utilizando um modelo que levava em conta o encolhimento dos sólidos. Avaliando o efeito da reversão do escoamento de ar, constataram que a umidade e a temperatura médias de todo o leito sofreram pouca influência quando comparadas às da secagem sem reversão; já os perfis de umidade e de temperatura ao longo da posição tenderam a ficar mais uniformes, com as posições de umidade e de temperatura mais altas dando valores mais próximos aos das posições com valores de umidade e de temperatura mais baixos do que no caso da secagem sem reversão. Por meio da simulação, os autores também puderam constatar que quanto mais cedo for realizada a reversão do escoamento do ar, mais uniformes serão os perfis de umidade e temperatura ao longo do leito, uma vez que é no início do processo que há uma maior influência do ar que escoar no meio poroso, pois a transferência de massa ainda está sendo controlada tanto por fenômenos difusivos, no interior do sólido, quanto convectivos, na superfície.

Ruiz-López *et al.* (2008) propuseram a modelagem de um leito fixo em camada espessa com reversão do escoamento de ar considerando o leito como uma série de tanques de mistura perfeita ligados em série. Também observaram uma maior uniformidade da temperatura e da umidade ao longo do leito. Destacaram a necessidade de otimização dos períodos de reversão do escoamento a fim de atingir menores umidades médias para a secagem em camada espessa.

2.4 Secagem em camada fina

Sob condições controladas de temperatura, umidade e velocidade do ar, a secagem em camada fina é realizada para avaliar as melhores condições das variáveis de operação, principalmente temperatura, em função da qualidade do produto seco (BUCKLIN *et al.*, 2013; BALA, 2017). O que determina a espessura de camada fina num leito fixo de secagem de partículas são os gradientes axiais pouco significativos de temperatura e umidade, com a

diferença entre as medidas de temperatura de alimentação e de temperatura de exaustão sendo pouco expressiva ou mesmo menor que o erro associado à medição (VIEIRA, 2012; PERAZZINI, 2014; ALBINI, 2019; GENARO, 2021)

Conforme Sherwood (1929), há quatro casos gerais que ocorrem na remoção de água do interior de um sólido para a sua superfície seguida da transferência para o ar de secagem:

I - Evaporação na superfície do sólido com resistência à difusão interna do líquido pequena em comparação com a resistência à remoção de vapor da superfície.

II - Evaporação na superfície do sólido com grande resistência à difusão interna do líquido em comparação com a resistência à remoção de vapor da superfície.

III - Evaporação no interior do sólido com resistência à difusão interna do líquido pequena em comparação com a resistência total à remoção do vapor.

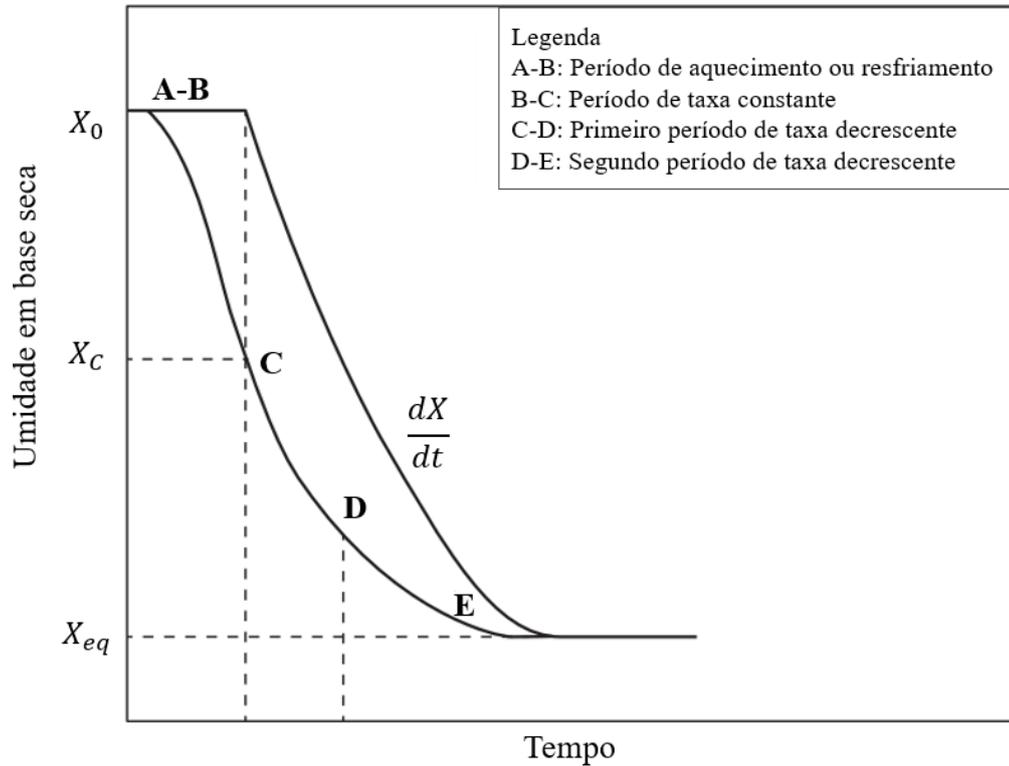
IV - Evaporação no interior do sólido com grande resistência à difusão interna do líquido em comparação com a resistência total à remoção de vapor.

É importante destacar que, durante a secagem do sólido, pode ocorrer mais de um desses casos simultaneamente. Sherwood (1929) propôs os quatro casos acima partindo da hipótese de que o mecanismo pelo qual a umidade é transportada do interior para a superfície do sólido é a difusão. Os casos I e II ocorrem quando há difusão de umidade líquida do interior para a superfície do sólido, seguida pela vaporização do líquido da superfície e difusão do vapor para a corrente de ar. Já os casos III e IV ocorrem quando há a vaporização do líquido em algum ponto antes de chegar até a superfície do sólido, ocorrendo então a difusão do vapor de água pelos poros até chegar à superfície e se difundir para a corrente de ar.

Quando o sólido está muito úmido, a secagem é semelhante à evaporação de um líquido numa superfície líquida, ocorre o fenômeno descrito no caso I, em que a taxa de secagem permanece constante. À medida que o processo de secagem avança, a umidade do sólido vai diminuindo até que o sólido atinge uma umidade crítica, X_c , e o mecanismo de secagem passa a ser algum dos outros três casos, com a secagem entrando num período de taxa decrescente. Dessa forma, o autor classifica os estágios da secagem de acordo com três períodos: período de taxa constante, primeiro período de taxa decrescente e segundo período de taxa decrescente. O período de taxa constante não costuma ocorrer na secagem de grãos, começando o processo já pelo período de taxa decrescente (BALA, 2017). Nas Figuras 2.3 e 2.4, são apresentadas as

curvas típicas da secagem em camada fina, mostrando a umidade do sólido (X) e a taxa de secagem (dX/dt) em função do tempo.

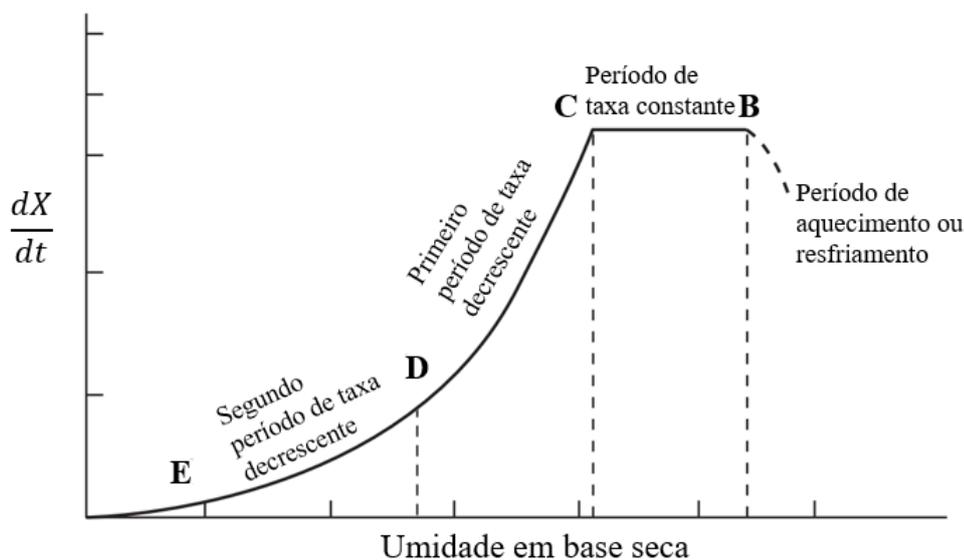
Figura 2.3: Curva típica de secagem de sólido em camada fina (umidade do sólido e taxa de secagem em função do tempo).



Fonte: Adaptado de Bala (2017).

Num primeiro momento (A-B), ocorre o equilíbrio térmico entre as fases (sólido e ar de secagem). Estabelecida a condição de equilíbrio, a superfície do sólido é mantida saturada, com o mecanismo de transferência de massa dominante sendo a convecção. Neste período (B-C), o que controla o ritmo da secagem são as condições de equilíbrio entre a superfície do sólido e o ar que percola a superfície, determinadas pela velocidade, temperatura e umidade do ar. Durante o período de taxa constante, a umidade é difundida do interior do sólido até a sua superfície a uma velocidade correspondente àquela com que a umidade da superfície é evaporada.

Figura 2.4: Taxa de secagem em função da umidade do sólido.



Fonte: Adaptado de Bala (2017).

O primeiro período de taxa decrescente (C-D) ocorre quando a umidade do sólido diminui até um grau (X_C) em que a velocidade de difusão da água do interior para a superfície já não é mais suficiente para manter constante a taxa de evaporação da superfície para o ar. Aí o mecanismo que está sendo dominante é o da difusão. O segundo período de taxa decrescente (D-E) pode ser definido como o intervalo em que uma quantidade residual de água ainda removível nas condições operacionais estabelecidas evapora diretamente do interior do sólido para o ar por difusão, até ser atingida a umidade de equilíbrio do sólido, X_{eq} .

2.5 Modelos de secagem em camada fina

A secagem de sólido em camada fina tem importância fundamental para a composição de modelos de secagem em camada espessa, uma vez que estes são baseados em balanços de massa e energia aplicados a uma camada fina representativa do sistema avaliado (GENARO, 2021).

Um clássico modelo semi-empírico de secagem em camada fina é o modelo de Lewis (1921), que faz uma analogia entre o transporte de massa e a Lei do Resfriamento de Newton relativa ao transporte de calor por convecção. O modelo de Lewis descreve a taxa de secagem como sendo diretamente proporcional à diferença entre a umidade do sólido num dado

momento e a umidade de equilíbrio do sólido relativa às condições de secagem estabelecidas (velocidade, temperatura e umidade do ar), conforme a Equação 2.1.

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = k_L(\bar{X} - X_{eq}) \quad (2.1)$$

O comportamento da umidade em função do tempo (Equação 2.2) segundo a analogia de Lewis (1921) é obtido integrando-se a Equação 2.1.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_L t) \quad (2.2)$$

Algumas modificações do modelo de secagem proposto por Lewis (1921) podem resultar em melhores propriedades de parâmetros, e também podem ser úteis para evitar falhas de convergência (BUZRUL, 2022). Duas dessas modificações foram propostas por Page (1949) e por Overhults (1973), que é o Modelo de Page Modificado, conforme as Equações 2.3 e 2.4.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_P t^n) \quad (2.3)$$

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp[(-k_O t)^n] \quad (2.4)$$

Na avaliação estatística do ajuste a mesmos dados experimentais de secagem em camada fina, os modelos de Page e de Overhults devem ter ajustes idênticos com os mesmos valores de parâmetro n , R^2 e REQM, uma vez que o parâmetro n é o que determina o formato da curva, podendo diferir entre si somente os valores dos parâmetros k_P e k_O (BUZRUL, 2022).

O modelo de Henderson e Pabis (1961) (Equação 2.5) foi desenvolvido para a secagem de grãos a partir da segunda lei de difusão de Fick truncada no primeiro termo da série.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a \exp(-k_{HP} t) \quad (2.5)$$

Nos modelos apresentados, k é a constante de secagem que representa parâmetros do processo intrínsecos aos fenômenos de transferência de massa externos e internos (GENARO, 2021).

2.6 Equilíbrio higroscópico

A umidade de equilíbrio estático, também denominado equilíbrio higroscópico, é a quantidade de água na qual a pressão de vapor da água no produto é igual à do ar que o envolve (ZEYMER, 2021). Em outras palavras, o produto está em equilíbrio com o ar quando a transferência de água (na forma de vapor) do produto para o ambiente e do ambiente para o produto se igualam.

As relações de equilíbrio entre o material úmido e o ar para determinadas faixas de temperatura podem ser descritas por alguns modelos empíricos, que são equações algébricas. Alguns dos modelos mais utilizadas para alimentos são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Modelos para ajuste de isotermas de sorção de alimentos.

Referência	Modelo
Langmuir (1918)	$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C \cdot UR}{1 + C \cdot UR}$
Halsey (1953)	$UR = \exp\left(\frac{-A}{X_{eq}^B}\right)$
BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938)	$X_{eq} = \frac{(X_m \cdot C \cdot UR) \cdot (1 - (n + 1) \cdot UR^n + n \cdot UR^{n+1})}{(1 - UR) \cdot (1 + (C - 1) \cdot UR - C \cdot UR^{n+1})}$
GAB (VAN DEN BERG; BRUIN, 1981)	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot UR}{(1 - K \cdot UR) \cdot (1 - K \cdot UR + C \cdot K \cdot UR)}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo X_{eq} a umidade de equilíbrio em base seca do sólido úmido, X_m , o conteúdo de umidade na monocamada molecular, UR , a umidade relativa do ar e A , B , C , n , K , constantes ajustáveis das equações.

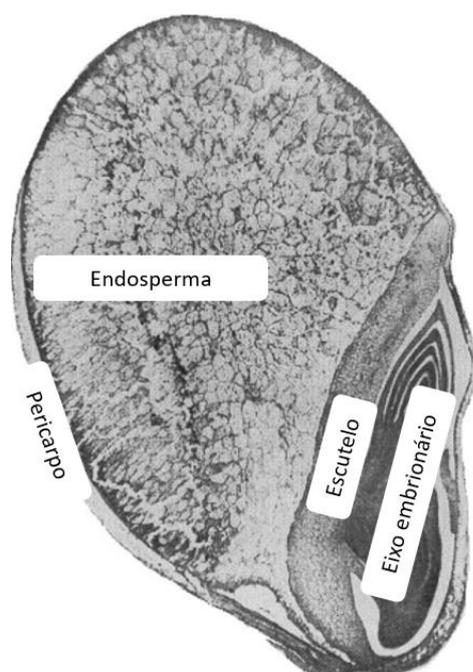
2.7 Sorgo Granífero

O sorgo é uma espécie de cereal que pode ser distinguido em quatro tipos: sorgo granífero, sorgo sacarino, sorgo forrageiro e sorgo vassoura. Seu nome científico é *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Sendo um dos cinco cereais mais produzidos no mundo, atrás apenas do trigo, arroz, milho e cevada, o sorgo se destaca como uma opção eficaz para substituir o milho,

tanto pelo seu potencial energético para a alimentação de animais no setor pecuarista, como pela sua resistência à estiagem, sendo proveniente de uma planta cujo sistema radicular é profundo e ramificado, o que proporciona uma alta eficiência para a extração de água do solo (IAP, 2008; RUAS; GARCIA; TEIXEIRA, 1988).

O sorgo é uma importante fonte de energia e proteína nos países em desenvolvimento, especialmente na África e na Ásia. Conforme se pode ver na Figura 2.5, o grão de sorgo é aproximadamente esférico e composto de três componentes principais: o tegumento, o embrião e o endosperma (RIahi; RAMASWAMY, 2003).

Figura 2.5: Corte transversal do grão de sorgo.



Fonte: Adaptado de Riahi e Ramaswamy (2003).

O pericarpo é a cobertura mais externa do grão que, sendo mais rígida, protege o tegumento, que é a membrana que envolve o endosperma (MA, 1975). O endosperma é o maior constituinte do grão, sendo dividido em endosperma periférico, composto principalmente por proteínas, e endosperma córneo, composto por maior quantidade de amido e menor quantidade de proteínas (RIahi; RAMASWAMY, 2003). As células presentes no endosperma são responsáveis por transportar umidade por todo o grão (ROONEY; MILLER, 1982). O eixo embrionário e o escutelo são as duas partes principais que formam o embrião. As células do embrião se modificam em células de transferência, movimentando umidade, microrganismos e componentes solubilizados do endosperma, e assim desempenhando papel importante na absorção de água e suscetibilidade ao mofo (GLUECK; ROONEY, 1980). O escutelo é

composto por células que contêm glóbulos de óleo, corpos proteicos e alguns grânulos de amido (ROONEY; MILLER, 1982).

2.8 Modelos Matemáticos de Secagem de Grãos

Os modelos matemáticos de secagem de grãos, em leito fixo, podem ser classificados em duas grandes categorias: os de camada fina e os de camada espessa. Modelos de camada fina são aqueles em que é assumido que a temperatura e a umidade dos grãos (mantidos fixos no leito) não variam significativamente com a posição no leito, somente com o tempo, e a temperatura, a umidade e a velocidade do ar de secagem são mantidas constantes. Conforme apresentados na seção 2.5, os modelos de camada fina, utilizados para representar o comportamento da umidade e da temperatura de determinados grãos em pequena escala, são muito importantes para compor os modelos de transferência de calor e massa em camada espessa.

Na abordagem de camada fina, são encontrados os modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos. Os modelos teóricos baseiam-se nas equações de conservação de massa e energia e na teoria da difusão, a qual descreve os mecanismos de transferência de calor e de massa entre o interior do grão e a superfície devido a gradientes de temperatura e de umidade, conforme a segunda lei de Fick. Os modelos empíricos são equações desenvolvidas a partir de resultados experimentais, e relacionam diretamente a umidade dos grãos com o tempo de secagem. Já os modelos semi-empíricos, apresentados na seção 2.5, baseiam-se na equação de resfriamento de Newton, em que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre a umidade atual e a umidade de equilíbrio do material (ALBINI, 2019; PARRY, 1985; PRADO e SARTORI, 2011).

Os modelos de camada espessa dão conta de representar o comportamento da temperatura e da umidade dos grãos e do ar de secagem variando com o tempo e com a posição no leito. A maior parte desses modelos baseia-se nos balanços de massa e energia do ar de secagem e dos grãos, sendo o modelo a duas fases o mais utilizado. Segundo Prado (2004), o modelo a duas fases utiliza a hipótese de que o meio poroso é um contínuo, e os fenômenos de transferência são descritos por equações macroscópicas resultantes dos balanços de massa e energia num elemento de volume representativo do leito.

A secagem de um material particulado poroso pode ser descrita como um processo de transferência de calor e massa que se desenvolve entre uma fase fluida (ar seco + vapor d'água) e uma fase sólida (sólido seco + água líquida) em que apenas um componente é transferido entre elas (água), associando as duas fases a cada ponto do sistema com velocidade, umidade e temperatura próprias. As equações de conservação de quantidade de movimento, massa e energia estabelecidas para cada fase, mais as equações constitutivas oriundas de dados de equilíbrio termodinâmico e informações sobre os parâmetros de transferência entre as fases constituem o corpo da modelagem matemática de duas fases (ALBINI, 2019; PRADO, 2004).

As equações que constituem o modelo são descritas a seguir.

- Balanço de energia

$$\text{Fase fluida: } \varepsilon C_p \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C_p G_f (1 + W) \nabla T_f = -h a (T_f + T_s) - C_p (T_f - T_s) f \quad (2.6)$$

$$\text{Fase sólida: } (1 - \varepsilon) C_p \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + C_p G_s (1 + X) \nabla T_s = h a (T_f - T_s) - \lambda f \quad (2.7)$$

- Balanço de massa

$$\text{Fase fluida: } \varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{W}{1 + W} \right) + G_f \nabla W = f \quad (2.8)$$

$$\text{Fase sólida: } (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + X} \right) + G_s \nabla X = -f \quad (2.9)$$

- Equação constitutiva

$$\text{Taxa de secagem: } f = k_L a (W_e - W) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de taxa} \\ \text{(analogia de Lewis):} \end{aligned} \quad k_L = \frac{h}{C_p} \quad (2.11)$$

Sendo que ε é a fração de vazios no leito (porosidade), C_p é o calor específico, ρ é a massa específica, T é a temperatura, G é a vazão mássica, W é a razão mássica de água na fase fluida (base seca), X é a razão mássica de água na fase sólida, h é o coeficiente de transferência de calor, a é a área superficial do sólido por volume do meio poroso, λ é a entalpia mássica de

vaporização da água, y é a direção de escoamento do fluido, t é o tempo, o subscrito f é concernente à fase fluida e o subscrito s , concernente à fase sólida.

As hipóteses de simplificação para a solução do sistema de equações são: escoamento unidimensional do ar, transporte de calor e massa predominantemente por convecção, taxa local de secagem descrita por um modelo de resistência de filme associado a um fator de controle, comportamento ideal da fase fluida, capacidades caloríficas constantes, perda de calor através das paredes do secador desprezível, perfil uniforme (velocidade, temperatura e umidade) nas condições de entrada do ar quente, regime de operação estabilizado, gradiente de pressão desprezível no meio poroso, ausência de interação do movimento entre as fases.

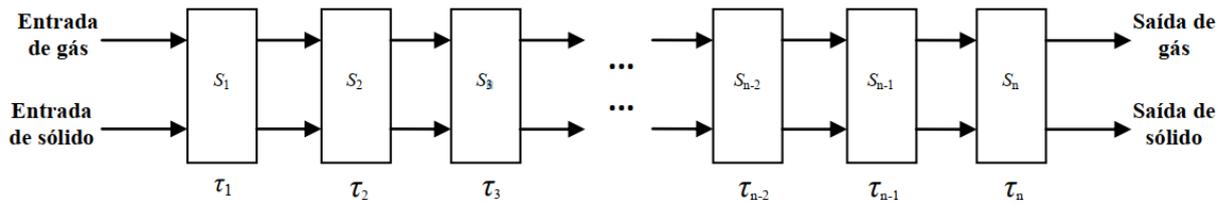
2.9 Modelos Implementados no Centro de Secagem – UFSCar

No Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar, foram desenvolvidos trabalhos cujas metodologias e resultados deram respaldo a este trabalho.

Na abordagem a duas fases, Perazzini (2011) desenvolveu um modelo para secagem de resíduos cítricos em um secador rotativo. O processo foi simulado considerando a distribuição de tempos de residência das partículas no interior do secador. Devido às características dinâmicas do leito rotativo, para contornar a dificuldade de determinar os perfis de temperatura e umidade e obtenção de dados experimentais confiáveis, o autor propôs a recirculação das partículas no leito com cada ciclo de secagem representado um tanque de mistura perfeita ligado em série com os ciclos adjacentes, reduzindo o modelo de parâmetros distribuídos a um modelo de parâmetros concentrados, onde a temperatura e a umidade passam a ser dependentes não mais da posição, mas somente do tempo de residência das partículas em cada ciclo de tanque de mistura perfeita. Dadas as equações de balanço do modelo, condições iniciais e equações constitutivas, a solução numérica foi implementada utilizando o método de Runge-Kutta de quarta e quinta ordem com passo variável.

O método adotado, com cada volume de controle representando a secagem por mecanismo convectivo em tanque de mistura perfeita, é ilustrado no esquema da Figura 2.6.

Figura 2.6: Esquema do modelo de parâmetros concentrados elaborado por Perazzini (2011).



Fonte: Perazzini (2011).

As equações de balanço de massa e energia do modelo proposto por Perazzini (2011) são descritas a seguir.

- Balanço de energia

$$\text{Fase fluida: } \frac{dT_g}{dt} = -\frac{v_g}{L}(T_g - T_g^E) + \frac{1}{Cp_g + Y_g^E Cp_v} \left[-\frac{U_v a V (T_g - T_s)}{M_g} + R_w Cp_v T_g - Q_P \right] \quad (2.12)$$

$$\text{Fase sólida: } \frac{dT_s}{dt} = -\frac{v_s}{L}(T_s - T_s^E) + \frac{1}{Cp_s + Y_s^E Cp_w} \left[\frac{U_v a V (T_g - T_s)}{M_s} - R_w Cp_v (T_g - T_s) - \lambda R_w \right] \quad (2.13)$$

- Balanço de massa

$$\text{Fase fluida: } \frac{dY_g}{dt} = -\frac{v_g}{L}(Y_g - Y_g^E) + \frac{M_s}{M_g} R_w \quad (2.14)$$

$$\text{Fase sólida: } \frac{dY_s}{dt} = -\frac{v_s}{L}(Y_s - Y_s^E) - R_w \quad (2.15)$$

- Equação constitutiva

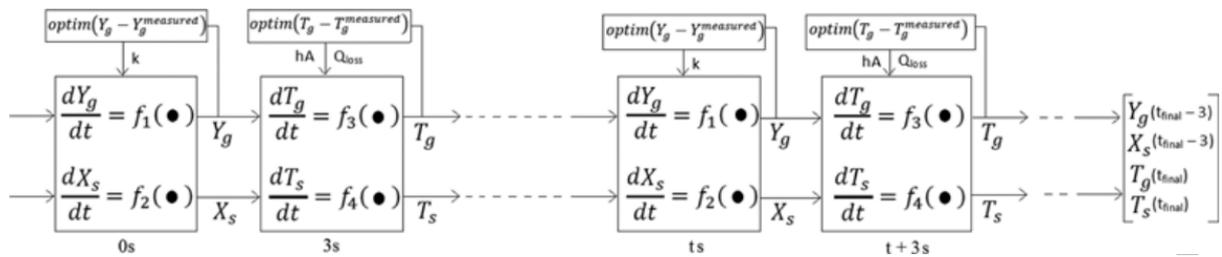
$$\text{Taxa de secagem: } R_w = k(Y_s - Y^*) \quad (2.16)$$

Em que T é a temperatura, v é a velocidade, L é o comprimento do secador, Cp é o calor mássico (específico), Y é a umidade, Y^* é a umidade de equilíbrio, Uva é o coeficiente volumétrico global de transferência de calor, V é o volume do secador, M é a massa total da fase na seção, R_w é a taxa de secagem, Q_P é o calor perdido pelas paredes do secador, λ é o calor latente de vaporização da água, t é a variável de tempo independente, o subscrito g é referente à fase fluida, o s é referente à fase sólida, o w é referente ao componente água líquida, o v é referente ao componente água vapor e o sobrescrito E é referente à entrada do secador.

Também com o intuito de contribuir com um modelo simples e de baixo esforço computacional, Freire *et al.* (2017) propuseram a abordagem a duas fases dos balanços de calor e massa gerando um modelo a parâmetros concentrados para simular um leito de jorro de secagem de resíduos cítricos. Os autores representaram o leito como sendo um único tanque de mistura perfeita, onde as variáveis de umidade e de temperatura eram função somente do tempo de secagem. Destaca-se neste trabalho o caráter adaptativo do modelo, em que os parâmetros de transferência são ajustados durante a simulação por meio da minimização entre os valores medidos e os valores estimados das variáveis de temperatura e de umidade do ar de secagem a cada passo da simulação. Foi utilizada uma metodologia em que a atualização dos parâmetros ocorria em cascata.

O esquema do modelo adaptativo a parâmetros concentrados em cascata, onde os parâmetros de transferência são atualizados a cada passo da simulação, é ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Representação gráfica do modelo em cascata de Freire *et al.* (2017).



Fonte: Freire *et al.* (2017)

As equações de balanço de massa e energia do modelo proposto por Freire *et al.* (2017) são descritas a seguir.

- Balanço de energia

$$\text{Fase fluida: } \frac{dT_g}{dt} = \frac{\dot{Q}}{M_g} \rho_{gi} (T_{gi} - T_g) + \frac{1}{Cp_g + Y_{gi} Cp_w} \left[-\frac{hA(T_g - T_s)}{M_g} - R_w \left(\frac{M_s}{M_g} \right) Cp_w (T_g - T_s) - Q_{loss} \right] \quad (2.17)$$

$$\text{Fase sólida: } \frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{Cp_s + X_s Cp_w} \left[\frac{hA(T_g - T_s)}{M_s} - R_w Q_{latent} \right] \quad (2.18)$$

- Balanço de massa

$$\text{Fase fluida:} \quad \frac{dY_g}{\partial t} = \frac{\dot{Q}}{M_g} \rho_{gi} (Y_{gi} - Y_g) + \frac{M_s}{M_g} R_w \quad (2.19)$$

$$\text{Fase s\u00f3lida:} \quad \frac{dX_s}{\partial t} = -R_w \quad (2.20)$$

- Equa\u00e7\u00e3o constitutiva

$$\text{Taxa de secagem:} \quad R_w = k(X_s - X_{eq}) \quad (2.21)$$

Em que T \u00e9 a temperatura, \dot{Q} \u00e9 a vaz\u00e3o volum\u00e9trica de ar, M \u00e9 a massa total da fase, ρ \u00e9 e massa espec\u00edfica, C_p \u00e9 o calor m\u00e1ssico (espec\u00edfico), Y_g \u00e9 a umidade da fase fluida, hA \u00e9 o coeficiente global de transfer\u00eancia de calor, R_w \u00e9 a taxa de secagem, Q_{loss} \u00e9 o calor perdido pelas paredes do secador, X_s \u00e9 a umidade da fase s\u00f3lida, X_{eq} \u00e9 a umidade de equil\u00edbrio, Q_{latent} \u00e9 o calor latente de vaporiza\u00e7\u00e3o da \u00e1gua, t \u00e9 a vari\u00e1vel de tempo independente, o subscrito g \u00e9 referente \u00e0 fase fluida, o i \u00e9 referente \u00e0 entrada do secador, o s \u00e9 referente \u00e0 fase s\u00f3lida e o w \u00e9 referente ao componente \u00e1gua.

No trabalho de Albin (2019), foi utilizado o modelo a duas fases baseado nas equa\u00e7\u00f5es de balan\u00e7o em leito de gr\u00e3os de Massarani e Silva Telles (1992) para descrever a transfer\u00eancia de calor e massa da secagem de gr\u00e3os de cevada em um leito fixo espesso com e sem revers\u00e3o do escoamento do ar de secagem, por\u00e9m com par\u00e2metros distribu\u00eddos.

Devido \u00e0 dificuldade experimental para se obter as temperaturas da fase fluida e da fase s\u00f3lida separadamente, al\u00e9m das hip\u00f3teses de Massarani e Silva Telles (1992), Albin (2019) considerou ainda o equil\u00edbrio t\u00e9rmico entre as fases, fazendo $T_f = T_s = T_m$, resultando em uma \u00fanica equa\u00e7\u00e3o para a conserva\u00e7\u00e3o de energia referente a um balan\u00e7o para a mistura fluido-s\u00f3lido. Al\u00e9m disso, particularizando para leito fixo, a velocidade da fase s\u00f3lida G_s passa a ser nula. A autora ainda adicionou uma modifica\u00e7\u00e3o utilizando um sistema de coordenadas m\u00f3veis para incorporar o encolhimento dos gr\u00e3os, resultando no seguinte conjunto de equa\u00e7\u00f5es:

- Balan\u00e7o de energia

$$\text{Mistura} \quad \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{-f\lambda - \left(\frac{G_f}{S_b} (Cp_f + W Cp_v) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right)}{(1 - \varepsilon)\rho_s (Cp_s + X Cp_l) + \varepsilon \rho_f (Cp_f + W Cp_v)} \quad (2.22)$$

fluido-s\u00f3lido:

- Balanço de massa

$$\text{Fase fluida:} \quad \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon \rho_f} \left(f - \frac{G_f}{S_b} \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad (2.23)$$

$$\text{Fase sólida:} \quad \frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{f}{(1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (2.24)$$

Sendo S_b a razão de encolhimento volumétrico do leito e T_m , a temperatura da mistura fluido-sólido, os demais termos das equações foram definidos na seção 2.8.

Dadas as considerações gerais sobre a importância do processo de secagem de grãos, enfatizando as particularidades da secagem em leito fixo, como também a descrição dos fenômenos de transporte de calor e massa envolvidos, o modelo a duas fases na abordagem em camada espessa aplicado em trabalhos anteriores no Centro de Secagem (DEQ/UFSCar) foi apresentado com o intuito de definir o cenário em que se situa o estudo realizado no presente trabalho. Com os resultados que foram obtidos da secagem de grãos de sorgo no leito fixo junto à implementação da medição de umidade do ar nas extremidades do leito, a utilização do modelo a duas fases poderá ser aprimorada para este tipo de grão, levando em conta o progresso já obtido com os trabalhos anteriores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados a metodologia e os materiais utilizados para realizar a caracterização e umidificação dos grãos de sorgo, a caracterização do leito de secagem, o procedimento de secagem dos grãos de sorgo em camada espessa para obtenção dos dados de umidade e também de temperatura ao longo das posições axiais, tanto com reversão do escoamento, como sem a reversão do escoamento do ar de secagem. Também é apresentado o procedimento para realização da secagem em camada fina.

3.1 Propriedades do sorgo utilizado

O sorgo utilizado no presente trabalho foi adquirido na empresa Di Solo Sementes, situada na cidade de São Carlos/SP. Pertence à categoria granífera e não possui tanino, variedade BRS 330. É um híbrido cujo grão é da cor vermelha e cujo cultivo é de alta resistência à estiagem. Suas principais propriedades são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Principais propriedades do sorgo granífero BRS 330.

Propriedade	Especificidade
Ciclo de florescimento	71 dias
Ciclo de maturação	120 dias
Altura da planta	127 cm
Tipo de panícula	Semiaberta
Cor do endosperma	Branca
Tipo de endosperma	$\frac{3}{4}$ Farináceo
Acamamento	Resistente
Rendimento de grãos	5,0 a 6,0 t/ha

Fonte: Embrapa (2010)

Os grãos obtidos possuíam a umidade em torno de 12 a 14% em base úmida. Para poder realizar os experimentos de secagem, foi realizado o procedimento de umidificação descrito na seção 3.5.

3.2 Caracterização do Material

As propriedades físicas dos grãos de sorgo foram obtidas para duas umidades diferentes, sendo a umidade $X_{b.s.} = 0,15 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X1) correspondente aos grãos no estado em que foram adquiridos com a empresa Di Solo Sementes e $X_{b.s.} = 0,43 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X2) correspondente aos grãos umidificados, equivalendo a 30% em base úmida.

3.2.1 Dimensões características

Os grãos de sorgo, assim como outros grãos, sementes e frutos, não possuem forma geometricamente bem definida, mas sim irregular. Seriam necessárias infinitas medições somente para obter a plena caracterização dimensional de uma partícula irregular (BRITO, 2017). Segundo Mohsenin (1986), com algumas medidas de eixos perpendiculares entre si do objeto, obtém-se uma caracterização dimensional satisfatória do ponto de vista prático. O número de medições está diretamente relacionado com o quanto a partícula é irregular, distanciando-se de uma forma geométrica perfeita. Quanto mais complexa é a forma, maior o número de medições (BRITO, 2017).

Em geral, a medida de três eixos principais é suficiente para fornecer o tamanho das partículas. A medição pode ser realizada por meio de um micrômetro, paquímetro ou a partir da análise de imagens projetadas do material (BRITO, 2017). Visualmente, constatou-se que os grãos de sorgo são partículas de formato não muito distante da forma esférica. Portanto, para a determinação do tamanho dos grãos de sorgo, foram realizadas as medidas dos três eixos principais utilizando-se um paquímetro com 0,1 mm de precisão.

Os três eixos principais medidos foram tomados como comprimento (L), largura (W) e espessura (E). O diâmetro da parte esférica (D) foi calculado pela média geométrica da largura e espessura da partícula (Equação 3.1), que correspondem respectivamente à intermediária e à menor dimensão do grão. Com esses valores, foram efetuados os cálculos de volume (V) (Equação 3.2), área superficial (S) (Equação 3.3) (JAIN; BAL, 1997) e esfericidade (ϕ) (Equação 3.4) (MOHSENIN, 1986) dos grãos.

$$\begin{array}{l} \text{Diâmetro da} \\ \text{parte esférica:} \end{array} \quad D = \sqrt{(W \cdot E)} \quad (3.1)$$

$$\text{Volume:} \quad V = \frac{\pi D^2 L^2}{6(2L - D)} \quad (3.2)$$

$$\text{Área superficial:} \quad S = \frac{\pi D L^2}{(2L - D)} \quad (3.3)$$

$$\text{Esfericidade:} \quad \varphi = \frac{\sqrt[3]{L \cdot W \cdot E}}{L} \quad (3.4)$$

As medições dos três eixos principais foram realizadas para 20 grãos de sorgo a três diferentes umidades, e os resultados foram obtidos a partir das médias aritméticas dos conjuntos.

3.2.2 Massa específica

Em geral, sabe-se que a massa específica de um sólido é a razão entre a sua massa e o volume que ocupa. Devido ao formato irregular e à porosidade, que são os espaços internos não ocupados por massa, a medição da massa específica de sólidos como os grãos e sementes torna-se complexa. A partir disso, registra-se na literatura três tipos diferentes de massa específica para um determinado material (MOHSEIN, 1986; SABLANI; RAMASWAMY, 2003): massa específica aparente, massa específica real e massa específica do leito. A diferença entre cada uma delas é o volume que será levado em consideração para o cálculo respectivo.

A massa específica real (ρ_s) é a razão entre a massa de partículas (m) e o volume da parte sólida (V_s), excluindo-se o volume de vazios, que corresponde à estrutura porosa do material. Já a massa específica aparente (ρ_p) é calculada levando-se em conta também o volume de vazios do material (CREMASCO, 2014). Para realizar o cálculo da massa específica do leito (ρ_b), também conhecida como densidade *bulk*, considera-se o volume do leito empacotado, que inclui todo o volume ocupado pelo material, isto é, além do espaço ocupado pela parte sólida, também os espaços formados entre as partículas e os poros intrapartícula (STROSHINE, 1998).

Há dois métodos que se destacam para a determinação da densidade de grãos: um envolve o deslocamento de um gás, enquanto o outro utiliza o deslocamento de um líquido. Em ambos os métodos, o princípio de deslocamento de fluido de Arquimedes é usado para determinar o volume (SABLANI; RAMASWAMY, 2003).

3.2.2.1 Massa específica aparente

Para realizar o cálculo de massa específica aparente dos grãos de sorgo, utilizou-se a técnica da picnometria líquida.

A técnica consistiu em, numa primeira etapa, pesar uma certa quantidade de grãos (m_g), adicionar esses grãos de massa conhecida a um picnômetro de volume (V_{pic}) e massa (m_{pic}) conhecidos e, em seguida, completar o picnômetro com um líquido de massa específica conhecida (ρ_L), e cujas moléculas são de tamanho superior ao das aberturas dos poros dos grãos, evitando que os grãos sejam penetrados pelo líquido, ficando apenas percolados exteriormente. Feito isso, pesou-se a massa total do picnômetro mais os grãos mais o líquido adicionado (m_1). Sabendo-se a massa do picnômetro e a massa de grãos, conheceu-se, por subtração, a massa de líquido que percolou os grãos no interior do picnômetro (m_L).

$$\begin{array}{l} \text{Massa de líquido na} \\ \text{etapa 1:} \end{array} \quad m_L = m_1 - m_{pic} - m_g \quad (3.5)$$

Já em uma segunda etapa, após o descarte dos grãos e do líquido que preencheram o picnômetro, encheu-se o picnômetro completamente com o mesmo líquido de massa específica conhecida, pesou-se a massa do picnômetro mais o líquido (m_2) e, por subtração, conheceu-se a massa do líquido que ocupa todo o volume do picnômetro (m_{L2}).

$$\begin{array}{l} \text{Massa de líquido na} \\ \text{etapa 2:} \end{array} \quad m_{L2} = m_2 - m_{pic} \quad (3.6)$$

A diferença entre a massa de líquido que preencheu todo o picnômetro na segunda etapa e a massa de líquido que percolou os grãos na primeira etapa forneceu a massa de líquido deslocada (m_{Ld}) pela presença dos grãos na primeira etapa.

$$\begin{array}{l} \text{Massa de líquido} \\ \text{deslocado:} \end{array} \quad m_{Ld} = m_{L2} - m_L \quad (3.7)$$

Conhecendo-se a massa de líquido deslocada (m_{Ld}) e sua massa específica (ρ_L), calculou-se o volume que foi deslocado (V_{Ld}), o qual, pelo princípio de Arquimedes, corresponde ao volume ocupado pelos grãos percolados na primeira etapa.

$$\begin{array}{l} \text{Volume de líquido} \\ \text{deslocado:} \end{array} \quad V_{Ld} = \frac{m_{Ld}}{\rho_L} \quad (3.8)$$

Por fim, a razão entre a massa de grãos previamente conhecida (m_g) e o volume de líquido deslocado (V_{Ld}) forneceu a massa específica aparente dos grãos (ρ_p).

$$\begin{array}{l} \text{Massa específica} \\ \text{aparente dos grãos:} \end{array} \quad \rho_p = \frac{m_g}{V_{Ld}} \quad (3.9)$$

A massa de grãos utilizada para o experimento de picnometria líquida foi de aproximadamente 18 g e o volume do picnômetro foi de 25 mL.

O líquido utilizado para encontrar a massa específica aparente dos grãos de sorgo a diferentes umidades foi o hexano à temperatura média de 24°C, cujas especificações estão no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Especificações do hexano utilizado na picnometria líquida.

Especificações	
Fabricante	QHEMIS
Número CAS	116-54-3
Peso molecular	86,18 g/mol
Ponto de ebulição	64 a 68°C
Componentes presentes	5 isômeros de hexano e metilciclopentano
Concentração total	98,5%
Massa específica a 25°C	0,687 g/mL

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.2.2 Massa específica real

Para encontrar a massa específica real (ρ_s) dos grãos de sorgo a diferentes umidades, foi utilizada a técnica de picnometria gasosa, que consistia em colocar uma certa massa de grãos no picnômetro de gás hélio *AccuPyc* 1330, da marca *Micromeritics*, por onde passava uma corrente de gás hélio cujas moléculas são pequenas o suficiente para penetrar nos poros dos grãos. Com o gás hélio percolando e penetrando os grãos de sorgo, ao final, o equipamento

fornecia diretamente o volume e a massa específica média real da amostra de grãos ao longo de 10 corridas.

3.2.3 Porosidade

A porosidade é uma propriedade física dos grãos que está diretamente relacionada com o volume da partícula e de vazios. Pode se referir a três definições possíveis: a razão entre o volume de poros internos da partícula e o volume que a partícula ocupa no espaço (porosidade da partícula, ε_p); a razão do volume de vazios entre as partículas num leito e o volume total do leito de partículas (porosidade *bulk*, ε_b); a razão entre os volumes de poros das partículas no leito com os vazios entre as partículas e o volume total do leito de partículas (porosidade total, ε_t) (ALBINI, 2015; BRITO, 2017; MOHSENIN, 1986).

Existem diversos métodos para encontrar os valores de porosidade, mas, segundo Prado (2004), a maneira mais utilizada é por meio do cálculo com os dados de massa específica, conforme as equações a seguir.

$$\text{Porosidade da partícula:} \quad \varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (3.10)$$

$$\text{Porosidade bulk:} \quad \varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.11)$$

$$\text{Porosidade total:} \quad \varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (3.12)$$

Apesar de não aferir de maneira empírica os volumes correspondentes para os experimentos em particular, ao menos as equações equivalem às definições dadas se para cada uma delas for considerado o mesmo valor de massa nas definições de massa específica.

3.3 Caracterização do leito

Para a caracterização do meio poroso formado pelos grãos de sorgo, foi calculada a porosidade *bulk* (ε_b), obtida pela densidade bulk (ρ_b) e pela densidade aparente (ρ_p) dos grãos de sorgo com a Equação 3.13.

$$\begin{array}{l} \text{Porosidade} \\ \text{bulk:} \end{array} \quad \varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.13)$$

A densidade bulk é obtida calculando-se a razão entre a massa de grãos e o volume do recipiente ocupado. Para isso, utilizou-se o método da proveta, que consistiu em preencher com os grãos uma proveta graduada de 2000 mL e, após algumas batidas na base da proveta até a altura do leito ficar constante, pesou-se a massa de grãos que ocupou este volume. O mesmo método foi utilizado por Genaro (2021), Altino (2019), Felizardo (2018) e Brito (2017) para a determinação da densidade *bulk* de esferas de alumina e de grãos de cevada, aveia, lentilha, soja e sorgo.

3.4 Umidade dos grãos

A umidade dos grãos foi determinada por meio do método da estufa a $105^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas (AOAC, 2002). O método consistiu em colocar a amostra úmida em um recipiente seco e de massa conhecida, pesar o conjunto e levar para a estufa a $105^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ e deixar por 24 horas, garantindo assim que toda a água contida na amostra havia sido evaporada, ficando somente a matriz seca no recipiente. Decorridas as 24 horas, o recipiente com os grãos secos foi retirado e levado para um dessecador para que a amostra esfriasse sem adsorver a umidade do ambiente. Após 40 minutos, realizou-se a pesagem das amostras. Conhecendo-se a massa inicial da amostra úmida e a massa final da amostra já seca na estufa e efetuando o cálculo da diferença, obteve-se a massa de água que havia sido totalmente removida da amostra.

Com as informações de massa inicial e massa final, calculou-se a fração de umidade contida na amostra, conforme a Equação 3.14, para a fração em base úmida, e Equação 3.15, para a fração em base seca.

$$\begin{array}{l} \text{Umidade base} \\ \text{úmida} \end{array} \quad X_{bu} = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (3.14)$$

$$\begin{array}{l} \text{Umidade base seca} \end{array} \quad X_{bs} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (3.15)$$

Sendo m_u a massa úmida e m_s , a massa seca.

3.5 Umidificação do sorgo

A colheita dos grãos de sorgo é realizada quando eles já estão próximos da maturidade fisiológica, que é em torno de 30% b.u., o que corresponde a 0,43 kg de água por kg de material seco. Para que os experimentos de secagem fossem feitos com os grãos de sorgo em estado semelhante ao da colheita, foi necessário realizar o procedimento de umidificação, uma vez que os grãos foram obtidos no mercado local com a empresa Di Solo Sementes já tendo passado pela secagem.

A metodologia utilizada para a umidificação foi conforme o que se fez em trabalhos anteriores no Centro de Secagem por Vieira (2012), Brito (2017) e Albin (2019), para a caracterização e secagem de grãos de linhaça, sorgo e cevada, respectivamente. Consistiu em adicionar, em pacotes de polietileno, 200 g de grãos de sorgo, cuja umidade inicial foi previamente conhecida por meio do método da estufa a 105°C por 24h (AOAC, 2002), junto a uma certa quantidade calculada de água a fim de compor um total de massa em que 30% fosse água e 70% fosse grãos. A quantidade de água necessária a ser adicionada é fornecida por um balanço de massa descrito pela Equação 3.16 (BALASUBRAMANIAN, 2001).

$$\text{Água adicional:} \quad Q = \frac{A(b - a)}{100 - a} \quad (3.16)$$

Sendo Q a água necessária a ser adicionada, A , a massa inicial de grãos (200g), b , o percentual final de água pretendido (30% b.u.) e a , a umidade inicial dos grãos determinada pelo método da estufa a 105°C.

A mistura de grãos e água adicional foi uniformizada em cada pacote para que a água se espalhasse igualmente por todo o espaço entre os grãos. Em seguida, os pacotes foram levados à geladeira onde permaneciam refrigerados em torno de 4°C por no mínimo 24h antes de serem utilizados. A baixa temperatura de armazenamento teve o papel de retardar a atividade biológica no material e o tempo mínimo de 24h foi estipulado para que toda a umidade ficasse bem distribuída no interior dos grãos.

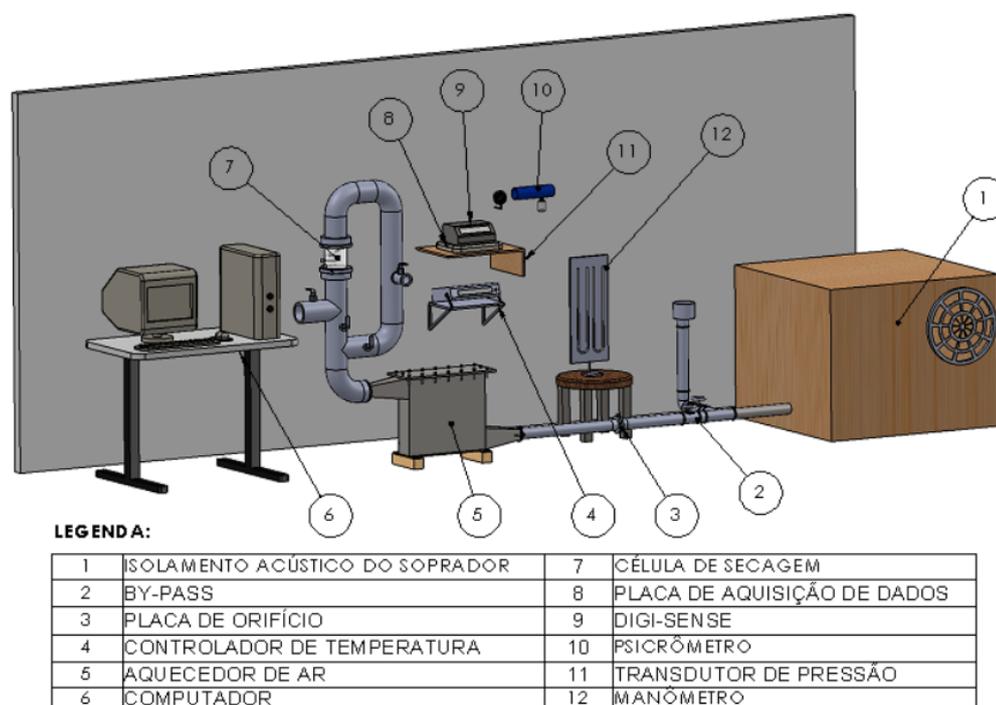
A eficácia do método foi testada tomando-se amostras de cinco partes diferentes de um mesmo pacote e em seguida verificando se a umidade de 30% b.u. havia sido atingida em cada amostra por meio do método da estufa a 105°C por 24 horas. O teste de eficácia foi feito em

duplicata e apresentou desvio menor do que 5%. Além disso, não foi observada quantidade significativa de água livre em excesso nas amostras retiradas da geladeira.

3.6 Aparato Experimental

Os experimentos de secagem foram realizados no aparato esquematizado pela Figura 3.1, instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Os equipamentos e dispositivos periféricos que compuseram o aparato são especificados na legenda da figura.

Figura 3.1: Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (desenho fora de escala).

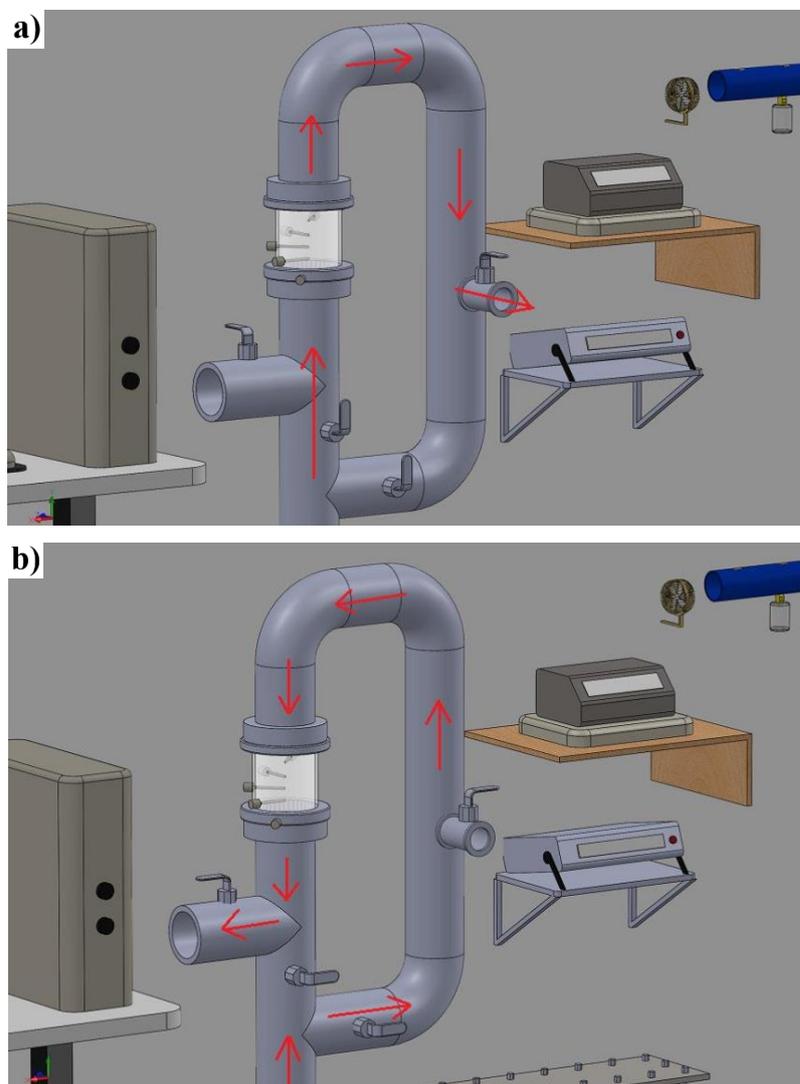


Fonte: Genaro (2021)

A célula de secagem (7) foi uma coluna cilíndrica de acrílico de 10 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento, e podia ser removida do aparato. Para os experimentos térmicos, foi utilizada como célula de secagem uma coluna em acrílico não seccionada. Para os experimentos de umidade, foi utilizada como célula de secagem uma coluna seccionada em 10 camadas de 1 cm cada. No aparato, o ar aquecido foi utilizado como o fluido de secagem, que era soprado para dentro do sistema por meio de um soprador radial *IBRAM* de 3,5 HP de potência (1). O ar foi aquecido por um aquecedor (5) constituído de duas resistências elétricas ligadas em série de 1000 W de potência cada uma. Havia, ainda, um controlador de temperatura *Flyever FE50S* (4)

ligado às resistências que modulava a potência do aquecedor para manter a temperatura desejada. O ajuste da vazão de ar foi feito por um sistema de válvulas com by-pass (2). Uma placa de orifício instalada (3) forneceu a queda de pressão que foi lida por um transdutor de pressão da marca *Auto Tran Incorporated* que opera na faixa de 0 a 10 inH₂O e 1 a 5 V.

Figura 3.2: Esquema do sentido do escoamento do ar no secador de leito fixo (desenho fora de escala): a) Escoamento ascendente. b) Escoamento descendente.



Fonte: Genaro (2021)

Uma placa de aquisição *Lynx ADS0500* (8) e um microcomputador (6) foram utilizados para a aquisição e armazenamento das variáveis de temperatura e de pressão medidas pelos termopares e transdutores de pressão. A leitura e o armazenamento dos dados foram feitos por meio de uma interface computacional em ambiente *LabVIEW*. Para determinar as umidades relativa e absoluta do ar de secagem, foram obtidas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente por meio de um psicrômetro (10).

A reversão da direção do escoamento do ar aquecido entre sentido ascendente e sentido descendente é realizada por um sistema de válvulas conforme o esquema da Figura 3.2. As regiões de alimentação de ar ascendente e descendente possuem uma seção de 3 cm de altura e 10 cm de diâmetro com recheio de esferas de vidro com D_p de 2,80 mm. A tubulação do equipamento possui isolamento térmico composto de silicato de cálcio e alumínio.

3.7 Medição de umidade nas extremidades do leito fixo

A fim de proporcionar maior disponibilidade de dados para futuramente desenvolver um modelo adaptativo da secagem no leito fixo em camada espessa, foram acoplados, em cada uma das extremidades das duas células de secagem (fracionada e não fracionada), sensores de umidade relativa, temperatura e pressão absoluta Bosch® BME280. As medidas realizadas pelos sensores nas extremidades da célula de secagem foram processadas por dois microcontroladores Arduino® UNO instalados próximos de cada extremidade, conforme a Figura 3.3, e armazenadas em planilha Excel® num microcomputador por meio da interface Processing® 3 com intervalo de 3 segundos entre cada coleta de dado.

Figura 3.3: Microcontroladores Arduino® UNO instalados no equipamento.



Fonte: elaborado pelo autor.

O microcontrolador Arduino® é de baixo custo quando comparado a produtos comerciais sofisticados. Além do baixo custo, o Arduino® é um hardware de código aberto, com fácil instalação, controle e operação, não requer um suporte técnico rebuscado e não possui a necessidade de uma fonte de alimentação dedicada (a alimentação pode ser feita por meio de um cabo USB conectado a um microcomputador) (DAL-BÓ, 2021).

3.8 Secagem em camada fina

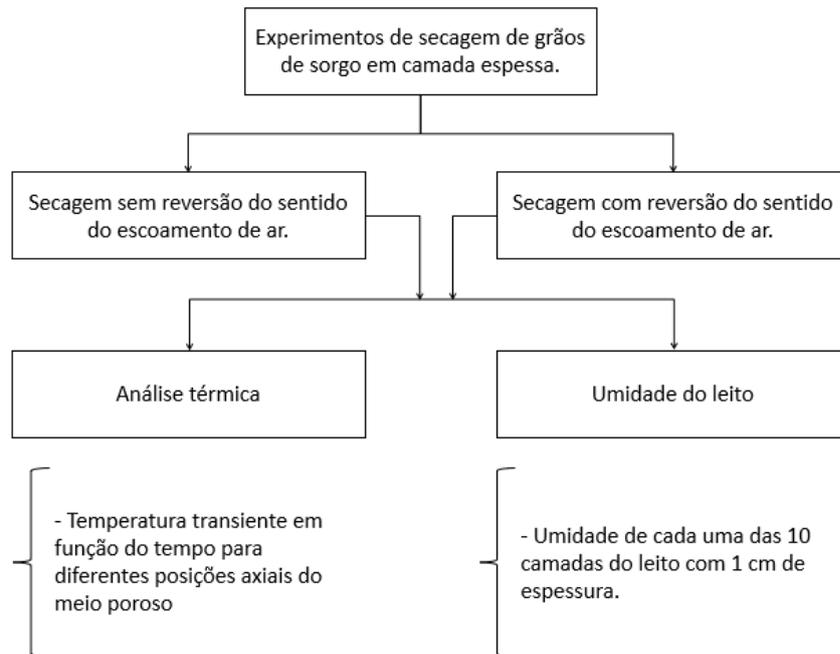
De modo semelhante ao que foi realizado por Albini (2015) e por Altino (2019) com grãos de cevada, soja, lentilha, aveia e alumina, foram realizados ensaios em camada espessa com termopares distribuídos a cada 1 cm, e a espessura da camada fina foi considerada como sendo esta distância de 1 cm, pois aí verificou-se as menores diferenças de temperatura entre termopares adjacentes. O critério foi a diferença de temperatura entre as medidas dos termopares adjacentes não ser maior que o desvio padrão associado à medida de cada termopar nos ensaios em camada espessa.

Realizou-se um experimento cinético em camada fina para cada uma das temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C com escoamento de ar ascendente à velocidade de 2,1 m·s⁻¹ utilizando a célula de secagem não seccionada mostrada na Figura 3.5. Para evitar a movimentação da camada fina de grãos na velocidade definida, foi colocada uma tela metálica móvel sobre a camada. Cada um dos três experimentos foi conduzido até a umidade média do leito atingir a umidade de equilíbrio dinâmico, e isto foi constatado por meio da pesagem da célula a cada determinado instante e finalizando quando a diferença entre as pesagens se tornou pouco significativa (0,3 g). Ao final de cada secagem, a umidade média final foi determinada pelo método da estufa a 105°C por 24 horas.

3.9 Secagem em camada espessa

Os experimentos de secagem de grãos de sorgo consistiram na obtenção da temperatura em função da posição e do tempo, num intervalo de aquisição de a cada 20 segundos, assim como a umidade média em cada camada de 1,0 cm, para a secagem em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar. A Figura 3.4 apresenta um esquema dos experimentos envolvidos na análise térmica e de massa realizadas durante a secagem.

Foram avaliadas as temperaturas de 50 °C e 60 °C. Para a escolha da velocidade do ar empregada ao processo, foram realizados experimentos prévios em que a velocidade mínima de fluidização das partículas foi considerada. Desta forma, a maior velocidade utilizada (2,1 m·s⁻¹) garantiu que não ocorresse movimentação das partículas durante o processo de secagem.

Figura 3.4: Experimentos de secagem de grãos de sorgo em camada espessa.

Fonte: Adaptado de Genaro (2021).

A reversão do sentido do escoamento do ar de secagem foi estabelecida para o tempo inicial de aplicação da reversão (t_0) em 10 minutos com tempo de duração da reversão do ar de secagem (Δt) de 30 minutos. Nos experimentos em camada espessa sem reversão, foi verificado que a temperatura ao longo das posições aumenta lentamente, dessa maneira, estipulou-se um intervalo entre reversões de 30 minutos, considerado suficiente para observar a dinâmica do processo. Na Tabela 3.1 são apresentadas as condições de secagem utilizadas nos experimentos.

Tabela 3.1: Condição de operação dos experimentos de secagem dos grãos de sorgo em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.

Condição de operação	Valores utilizados
Temperatura de secagem – T [°C]	50 e 60
Velocidade do ar – U [m·s ⁻¹]	2,1
t ₀ [min]	10
Δt [min]	30
Umidade inicial dos grãos de sorgo - X ₀ [kg água · kg sólido seco ⁻¹]	0,43
Umidade relativa do ar de secagem - UR (%)	18 a 72%
Altura de leito estático [cm]	10,5 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes de iniciar os experimentos de secagem, foi necessário estabilizar as condições de operação, como vazão e temperatura do ar. Para isso, o aparato foi ligado uma hora antes do início de cada experimento. O meio poroso foi empacotado na célula de secagem e então iniciava-se o experimento. Os experimentos térmicos sem reversão e de massa foram realizados em triplicata. Os experimentos térmicos com reversão foram realizados em duplicata.

Para quantificar o encolhimento do leito durante a secagem em camada espessa, foi realizado um experimento a 50°C sem reversão de escoamento do ar e calculada a razão de encolhimento, conforme a Equação 3.16.

$$S_b = \frac{V_b}{V_{b0}} \quad (3.16)$$

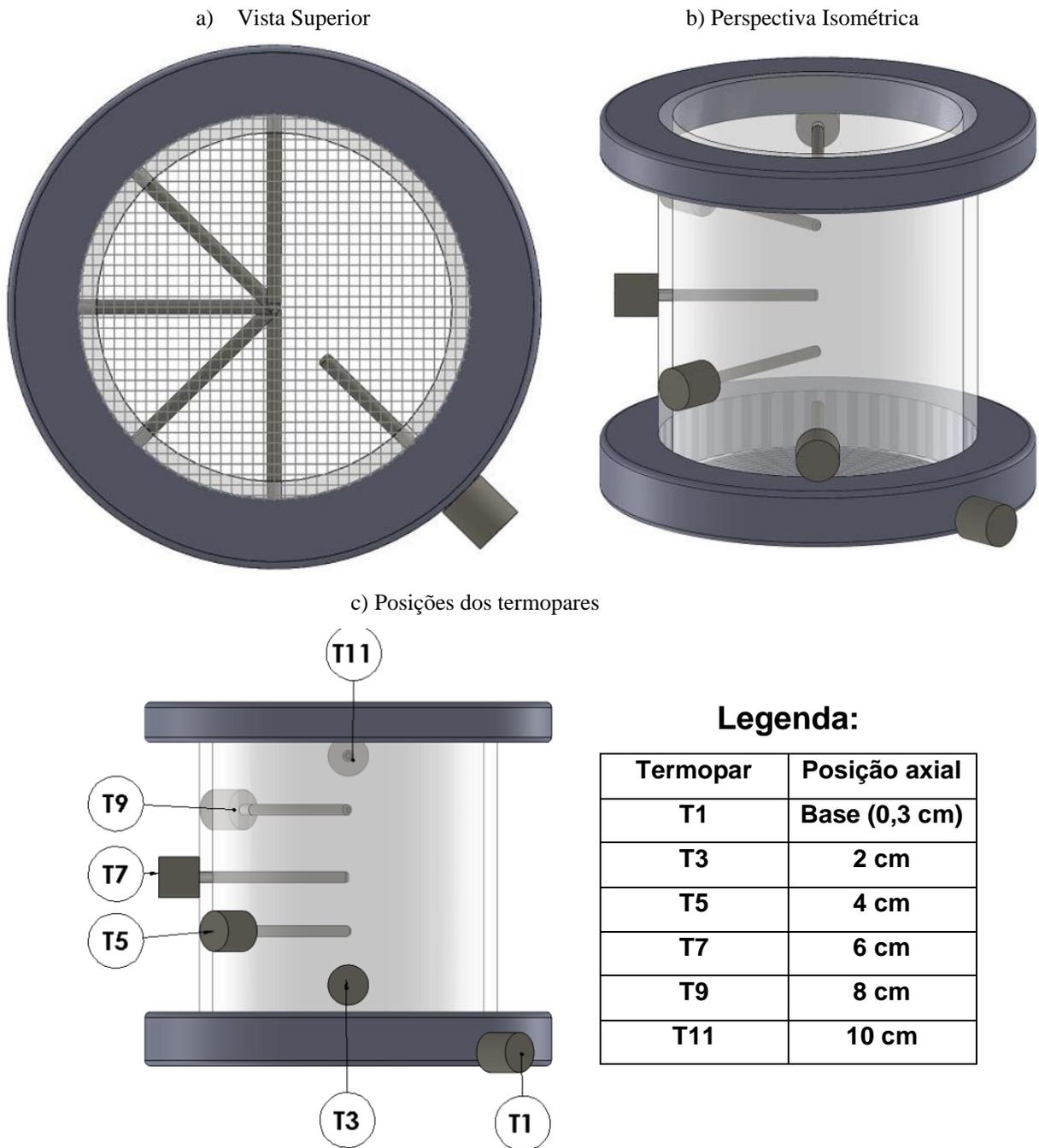
Em que V_{b0} é o volume inicial do leito e V_b é o volume atual.

3.9.1 Experimentos térmicos

Para determinar o comportamento das variáveis de temperatura ao longo das posições axiais no meio poroso formado por grãos de sorgo durante os experimentos de secagem com e sem a reversão do escoamento de ar, foi utilizada a célula de secagem com parede de acrílico não seccionada esquematizada na Figura 3.5. Esta célula possui furos que se distribuem helicoidalmente ao longo do seu eixo para a inserção de termopares do tipo J (ferro-constantan). A distribuição helicoidal dos termopares inseridos nos orifícios da célula de secagem é conveniente para evitar possíveis interferências no escoamento do ar e na medição dos termopares. As temperaturas das posições axiais foram fornecidas por 6 termopares inseridos na célula de secagem, conforme ilustra a Figura 3.5c. Para a calibração de cada um dos termopares, foi utilizado o *Block Calibrator DB-35L*.

Para realizar o empacotamento do leito com os grãos de sorgo para os experimentos térmicos, foi realizado o derramamento sucessivo de uma quantidade fixa de grãos para se ter a mesma altura de queda, dando-se batidas na parede do leito a cada derramamento para promover a acomodação dos grãos. Após as batidas, a camada de grãos seguinte era derramada quando não se observava variação de altura do leito, assim seguindo até atingir a altura do leito estático, conforme a metodologia de Albini (2019, apud ZOTIN, 1985).

Figura 3.5: Detalhes da célula de secagem para os experimentos térmicos (desenho fora de escala).



Fonte: Adaptado de Genaro (2021).

Antes de iniciar o processo de secagem, os pacotes com grãos de sorgo umidificados foram retirados da geladeira e deixados em bancada para atingir a temperatura ambiente por no mínimo uma hora; ligavam-se os equipamentos do aparato experimental e o sistema de aquisição de dados; ajustavam-se as válvulas para o escoamento em sentido ascendente e mantinha-se acoplada a célula de secagem não utilizada com esferas de alumina até a altura de leito estático estabelecida para os grãos de sorgo; inseria-se um termopar na base do leito para controlar a temperatura do ar de entrada; depois disso, ajustava-se a vazão de ar do sistema,

definia-se o *setpoint* de temperatura desejado e se iniciava o aquecimento; esperava-se aproximadamente uma hora para que a temperatura na base da célula de secagem com alumina se estabilizasse; depois desse tempo, os pacotes com sorgo umidificado já haviam entrado em equilíbrio térmico com o ambiente; realizava-se o empacotamento dos grãos de sorgo na célula de secagem não seccionada e eram inseridos os termopares nas posições axiais; em seguida, retirava-se a célula de secagem com alumina e acoplava-se o leito empacotado com grãos de sorgo úmido e iniciava-se imediatamente a aquisição de dados de tempo, temperaturas e vazão de ar; por último, reajustava-se a vazão de ar para manter a velocidade superficial de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se o experimento térmico era sem reversão, aguardava-se o tempo final para encerrar a aquisição dos dados e depois desligar o equipamento. Se o experimento térmico era com reversão, esperava-se o tempo $t_0 = 10$ minutos para realizar a primeira reversão direcionando o escoamento para o sentido descendente, depois disso, a cada $\Delta t = 30$ minutos, fazia-se uma nova reversão até atingir o tempo final, encerrar a aquisição dos dados e desligar o equipamento.

Foram realizados três experimentos de 50°C e um de 60°C com escoamento de ar em sentido ascendente sem reversão, e dois experimentos de 50°C e dois de 60°C com reversão do escoamento de ar.

3.9.2 Experimentos de transferência de massa

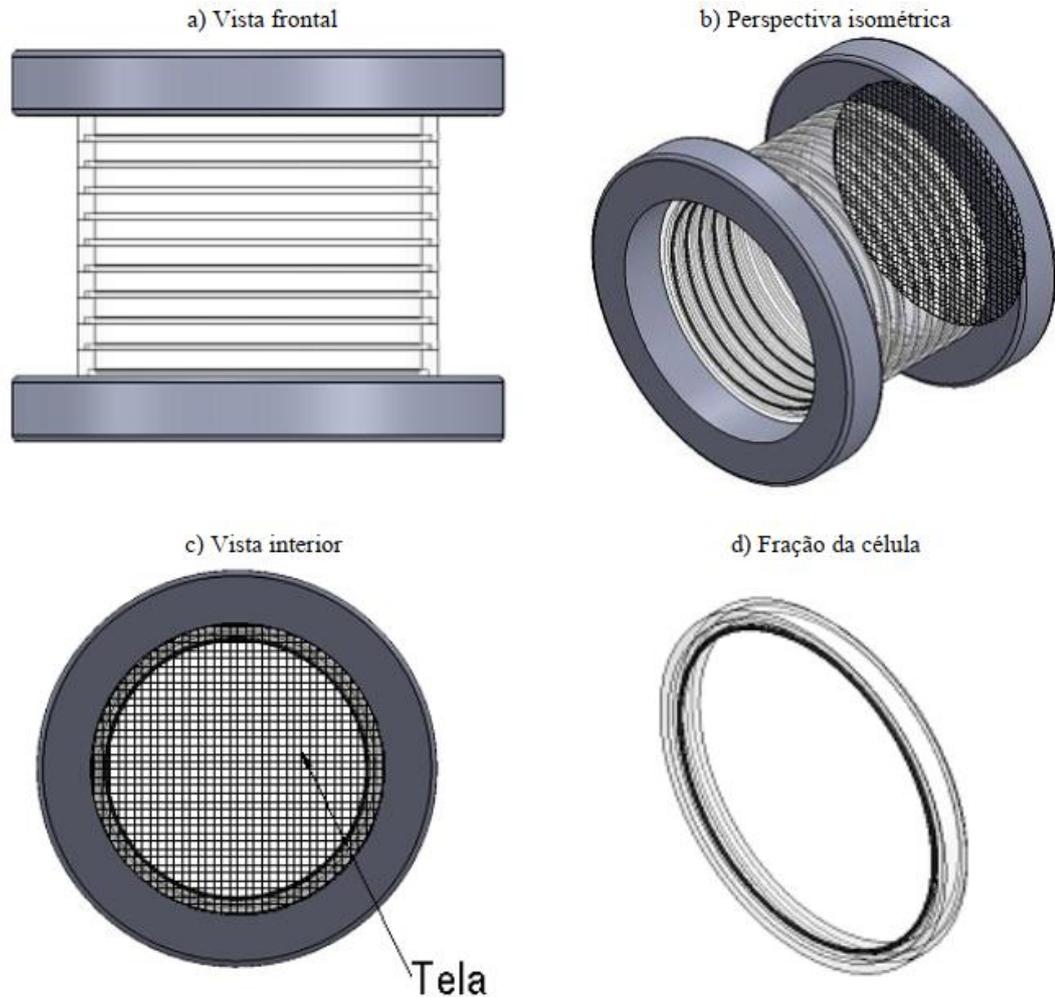
Para determinar o comportamento das variáveis de umidade média ao longo das posições axiais no meio poroso formado por grãos de sorgo durante os experimentos de secagem com e sem a reversão do escoamento de ar, foi utilizada a célula de secagem seccionada esquematizada na Figura 3.6. Esta célula também é feita em acrílico, porém é composta por 10 seções com 1 cm de altura e 10 cm de diâmetro cada.

Para cada instante de tempo definido para avaliar a umidade do material em cada seção do leito, novos grãos de sorgo umidificados foram utilizados. Empacotava-se a célula com os grãos, realizava-se a secagem até o tempo definido para o ponto de amostra e avaliavam-se as umidades de cada seção pelo método da estufa descrito na seção 3.4.

Foram realizados 1 experimento de transferência de massa de 50°C com escoamento de ar em sentido ascendente sem reversão e 2 experimentos de 50°C com reversão do escoamento

de ar. Cada experimento foi constituído por 11 corridas, cada corrida tinha um tempo final definido: 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 min.

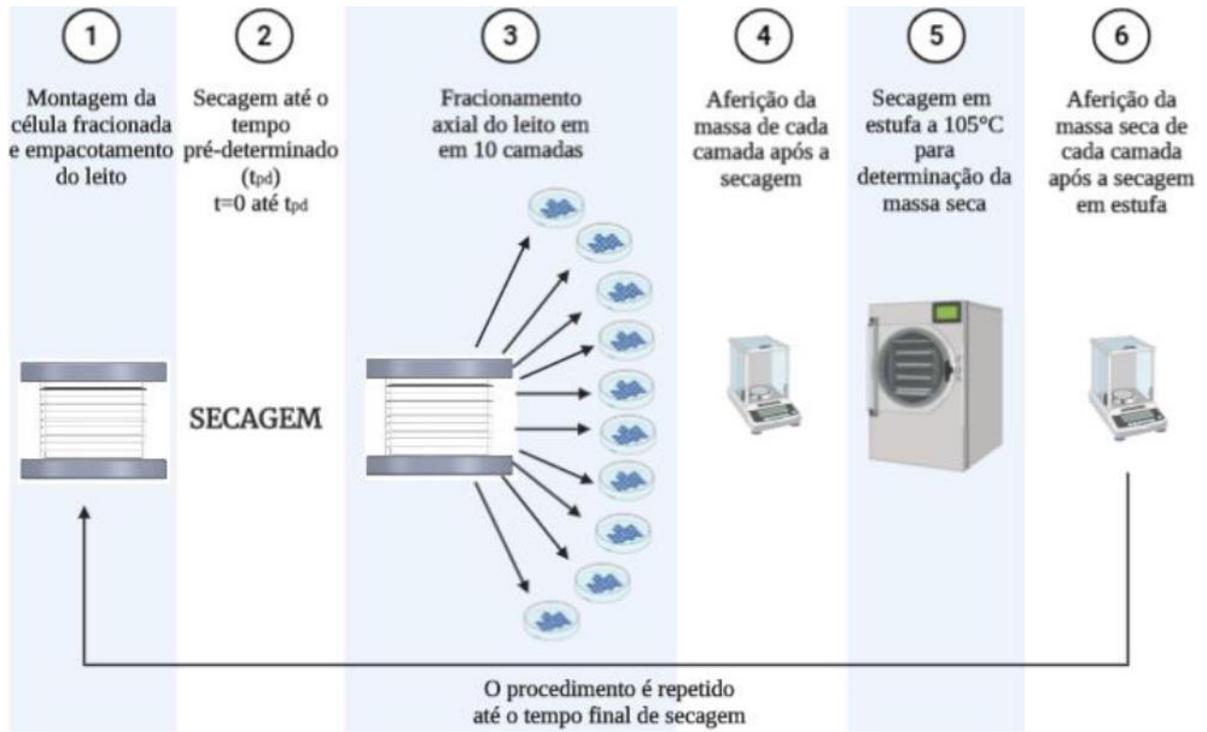
Figura 3.6: Ilustração da célula de secagem fracionada (desenho fora de escala).



Fonte: Genaro (2021).

O procedimento experimental para a obtenção do comportamento da umidade do meio poroso ao longo do tempo e das posições axiais pode ser descrito pelo esquema feito por Genaro (2021), que realizou a secagem de alumina no mesmo aparato experimental, mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Procedimento para obtenção da umidade média de cada fração do leito na secagem com e sem reversão do escoamento do ar (desenho fora de escala).



Fonte: Genaro (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos grãos de sorgo e do leito

A Tabela 4.1 apresenta as propriedades físicas dos grãos de sorgo para duas umidades diferentes, sendo a umidade $X_{b.s.} = 0,15 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X1) correspondente aos grãos no estado em que foram adquiridos com a empresa Di Solo Sementes e $X_{b.s.} = 0,43 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X2) correspondente aos grãos umidificados, equivalendo a 30% em base úmida.

Analisando-se visualmente, os grãos de sorgo umidificados não apresentaram umidade residual significativa, isto é, não ficaram encharcados.

Tabela 4.1: Dados de caracterização dos grãos de sorgo.

Propriedades físicas	Dados	
	X1 = 0,15 kg·kg ⁻¹	X2 = 0,43 kg·kg ⁻¹
Comprimento L (mm)	4,04 ± 0,26	4,23 ± 0,28
Largura W (mm)	3,92 ± 0,27	4,21 ± 0,28
Espessura E (mm)	2,67 ± 0,23	2,81 ± 0,24
Diâmetro da parte esférica D (mm)	3,23 ± 0,24	3,41 ± 0,24
Área superficial S (mm ²)	34,27 ± 4,78	38,29 ± 5,12
Volume V (mm ³)	18,62 ± 3,90	21,97 ± 4,29
Esfericidade φ (-)	0,86 ± 0,02	0,86 ± 0,02
Massa específica aparente ρ_p (g.cm ⁻³)	1,12	1,77
Massa específica real ρ_s (g.cm ⁻³)	1,37	1,30
Massa específica do leito ρ_b (g.cm ⁻³)	0,84	0,74
Porosidade do leito ε_b (-)	0,34	0,37

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se, pelos valores medidos das dimensões características e, conseqüentemente, também os valores calculados de volume e área superficial, que houve um aumento com a umidade, apesar de ter sido um aumento pouco significativo pois manteve-se dentro da faixa de desvio padrão das medidas.

A esfericidade se manteve constante, o que indica não haver alteração relevante no formato das partículas com a variação de umidade.

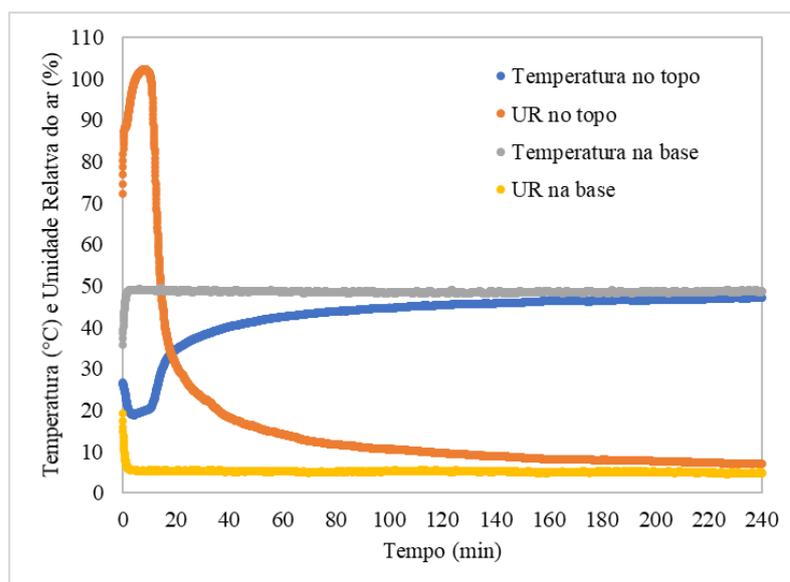
A massa específica aparente aumentou com o aumento da umidade. Pode-se dizer que o aumento da quantidade de água no interior das partículas acarreta um aumento da massa mais significativo que possíveis efeitos de entumescimento dos grãos. Já no caso da massa específica real, observou-se uma diminuição pouco significativa com o aumento da umidade.

A massa específica do leito (densidade *bulk*) diminuiu com o aumento da umidade, o que pode significar um aumento de massa das partículas menos significativo que o aumento do volume ocupado no leito.

4.2 Medição de umidade nas extremidades do leito fixo

A seguir, são mostrados os resultados de temperatura e umidade relativa do ar nas extremidades da célula não seccionada durante um experimento de secagem de sorgo em camada espessa sem reversão a 50°C.

Figura 4.1: Valores de temperatura e umidade relativa do ar em função do tempo nas extremidades do leito de sorgo em um experimento de secagem em camada espessa sem reversão ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela Figura 4.1, pode-se verificar que, logo no início do processo de secagem, o ar na saída (topo do leito) fica saturado ($UR = 100\%$), depois começa a diminuir rapidamente até atingir o estado estacionário, aproximando-se dos valores de umidade relativa do ar na saída (base do leito). Isso se explica pelo fato de que, ao iniciar a secagem, os grãos de sorgo estão com umidade alta, então o ar que entra seco percola o meio poroso e rapidamente absorve a

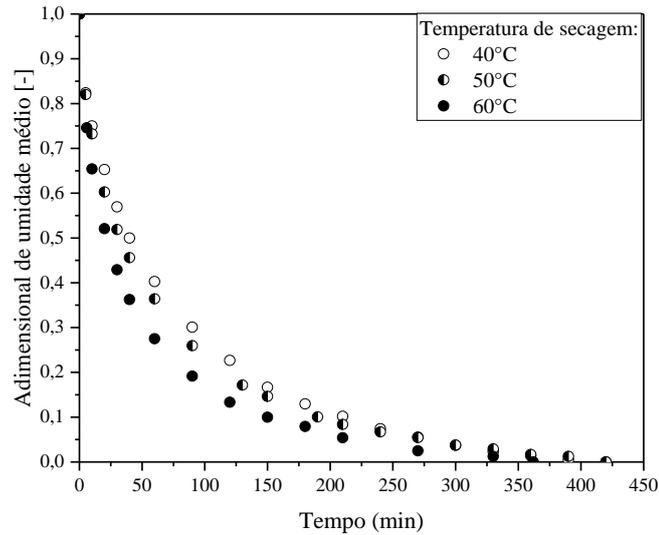
umidade mais fracamente ligada à estrutura dos grãos, saindo saturado por volta do tempo de 10 minutos. Depois desse tempo, os grãos vão ficando cada vez mais secos, e a tendência é que o ar saia cada vez menos rico em umidade. Pode-se verificar que a umidade relativa na saída cai rapidamente entre 10 e 20 minutos de secagem, depois passa a diminuir mais lentamente até se aproximar dos valores de umidade na entrada. Isso se explica pelo fato de que a maior parte de umidade contida nos grãos está fortemente ligada à estrutura porosa, sendo a secagem controlada pelo mecanismo difusivo que ocorre no interior dos grãos.

Verifica-se ainda, na Figura 4.1, que a temperatura de entrada do leito encontra-se já desde o início da secagem em estado estacionário no valor de 50°C, e a temperatura na saída diminui rapidamente nos primeiros 4 minutos, depois aumenta lentamente até 10 minutos e aumenta rapidamente até 20 minutos, até atingir o estado estacionário próximo de 50°C. Nos primeiros 4 minutos de secagem, o calor perdido pelo ar é utilizado para remover a maior parte da umidade fracamente ligada dos grãos de sorgo, em seguida, até o tempo de 10 minutos, a temperatura na saída é elevada muito lentamente porque, com o ar saturado, a tendência é que a temperatura varie muito pouco, por ser uma condição de equilíbrio termodinâmico. Em seguida, a temperatura aumenta rapidamente até 20 minutos porque, à medida em que o meio poroso vai ficando mais seco, menor quantidade de calor é cedida pelo ar para promover a evaporação. Depois a temperatura de saída sobe lentamente, sendo o calor fornecido pelo ar tanto para promover a difusão de umidade no interior dos grãos, como para aumentar a temperatura do meio poroso.

4.3 Secagem de sorgo em camada fina

A cinética de secagem dos grãos de sorgo em camada fina (1 cm) para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹ é representada pelas curvas da Figura 4.2. A partir dos dados cinéticos representados, pode-se ajustar modelos de secagem em camada fina, assim sendo possível escolher qual o melhor modelo para compor as equações constitutivas da modelagem de secagem em camada espessa.

Figura 4.2: Adimensional de umidade médio em função do tempo, para a secagem de grãos de sorgo em camada fina nas temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹.

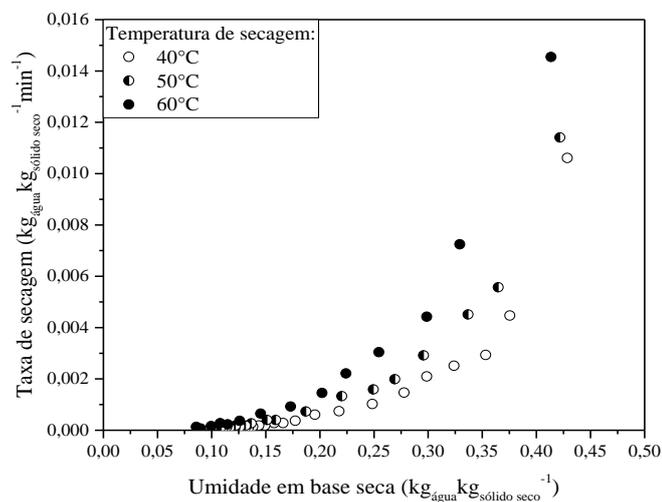


Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se, na Figura 4.2, que, quanto maior a temperatura de alimentação do ar de secagem, mais rapidamente o adimensional de umidade diminui. Isto ocorre porque as temperaturas mais altas fornecem maior quantidade de calor para o meio poroso, fazendo com que as moléculas de água presentes se agitem mais rapidamente e rompam as ligações no interior dos grãos passando para a fase fluida, conforme observaram Perazzini (2014) e Genaro (2021) para a secagem de alumina em camada fina.

Na Figura 4.3, são mostradas as taxas de secagem de sorgo em camada fina a diferentes temperaturas em função da umidade em base seca.

Figura 4.3: Taxa de secagem em função da umidade em base seca, para as temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se, na Figura 4.3, que não é identificado período de taxa constante, como também, nota-se que as taxas decrescem rapidamente até a umidade 0,16 b.s., e vão decrescendo lentamente abaixo dessa umidade, o que indica a existência de dois períodos de taxa decrescente. No primeiro, a umidade se difunde pelo interior do grão e é removida pelo ar de secagem na superfície do grão. No segundo período de taxa decrescente, a umidade é evaporada diretamente do interior do grão, tendo um percurso cada vez maior para percorrer na difusão à medida que umidade decresce, sendo um período mais lento até atingir a umidade de equilíbrio (0,13 b.s., para 40°C, 0,10 b.s. para 50°C. e 0,08 b.s., para 60°C).

4.4 Modelos empíricos e semi-empíricos de secagem em camada fina

Os parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados de cinética de secagem em camada fina, para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹, são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos para os dados de secagem de sorgo em camada fina (U = 2, 1 m·s⁻¹).

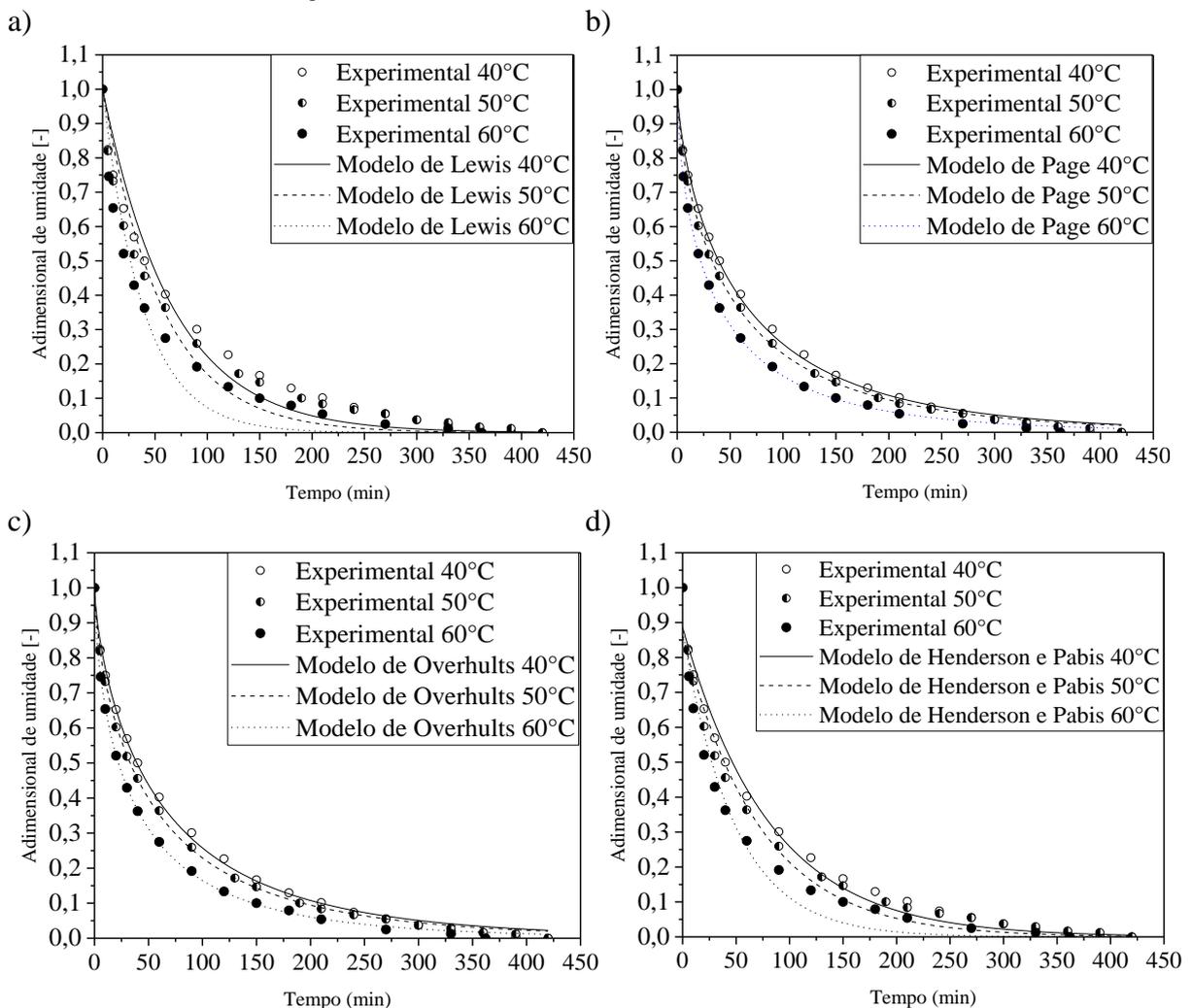
Temperatura	Lewis	Page	Overhults	Henderson e Pabis
40°C	$k_L = 1,505 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-1}$ $R^2 = 0,967$ $\chi^2 = 3,477 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0573$ $E\% = 34,926$	$k_P = 5,015 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,7160$ $R^2 = 0,998$ $\chi^2 = 2,347 \cdot 10^{-4}$ $\text{REQM} = 0,0153$ $E\% = 44,548$	$k_O = 1,530 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,7160$ $R^2 = 0,998$ $\chi^2 = 2,347 \cdot 10^{-4}$ $\text{REQM} = 0,0153$ $E\% = 44,562$	$k = 1,231 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $A = 0,8864$ $R^2 = 0,986$ $\chi^2 = 1,572 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0385$ $E\% = 20,548$
50°C	$k_L = 1,769 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-1}$ $R^2 = 0,951$ $\chi^2 = 3,850 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0623$ $E\% = 46,778$	$k_P = 6,445 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,6795$ $R^2 = 0,999$ $\chi^2 = 6,496 \cdot 10^{-5}$ $\text{REQM} = 0,0074$ $E\% = 13,142$	$k_O = 1,769 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,6795$ $R^2 = 0,999$ $\chi^2 = 6,482 \cdot 10^{-5}$ $\text{REQM} = 0,0074$ $E\% = 13,100$	$k = 1,394 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $A = 0,861$ $R^2 = 0,979$ $\chi^2 = 2,220 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0421$ $E\% = 31,712$
60°C	$k_L = 9,714 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-1}$ $R^2 = 0,948$ $\chi^2 = 5,290 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0701$ $E\% = 46,733$	$k_P = 9,714 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,6345$ $R^2 = 0,9996$ $\chi^2 = 4,490 \cdot 10^{-5}$ $\text{REQM} = 0,0067$ $E\% = 9,096$	$k_O = 2,535 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $n = 0,6345$ $R^2 = 0,9996$ $\chi^2 = 4,490 \cdot 10^{-5}$ $\text{REQM} = 0,0067$ $E\% = 9,105$	$k = 2,054 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-n}$ $A = 0,8755$ $R^2 = 0,968$ $\chi^2 = 3,226 \cdot 10^{-3}$ $\text{REQM} = 0,0568$ $E\% = 37,284$

Fonte: elaborado pelo autor.

Pelo critério de parâmetros estatísticos, quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 , e menores os valores de χ^2 , REQM e E%, melhor é o ajuste do modelo aos dados. Para as condições de experimento estabelecidas na geração dos dados, os modelos que melhor se ajustaram foram os de Page e de Overhults, em seguida o modelo de Henderson e Pabis, e por último o modelo de Lewis. Observa-se que, conforme esperado, os modelos de Page e de Overhults apresentaram os mesmos valores de R^2 , χ^2 , REQM e do parâmetro de ajuste n para as três temperaturas de secagem dos dados. A igualdade desses parâmetros estatísticos se dá em função de que o ajuste proposto por Overhults é uma modificação muito simples do modelo de Page, sendo $k_P = k_O^n$ (BUZRUL, 2022).

O traçado dos modelos empíricos e semi-empíricos com os dados da cinética de secagem em camada fina nas temperaturas de 40, 50 e 60°C são apresentados na Figura 4.4.

Figura 4.4: Umidade adimensional em função do tempo, predita pelos modelos empíricos e semi-empíricos aos dados médios de secagem em camada fina, para a velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹. a) Modelo de Lewis, b) Modelo de Page, c) Modelo de Overhults, d) Modelo de Henderson e Pabis



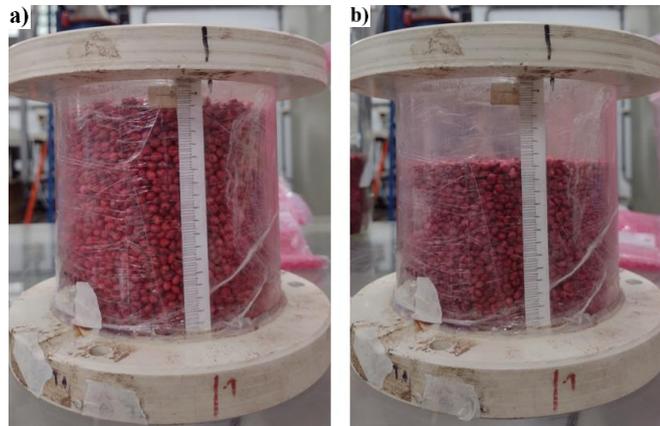
Fonte: elaborado pelo autor.

4.5 Secagem de sorgo em camada espessa

Neste item são apresentados os resultados experimentais da secagem dos grãos de sorgo com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, abrangendo o comportamento térmico e da umidade do leito durante o processo.

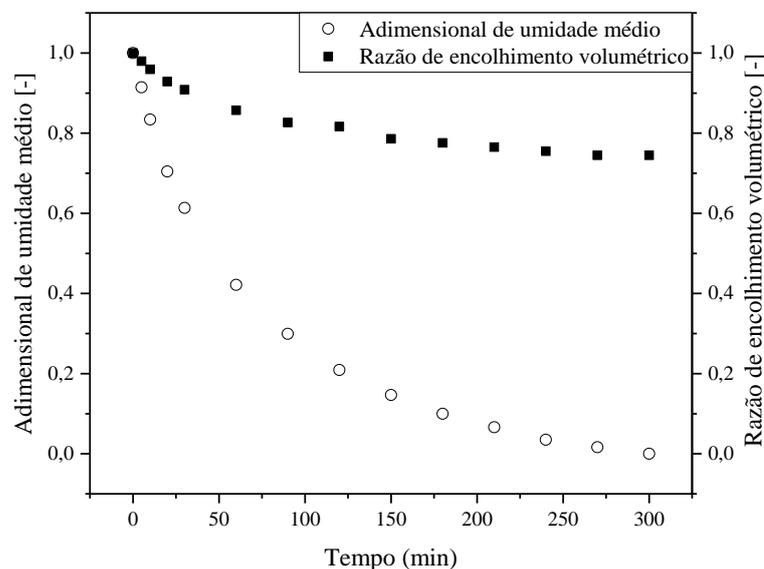
Destaca-se que, em todos os experimentos em camada espessa, ocorreu o encolhimento do leito de grãos. Para a secagem a 50°C sem reversão do escoamento e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹, o leito fixo formado pelos grãos de sorgo encolheu da altura de 9,8 cm no início da secagem até atingir a altura de 7,3 cm e estabilizar aos 300 minutos, conforme se pode observar pelas imagens na Figura 4.5 e pelo gráfico na Figura 4.6.

Figura 4.5: Leito fixo espesso de grãos de sorgo a) antes e b) depois da secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.6: Adimensional de umidade médio e razão de encolhimento volumétrico em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.1, pode-se observar que o volume do grão com umidade 0,15 b.s. é 15% menor que o volume do grão com umidade 0,43 b.s. No experimento de secagem em camada espessa, partindo da umidade inicial dos grãos 0,43 b.s., foi observado que houve uma diminuição de 23% no volume total do leito quando a umidade média dos grãos atingiu 0,15 b.s. Assim, é possível constatar que, com o fenômeno de encolhimento na secagem, não somente os grãos diminuíram de tamanho, como também foi alterada a acomodação dos grãos de sorgo no leito fixo, diminuindo também o volume de vazios.

É importante destacar, ainda, que o encolhimento do leito fez com que, tanto nos experimentos térmicos, como nos experimentos de transferência de massa, as regiões acima de 8 cm ficassem completamente vazias levando à interrupção das medições de temperatura e de umidade da fase sólida nessas regiões em determinado instante durante a secagem.

4.5.1 Transferência de calor na secagem de sorgo em camada espessa com escoamento do ar ascendente

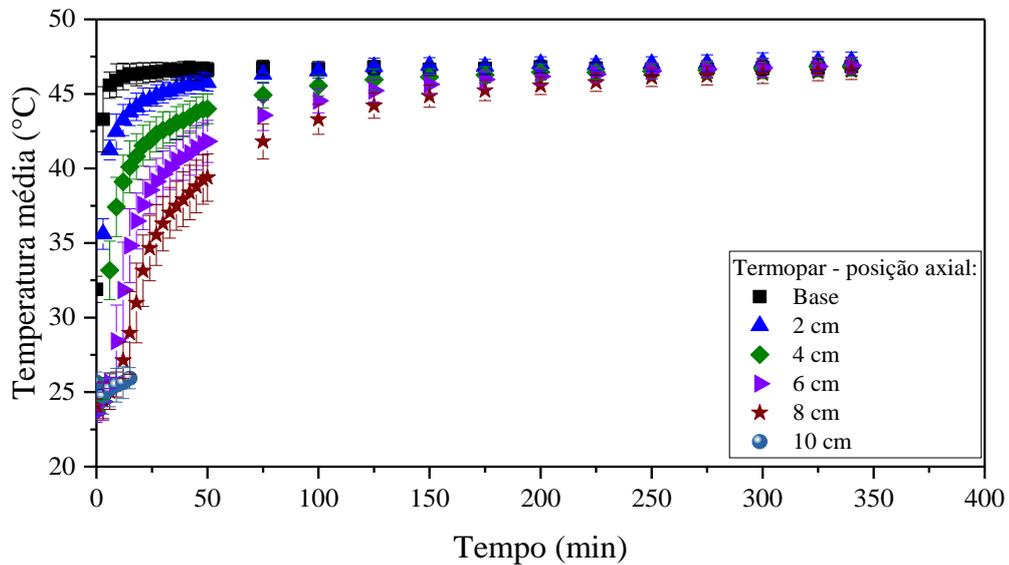
Nas Figuras 4.7 e 4.8, são apresentados os gráficos de temperatura média dos grãos de sorgo no leito em diferentes posições axiais durante o processo de secagem com escoamento do ar ascendente a $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e temperaturas de operação de 50 e 60°C respectivamente.

Foram realizadas réplicas em triplicata para o experimento a 50°C e pôde-se constatar boa reprodutibilidade dos resultados pelos baixos desvios representados no gráfico da Figura 4.7. Verifica-se ainda, pelas Figuras 4.7 e 4.8, que houve uma descontinuidade das medições de temperatura acima de 8 cm. Isto ocorreu porque o leito de grãos foi encolhendo com o passar do tempo até chegar num momento em que não havia mais grãos localizados naquelas regiões dos quais aferir a temperatura.

Pode-se verificar que, para ambos os casos (Figuras 4.7 e 4.8), as posições inferiores foram aquecidas mais rapidamente do que as posições posteriores, como era de se esperar, uma vez que o ar de secagem entra em contato com o meio poroso partir da base do leito, formando assim um gradiente de temperatura ao longo da posição axial. À medida que o tempo passa, a temperatura média em cada posição vai se elevando até atingir o estado estacionário no tempo de 250 min para o experimento a 50°C e no tempo de 200 min para o experimento a 60°C. Este é um comportamento térmico típico para a secagem de material particulado em leito fixo com escoamento de ar unidirecional, conforme se vê nos trabalhos de Genaro (2021) e de Perazzini

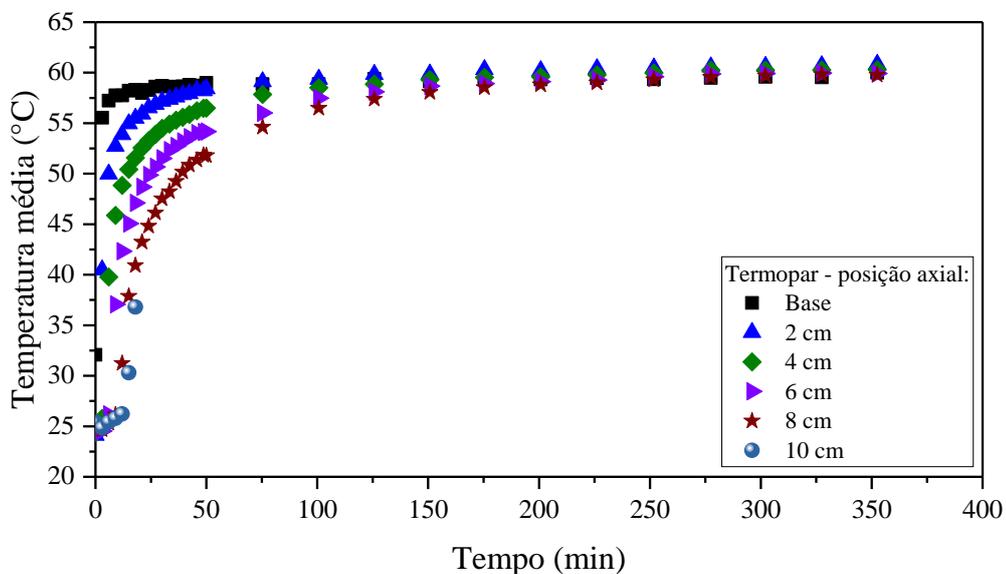
(2014), para a secagem de alumina, de Albini (2019), que realizou a secagem de grãos de cevada, de Altino (2019), para a secagem de soja, lentilha, aveia, cevada e alumina e de Souza *et al.* (2015), que promoveram a secagem de grãos de soja.

Figura 4.7: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de sorgo ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.8: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de sorgo ($T = 60^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: elaborado pelo autor.

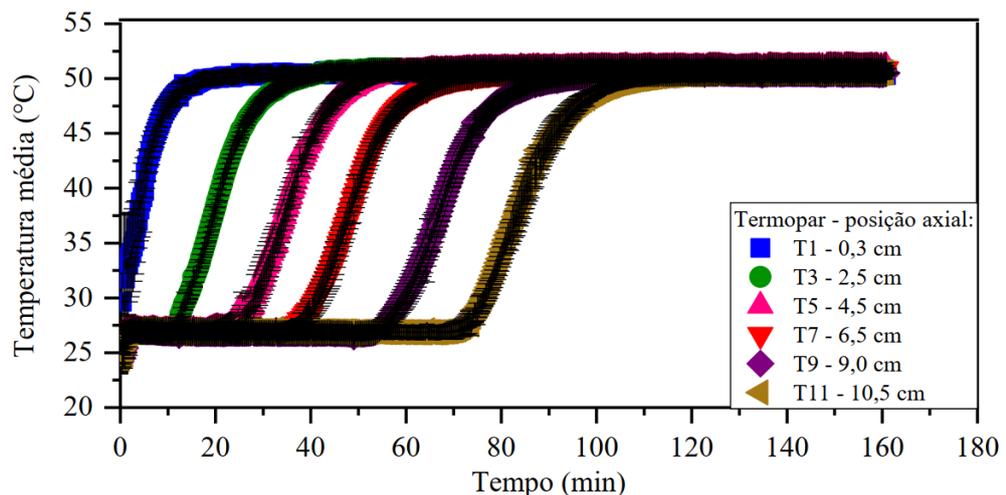
Pode-se observar, ainda, que, para a temperatura de operação de 50°C estabelecida no controlador, a taxa de calor fornecido não foi suficiente para que o ar de secagem se mantivesse

com 50°C ao chegar na base do leito, alcançando o estado estacionário entre 47 e 48 °C. Já para a temperatura de 60°C, o calor fornecido pelo aquecedor foi suficiente para fazer com que a base do leito alcançasse rapidamente esta temperatura. Comparando visualmente as Figuras 4.7 e 4.8, nota-se que as curvas de aumento de temperatura média nas diferentes posições axiais do leito para a temperatura de operação de 60°C ficaram mais próximas entre si, isto é, com menor gradiente, do que no caso com temperatura de operação de 50°C. Com maior fornecimento de calor, é esperado que haja mais calor sensível disponível, elevando mais rapidamente as temperaturas médias para o estado estacionário, diminuindo o gradiente axial de temperatura.

Desde o início da secagem e ao longo de todo o leito, o calor fornecido pelo ar aquecido é utilizado não somente para promover a remoção de umidade das partículas, mas também para elevar a temperatura do meio poroso, diferente do que acontece, por exemplo, com o calor fornecido na secagem de alumina no trabalho de Genaro (2021), em que as temperaturas médias de cada posição atingem, no início do processo, um primeiro estágio e se mantêm constantes por um certo tempo, em seguida, aumentam gradativamente até atingir um segundo estágio referente ao estado estacionário.

O fenômeno referido acima, que foi constatado por Genaro (2021) na secagem de alumina, pode ser observado na Figura 4.9, em que é apresentado um exemplo do comportamento da temperatura média do meio poroso em diferentes posições no leito para a secagem de alumina saturada com escoamento do ar ascendente. O experimento foi realizado a $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidade do ar no mesmo equipamento em que foram feitos os experimentos de secagem de sorgo, porém com a velocidade de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 4.9: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de esferas de alumina ($T = 50^\circ\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)



Fonte: Genaro (2021).

Conforme a análise da autora, assim que se inicia o processo de secagem, o calor cedido pelo ar é utilizado na forma sensível para elevar a temperatura do meio a um patamar no qual é utilizado na forma latente para remover a umidade fracamente ligada na estrutura da alumina. O que ocorre é que, para um material inorgânico como a alumina, há uma etapa inicial em que o calor fornecido na secagem é utilizado para evaporar a grande quantidade de umidade livre na superfície, ou seja, nesta fase o processo é controlado pela convecção, e a temperatura se mantém constante. Depois que a umidade fracamente ligada é removida, o calor é utilizado tanto para aquecer o material como para promover o movimento da umidade do interior para a superfície das partículas, ou seja, nesta etapa o processo é controlado pela difusão. Por fim, após a estrutura do material entrar em equilíbrio higroscópico com o ar nas condições de operação, isto é, quando a pressão de vapor no interior das partículas se iguala à pressão parcial do vapor no ar aquecido, o processo alcança o estado estacionário.

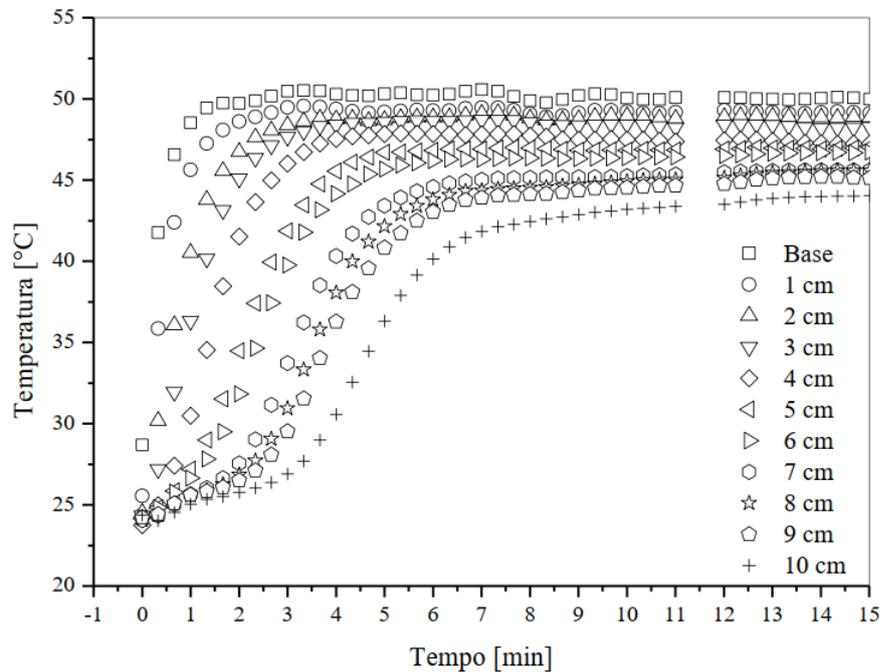
Observa-se, ainda, que o tempo necessário para ser atingido o estado estacionário no experimento com esferas de alumina ($D_p = 3,2 \pm 0,2$ mm) a 50°C e escoamento de ar a $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ foi de aproximadamente 120 minutos, enquanto o experimento com grãos de sorgo a 50°C e escoamento de ar a $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ levou em torno de 250 minutos para atingir o estado estacionário. Esse tempo maior se deve ao fato de a secagem dos grãos de sorgo ser controlada inteiramente pela difusão, que tende a ser uma etapa mais lenta do que a etapa controlada por convecção (FOUST et al., 1982; ALTINO, 2019).

Na Figura 4.10, do trabalho de Albini (2019), cujos experimentos em camada espessa foram realizados no mesmo equipamento que o trabalho de Genaro (2021) e que o presente trabalho, observa-se que o perfil de temperaturas na secagem de grãos de cevada ($D_p = 3,65$ mm) em leito fixo sem reversão a 50°C e velocidade do ar de $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ foi semelhante ao perfil na secagem de sorgo em condições semelhantes, porém com velocidade do ar de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4.7), ambos os processos tendo sido inteiramente controlados pelo mecanismo difusivo de transferência de massa. No entanto, diferentemente do processo com sorgo, em que as temperaturas alcançaram o estado estacionário em 250 minutos, o estado estacionário das temperaturas médias foi alcançado em 13 minutos na secagem de cevada.

A diferença de tempo para se alcançar o estado estacionário entre a secagem de sorgo e a secagem de cevada, pode ser explicada pela maior porosidade do leito de cevada, variando entre 0,405 e 0,425 (ALBINI, 2019), enquanto a do leito de sorgo variou entre 0,34 e 0,37. Com maior porosidade do leito, principalmente devido à forma alongada do grão de cevada, há maior

volume de ar aquecido percolando as partículas, fazendo com que as temperaturas aumentem mais rapidamente.

Figura 4.10: Valores médios de temperatura em função do tempo de secagem para diferentes posições axiais do meio poroso de grãos de cevada sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: Albini (2019).

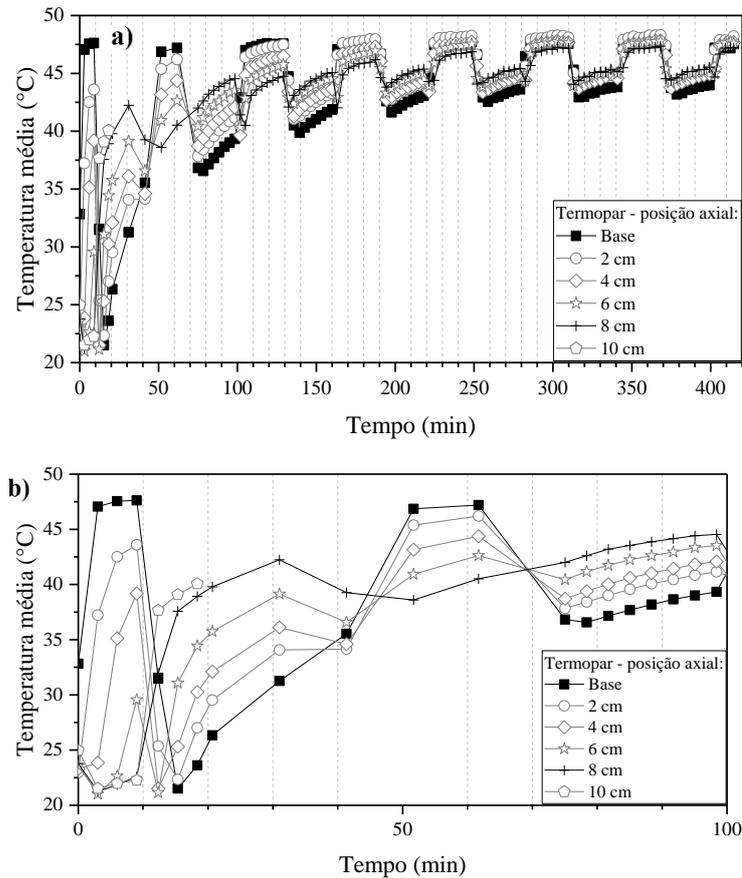
Observa-se também que, na secagem de cevada, permaneceu um maior gradiente de temperaturas ao ser alcançado o estado estacionário (Figura 4.10) comparado ao gradiente de temperaturas na secagem de sorgo (Figura 4.7), isto pode ser explicado pela maior condutividade térmica do sorgo, variando em torno de $0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ na faixa de densidade *bulk* ocorrida (CHANG, 1986), enquanto a condutividade térmica da cevada variou em torno de $0,10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ na faixa de porosidade ocorrida (FELIZARDO, 2018).

4.5.2 Transferência de calor na secagem de sorgo em camada espessa com reversão do sentido do escoamento de ar

Nas Figuras 4.11 e 4.12, são apresentados os gráficos de temperatura média dos grãos de sorgo no leito em diferentes posições axiais durante o processo de secagem com escoamento do ar a $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, com reversão iniciada em $t_0 = 10$ minutos, revertida periodicamente a cada $\Delta t = 30$ minutos e temperaturas de operação de 50 e 60°C respectivamente.

Figura 4.11: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).

a) Tempo total de experimento; b) Ampliação dos 100 primeiros minutos.



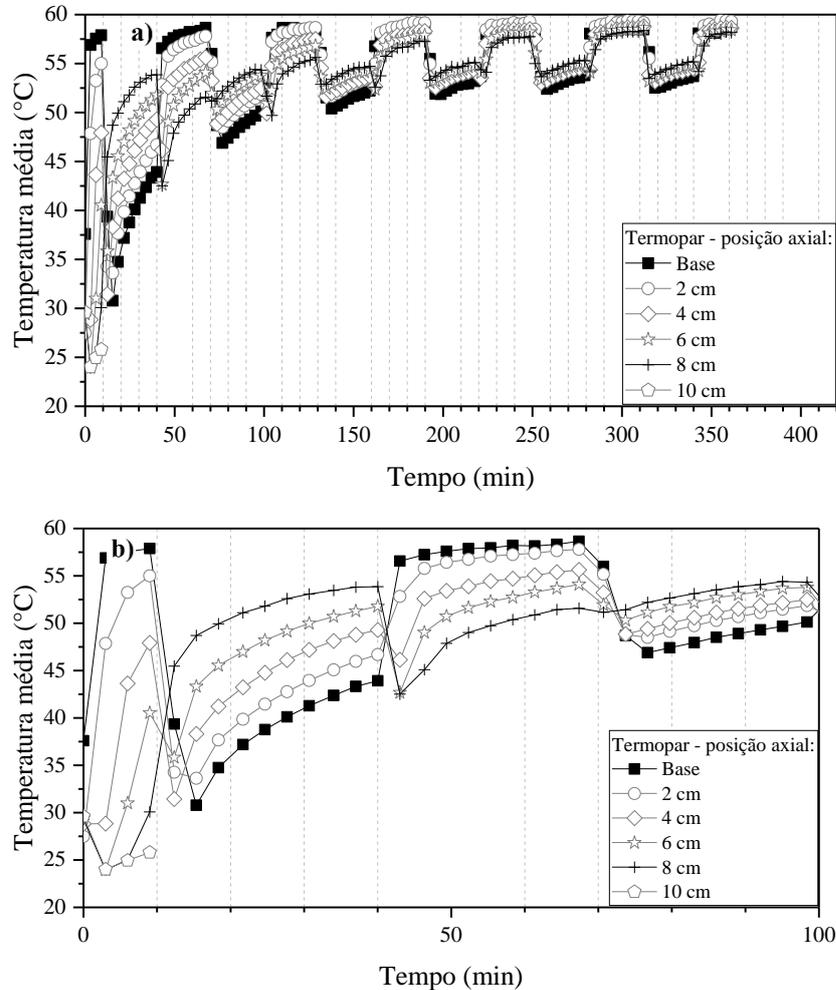
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar, pelos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12, que há uma rápida elevação da temperatura média ao longo das posições axiais, sendo mais rápida a elevação da temperatura da base, que é por onde entrava o ar aquecido no início do experimento. Vale ressaltar, pelas Figuras 4.11b e 4.12b, que, a partir dos 20 minutos de experimento, no caso da secagem a 50°C (Figura 4.11b), como a partir dos 10 minutos (Figura 4.12b), no caso da secagem a 60°C , as medidas de temperaturas das posições acima de 8 cm foram interrompidas, pois ocorreu o fenômeno de encolhimento do leito, e já não se media a temperatura da mistura grãos mais ar de secagem, mas somente a temperatura do ar de secagem. À parte isso, observa-se novamente, como nos casos da seção 4.4.1, a formação de um gradiente das temperaturas médias ao longo das posições axiais até que, aos 10 minutos, ocorre a primeira reversão em que o escoamento de ar aquecido é interrompido e o ar passa a escoar em sentido descendente. A partir deste instante, a temperatura média do topo do leito passa a se elevar além das demais temperaturas,

ocorrendo uma reversão no gradiente, com as posições mais próximas do topo sendo as de maiores temperaturas, e as mais próximas da base, as posições de menores temperaturas.

Figura 4.12: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 60^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).

a) Tempo total de experimento; b) Ampliação dos 100 primeiros minutos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passados 30 minutos da primeira reversão, ocorre a reversão seguinte, com o ar escoando mais uma vez no sentido ascendente, da base para o topo, invertendo, mais uma vez, o gradiente de temperaturas, e assim seguem as reversões a cada $\Delta t = 30$ minutos. Nestes experimentos, é interessante notar que permanece uma tendência de elevação gradual da média global das temperaturas de todas as posições axiais, mesmo com as reversões. Isto ocorre porque o ar que está passando em sentidos alternados ainda não entrou em equilíbrio higroscópico com os grãos úmidos. Este equilíbrio, que é dinâmico, só é alcançado a partir dos 310 minutos, para o experimento a 50°C , e a partir dos 250 minutos para o experimento a 60°C .

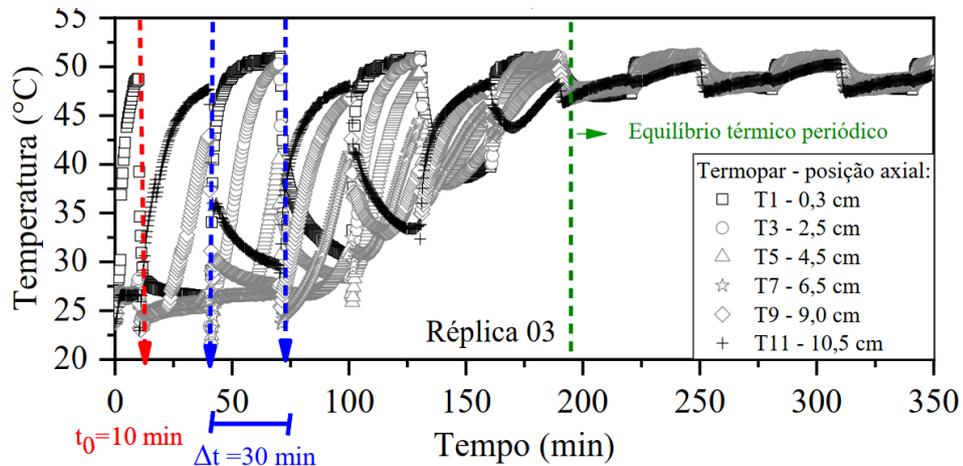
Além disso, verifica-se também que, quando o escoamento de ar é direcionado no sentido descendente, como nos intervalos 10-40 min e 70-100 min, ocorre, além da reversão do gradiente de temperaturas, também uma abrupta desaceleração da elevação global das temperaturas. Algumas posições sofrem uma queda de temperatura mais drástica antes de voltar à subida gradual, como é o caso da temperatura de base no instante de 70 minutos na Figura 4.12b, e outras posições pouco sofrem o efeito desta reversão para o sentido descendente, como é o caso da posição 8 cm no instante de 70 minutos na Figura 4.12b, cuja temperatura segue a sua tendência gradual de elevação. Isto se explica pelo fato de que, quando o escoamento é revertido para o sentido descendente, o ar aquecido faz um percurso 0,8 m mais longo na tubulação para atingir o meio poroso do que quando está escoando em sentido ascendente. Apesar de o equipamento estar termicamente isolado, há uma perda de calor considerável neste maior percurso, fazendo com que uma menor quantidade de calor seja transportada para o leito. A região do topo parece não sofrer alteração abrupta de temperatura porque anteriormente já estava recebendo menor quantidade de calor com o escoamento ascendente, e, no sentido descendente, é a região que primeiro entra em contato com o ar aquecido, porém com uma menor quantidade de calor devida ao maior percurso feito pelo ar. A região da base sofre uma queda drástica de temperatura porque, anteriormente, no escoamento ascendente, além de ser a primeira região do meio poroso a entrar em contato com o ar, o percurso do escoamento ascendente era menor, já no escoamento descendente, além do maior percurso do escoamento, o ar aquecido já terá cedido grande quantidade de calor para as regiões superiores.

Com as observações feitas no parágrafo anterior, pode-se perceber que a região inferior do leito passa por oscilações maiores de temperatura, e a região superior tem oscilações menos acentuadas.

Observando os resultados de temperatura obtidos por Genaro (2021) na Figura 4.13, com condições de operação semelhantes às do experimento com grãos de sorgo a 50°C, pode-se ver oscilações muito maiores do que no caso da secagem de sorgo. Conforme observado na seção 4.4.1, o meio poroso formado por esferas de alumina tende a utilizar o calor fornecido pelo ar quente primeiramente para remover o conteúdo de umidade fracamente ligada à estrutura da alumina, para em seguida começar também a elevação de temperatura. Quanto mais distante da entrada do ar aquecido, mais a temperatura demora a ser elevada, pois o ar passa por essas regiões estando com a temperatura mais próxima da temperatura do meio, ficando com menor motricidade para transferir calor para as partículas. Quando ocorre a reversão, o calor é

cedido pelo ar em maior quantidade nas regiões superiores, invertendo o gradiente de temperatura nas posições axiais.

Figura 4.13: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de esferas de alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^\circ\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).

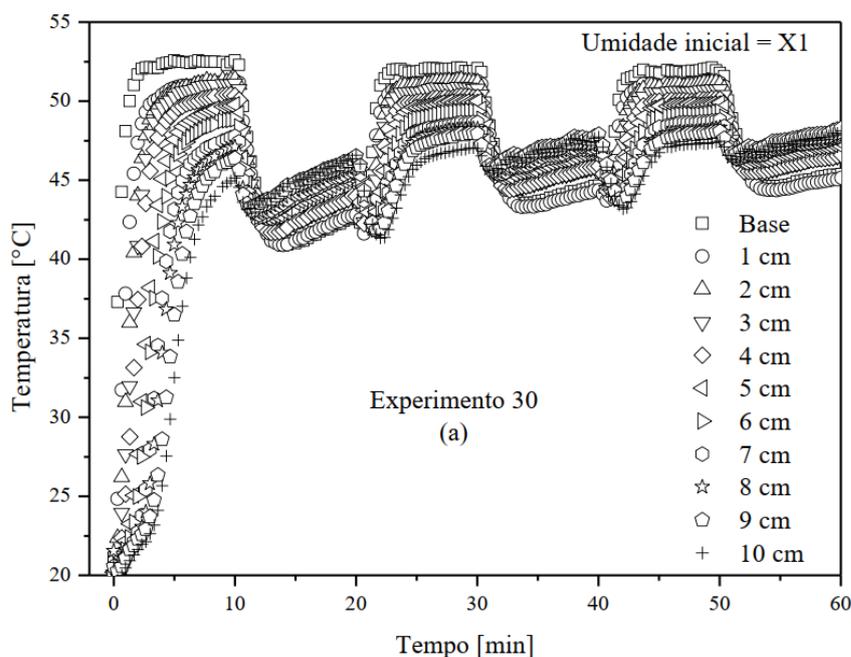


Fonte: Genaro (2021).

É importante notar que, devido à presença de grande quantidade de umidade fracamente ligada (quando se compara com partículas orgânicas), - o que implica também numa facilidade de adsorver umidade - as temperaturas das partículas de alumina têm uma amplitude de oscilação muito maior, pois, com o eventual fenômeno de reumidificação das partículas que haviam sido secadas quando o escoamento estava no sentido contrário, elas passam a utilizar o calor mais na forma latente do que para manter a elevação de temperatura que havia sido alcançada antes. Na secagem com grãos de sorgo, a reversão não chega a provocar esse efeito de maneira significativa, pois, uma vez que, por exemplo, os grãos localizados na região inferior do leito são aquecidos, eles tendem a recuperar mais facilmente a elevação do nível de temperatura quando ocorre a reversão. O fato de a secagem ser controlada pela difusão faz com que seja mais difícil os grãos serem reumidificados, permitindo que a maior parte do calor recebido seja utilizada na forma sensível.

Os fenômenos observados na secagem de sorgo com reversão do escoamento também podem ser constatados na secagem de grãos de cevada realizada por Albini (2019) na mesma temperatura, 50°C , porém com velocidade do ar de $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e período entre reversões de $\Delta t = 10$ minutos, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.14: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de cevada com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 10 \text{ min}$).



Fonte: Albini (2019).

Segundo a autora, o período entre reversões foi estabelecido como sendo a cada 10 minutos porque, em experimentos realizados previamente em camada espessa sem reversão do escoamento, o equilíbrio térmico foi alcançado em 10 minutos de secagem, conforme se pode ver na Figura 4.10. Mais uma vez se observa que, na secagem em camada espessa de diferentes partículas orgânicas, o comportamento das temperaturas médias nas diferentes posições axiais se mantém semelhante. Pôde-se ver, pela Figura 4.14, que, desde o início da secagem, o calor é fornecido para o meio poroso e é utilizado na forma sensível elevando a temperatura das partículas de todas as regiões do leito. Alcançado o estado de equilíbrio dinâmico aos 10 minutos, também se verifica um nível de temperaturas mais baixas nos intervalos em que o escoamento ocorre no sentido descendente, devido ao maior percurso executado pelo ar de secagem nesse sentido.

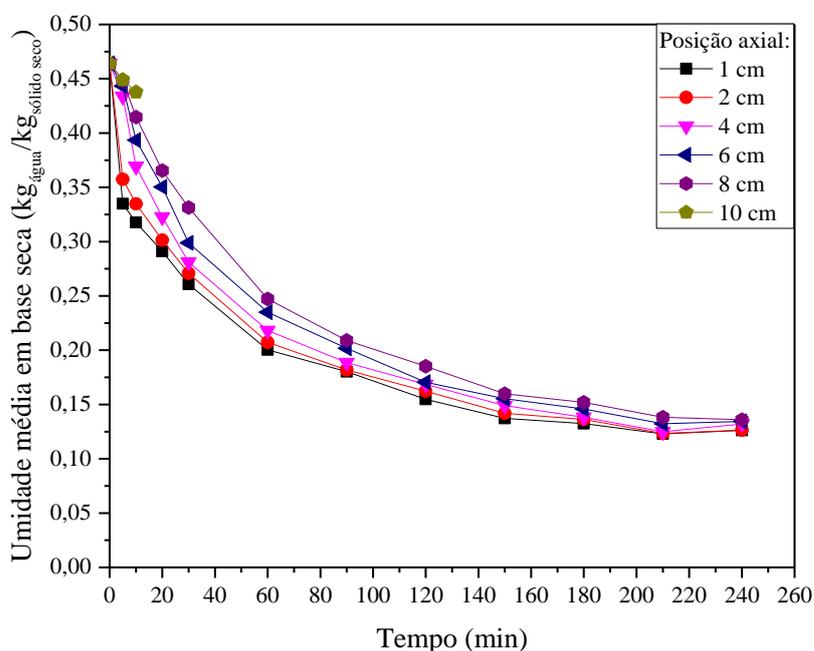
A esfericidade do grão de cevada utilizado por Albini (2019) variou entre 0,74 e 0,76, e o volume variou entre $80,0 \text{ mm}^3$ e $95,4 \text{ mm}^3$. A esfericidade do grão de sorgo utilizado no presente trabalho foi de 0,86, e o volume variou entre $18,6$ e $22,0 \text{ mm}^3$. Pode-se afirmar que, além das diferentes condições operacionais estabelecidas (velocidade do ar e período entre reversões), esta diferença na forma e tamanho dos dois grãos é um fator determinante para a diversidade do comportamento das temperaturas médias ao longo das posições axiais na

secagem. Com partículas de maior tamanho, há mais gradientes intrapartícula, proporcionando também um maior gradiente por todo o leito (LERMAN; WENBERG, 2011), além disso, leito de partículas de maior tamanho tende a formar regiões de maior porosidade próximo às paredes contribuindo para maiores gradientes (SKARBALIUS et al., 2021), também o formato alongado do grão de cevada contribui para este fator.

4.5.3 Transferência de massa na secagem de sorgo em camada espessa

Na Figura 4.15, é apresentado o comportamento das umidades médias em base seca dos grãos de sorgo nas diferentes posições axiais do leito fixo durante a secagem com escoamento ascendente de ar aquecido a 50°C com velocidade de $2,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 4.15: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de sorgo sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 4.15, pode-se observar que, à medida que o processo de secagem avança, as umidades médias em todas as posições axiais do leito vão decrescendo até atingir o estado estacionário em 210 minutos com umidade média global de 0,13 b.s. As regiões mais próximas da entrada de ar ficaram com os menores valores de umidade média e as regiões mais afastadas, com os maiores. Isto ocorre porque, quando o ar aquecido entra em contato com a base do leito, há a máxima força motriz para o transporte de massa da fase mais concentrada, que é o sólido

úmido, para a fase menos concentrada, que é o ar de secagem. À medida que o ar escoia ao longo do leito, ele vai ficando mais úmido e com menor temperatura, diminuindo assim a sua capacidade de secagem para as regiões mais afastadas da entrada de ar. Pode-se destacar, por exemplo, que a região localizada entre a base e 1 cm do leito possui umidade média de 0,33 b.s. já em 5 minutos de secagem; este mesmo valor só foi atingido pela região entre 8 e 9 cm em 30 minutos de secagem.

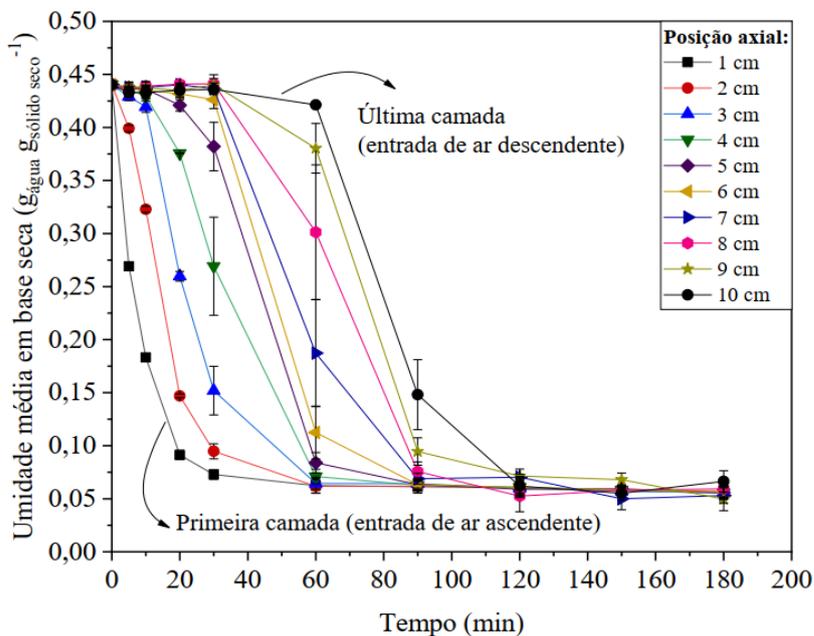
É de se destacar que a queda das umidades médias aconteceram mais rapidamente no início da secagem e foi desacelerando com o passar do tempo. Isto ocorre porque, numa primeira fase, o grão está com maior conteúdo de umidade distribuída pelos poros, havendo mais umidade disponível para se difundir até a superfície do sólido. Com o passar do tempo, o grão vai ficando mais seco, sendo necessário um maior percurso da difusão de umidade do interior do grão até a superfície, desacelerando a secagem, até atingir a umidade de equilíbrio dinâmico com o ar que escoia.

Nota-se, ainda, que as umidades médias em todas as posições no tempo inicial foram iguais, depois formaram um gradiente acentuado nos primeiros 30 minutos e, em seguida, seus valores voltaram a se aproximar, reduzindo o gradiente que foi formado no início do processo. Isto é explicado pela formação e avanço da frente de secagem, que é a região no leito onde efetivamente ocorre o transporte de massa da fase sólida para a fase fluida. Como a secagem dos grãos de sorgo é controlada pela difusão durante todo o tempo, o ar não recebe umidade suficiente para ficar saturado, como é comum acontecer com a secagem controlada por convecção. Com o ar permanecendo insaturado, a frente de secagem se estende por todo o leito até atingir o estado estacionário, diferente do que acontece, por exemplo, com a secagem de alumina, conforme se vê na Figura 4.16, do trabalho de Genaro (2021), que mostra o comportamento das umidades médias ao longo das posições axiais em condições de operação semelhantes às da secagem de sorgo representada pela Figura 4.15.

Para o caso da alumina (GENARO, 2021), dados reproduzidos na Figura 4.16, nota-se que, nos primeiros 60 minutos de secagem, as umidades médias das camadas mais distantes da entrada de ar aquecido diminuem muito pouco e chegam mesmo a aumentar, indicando o fenômeno de reumidificação, que ocorre quando o ar de secagem fica saturado e acaba cedendo umidade para as partículas. Observa-se que a frente de secagem se move lentamente nos primeiros 60 minutos, daí em diante, move-se rápida até atingir o estado estacionário. Isto é um indicativo de que, nos 60 primeiros minutos, a secagem é controlada pela convecção, com uma

grande quantidade de umidade livre permeando as partículas; depois desse tempo, a secagem passa a ser controlada pela difusão, com a umidade tendo maior resistência para ser transportada à fase fluida, até atingir o estado estacionário em 120 minutos.

Figura 4.16: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de esferas de alumina sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50\text{ °C}$; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

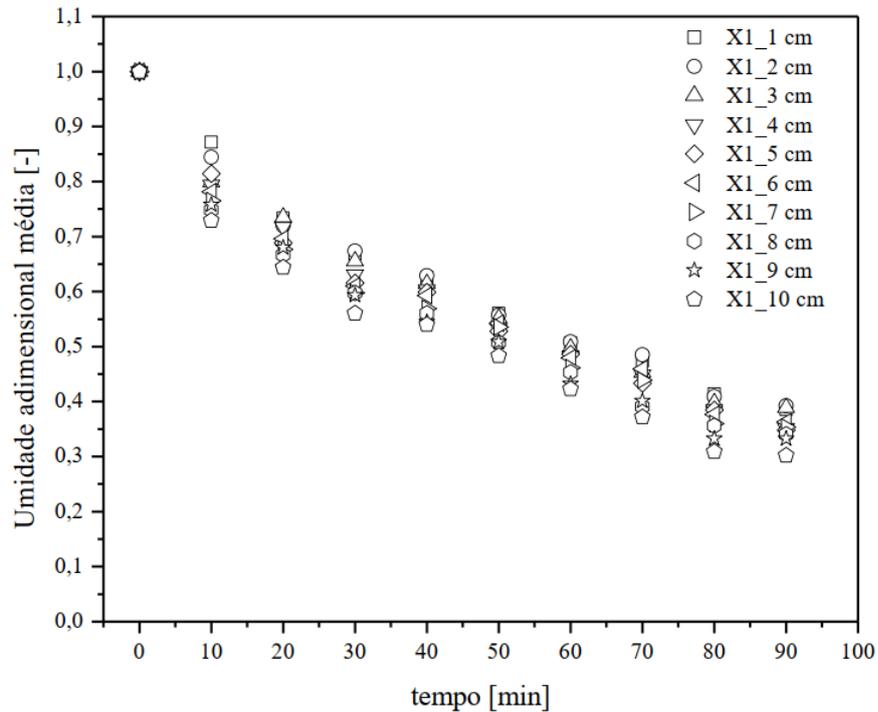


Fonte: Genaro (2021).

Ainda atentando para a Figura 4.15, na secagem de grãos de sorgo, pode-se observar que não ocorreu reumidificação em nenhum instante para os dados aferidos, e isto se explica pela grande região que a frente de secagem ocupa no leito até o topo. Destaca-se também a descontinuidade das medições de umidade acima de 8 cm a partir dos 60 minutos. Isto ocorreu porque o leito de grãos foi encolhendo com o passar do tempo e não havia mais grãos localizados naquelas regiões dos quais aferir a umidade média associada.

Comparando os resultados de umidade obtidos da secagem de sorgo em camada espessa sem reversão do escoamento de ar a 50 °C e velocidade do ar de $2,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4.15) com os resultados obtidos por Albini (2019) em condições semelhantes, porém com velocidade do ar de $4,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4.17), constata-se perfis de umidade semelhantes, somente apresentando períodos de taxa de secagem decrescente, o que é próprio da secagem de grãos. Observa-se um comportamento mais próximo da linearidade no gráfico de secagem de cevada (Figura 4.17), possivelmente porque o experimento de transferência de massa realizado não chegou até a umidade de equilíbrio dinâmico para as condições de operação estabelecida, que seria quando a umidade adimensional chega no valor zero.

Figura 4.17: Umidade adimensional média em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de cevada sem reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 4,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



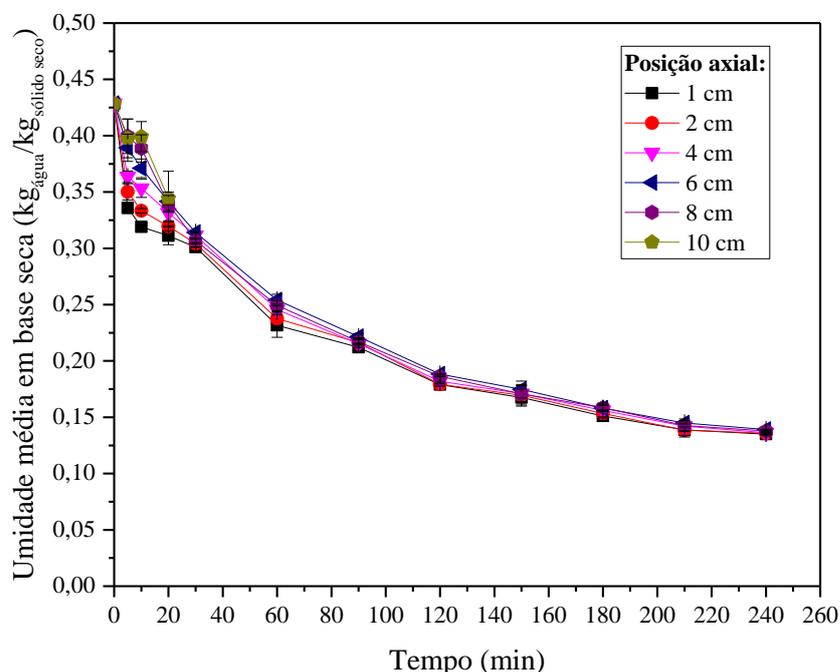
Fonte: Albini (2019).

Na Figura 4.18, pode-se observar o comportamento das umidades médias dos grãos de sorgo ao longo das posições axiais do leito fixo para a secagem com reversão do escoamento de ar a 50°C . O experimento foi realizado em duplicata, e os baixos desvios representados na figura indicam boa reprodutibilidade.

Pode-se verificar que, comparado com o gráfico da Figura 4.15, o gráfico da Figura 4.18 apresenta uma diminuição muito significativa dos gradientes de umidade média ao longo das posições axiais do meio poroso formado por grãos de sorgo, dadas as mesmas condições de operação, porém com reversão do escoamento de ar. Isto ocorre porque a aplicação da reversão faz com que a frente de secagem se distribua de maneira mais uniforme ao longo do leito, com o ar escoando mais distante da saturação a cada reversão realizada. Além disso, vê-se na Figura 4.18 uma queda mais acentuada nos primeiros 60 minutos do que no restante do tempo de experimento. Após esse tempo, verifica-se uma diminuição mais lenta da umidade média global e com tendências de aceleração e desaceleração, o que se nota pelas pequenas mudanças de concavidade das curvas nos minutos 60, 120 e 180. Isto se explica pela reversão do escoamento de ar, que passa a ficar em sentido descendente nos intervalos de 70 a 100 minutos e de 130 a 160 minutos, fazendo com que uma menor quantidade de energia seja transportada devido ao maior percurso do ar na tubulação. Finalmente, a secagem foi concluída aos 240 minutos, com

uma umidade média global no estado de equilíbrio dinâmico com o ar de 0,13 b.s., o mesmo valor final para a secagem sem reversão ilustrada pelo gráfico da Figura 4.15.

Figura 4.18: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de sorgo com a reversão do sentido do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).



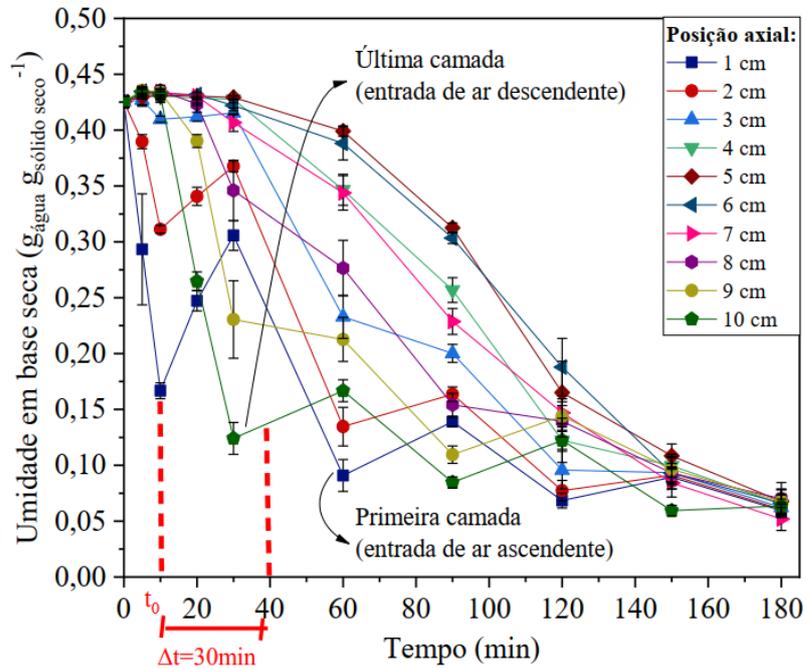
Fonte: elaborado pelo autor.

Para efeito de análise, na Figura 4.19, é apresentado o comportamento das umidades médias das diferentes posições axiais do leito com esferas de alumina (GENARO, 2021) durante a secagem com reversão do escoamento, com condições de operação semelhantes às estabelecidas para a secagem com grãos de sorgo ilustrada no gráfico da Figura 4.18.

Conforme se verifica na Figura 4.19, a secagem de esferas de alumina no leito fixo com reversão do escoamento de ar (GENARO, 2021), nos primeiros minutos, passa por uma diminuição de umidade nas regiões próximas à base do leito, por onde o ar aquecido entra no início de experimento e, após a primeira reversão, já se verifica o fenômeno de reumidificação dessas regiões. Uma vez que grande parte da umidade contida na alumina se encontra fracamente ligada, o ar que escoava em sentido ascendente remove rapidamente este excesso já no início da secagem, deixando os sólidos que foram secados na região inferior com umidades abaixo do valor correspondente ao equilíbrio dinâmico com o ar que, num segundo momento, escoando no sentido descendente, passa por essa mesma região após absorver uma grande quantidade de umidade das regiões superiores. O ar saturado, entrando em contato com a alumina com umidade abaixo do valor de equilíbrio dinâmico, acaba transferindo umidade para

a alumina. De modo análogo, o mesmo fenômeno ocorre com as esferas de alumina localizadas na região superior do leito, quando o escoamento volta a ocorrer no sentido ascendente.

Figura 4.19: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais do leito de esferas de alumina com a reversão do sentido do ar ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10\text{ min}$; $\Delta t = 30\text{ min}$).



O fenômeno de reumidificação descrito acima não foi verificado para a secagem de grãos de sorgo porque a umidade contida nos grãos está fortemente ligada, de maneira que o calor fornecido pelo ar que passa pelos grãos é utilizado mais para elevar a temperatura do que para promover a transferência de massa.

Por fim, vale destacar que os experimentos de secagem da alumina ilustrados nas Figuras 4.16 e 4.19 levaram as partículas a umidades médias totais de equilíbrio dinâmico significativamente menores que as umidades médias totais de equilíbrio dinâmico das partículas nos experimentos de secagem dos grãos de sorgo ilustrados nas Figuras 4.15 e 4.18. Também se destaca que o tempo de secagem da alumina (GENARO, 2021) foi menor, tanto no experimento sem reversão, como no experimento com reversão. Isto se explica pelo fato de haver um período bastante significativo da secagem de alumina controlada pela convecção, enquanto na secagem de sorgo o processo é predominantemente difusivo.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados da caracterização dos grãos de sorgo, pôde-se constatar a estabilidade da forma dos grãos em diferentes umidades, isto sendo evidenciado pela não alteração da esfericidade média das partículas em diferentes umidades. Também foi verificado que o aumento da umidade levou ao aumento da densidade aparente dos grãos, podendo-se atribuir a isto o aumento de massa da partícula sendo mais efetivo que o seu entumescimento. Já para a massa específica real, foi observada uma diminuição pouco significativa.

Com a instalação de sensores que medem a umidade relativa do ar nas extremidades das células de secagem, foi possível observar que os resultados obtidos foram coerentes com a dinâmica da transferência de calor e massa entre a fase sólida e a fase fluida para um experimento de secagem em camada espessa sem reversão. A instalação desses sensores representa uma melhoria no equipamento já existente, possibilitando mais disponibilidades de dados para futuros trabalhos com modelagem matemática da secagem.

Os resultados para os três experimentos cinéticos a 40°C, 50°C e 60°C em camada fina no leito fixo mostraram que a secagem dos grãos de sorgo na velocidade de 2,1 m·s⁻¹ ocorre mais rapidamente, como esperado, em temperaturas mais altas devido à quebra mais rápida das ligações das moléculas de água com a estrutura interna do meio poroso. Verificou-se também que a secagem possui duas fases de taxa decrescente até atingir a umidade de equilíbrio dinâmico para as três respectivas temperaturas.

Verificou-se que os melhores modelos para ajuste de dados de cinética de secagem de sorgo em camada fina nas três temperaturas propostas foram o de Page e o de Overhults (Page Modificado).

Os resultados experimentais obtidos na secagem de sorgo em camada espessa sem reversão do sentido do escoamento de ar mostraram um comportamento térmico bem definido, com um aumento de temperatura acelerado no início e, em seguida, continuando a subir cada vez mais lentamente, até que todo o leito alcançasse o equilíbrio térmico, nas secagens a 50 e 60°C. Esta tendência de subida permanente até o fim da secagem é relacionada com o mecanismo difusivo sendo o de maior predominância no transporte de calor e massa do processo. Foi observado ainda o encolhimento do leito de 23% do volume inicial ao longo da secagem, ficando algumas medidas de temperatura descontinuadas nas posições superiores do leito devido à ausência de grãos.

Nos experimentos térmicos com reversão de escoamento do ar, foram verificadas as oscilações de temperatura ao longo de todo o tempo do processo, destacando-se o efeito de diminuição global das temperaturas nas posições axiais com o escoamento em sentido descendente devido ao menor fornecimento de calor provocado pelo percurso mais longo do ar escoando nesse sentido.

Nos experimentos de transferência de massa, nos quais foi utilizada a célula de secagem fracionada, pôde-se verificar que a formação da frente de secagem se deu em todo o leito de grãos de sorgo, não havendo regiões sem ocorrência de secagem. Notou-se a frente de secagem se movendo logo no início da formação dos gradientes de umidade e se estabelecendo durante todo o processo, tanto na secagem sem reversão, como na secagem com reversão. Devido à natureza orgânica dos grãos de sorgo, com estruturas internas que mantêm a umidade fortemente ligada, há mais dificuldade em realizar a secagem, o que foi evidenciado pela comparação com a secagem de alumina realizada por Genaro (2021). Desse modo, não se verificou o fenômeno de reumidificação ao se implementar a reversão do escoamento.

Na comparação da secagem de grãos de sorgo com a secagem dos grãos de cevada realizada por Albini (2019) no mesmo equipamento em camada espessa, ficou patente a semelhança entre os perfis das variáveis de temperatura e também de umidade, uma vez que se trata de materiais orgânicos, nos quais o processo de secagem em leito fixo atua predominantemente pelo mecanismo difusivo. Verificou-se, ainda, que o tamanho, a forma e a estrutura interna do grão de cevada contribuíram para o estabelecimento de maiores gradientes de temperatura quando comparado ao grão de sorgo, que é um grão mais regular, próximo da esfericidade ideal e de volume 4 vezes menor do que o volume do grão de cevada.

Comparando-se diferentes tipos de partículas a serem secas, o estudo realizado contribuiu para demonstrar a diferença entre as dinâmicas de secagem inerentes à estrutura física de cada partícula, levando a observar os mecanismos de transferências predominantes para cada tipo de material; mecanismo difusivo dominando a secagem das partículas orgânicas (grãos de sorgo e de cevada) e mecanismo convectivo muito significativo na secagem de alumina, uma partícula inorgânica.

De um modo geral, foi verificado que a realização da reversão do escoamento de ar foi eficaz para a diminuição dos gradientes de temperatura e de umidade das partículas, o que é o principal objetivo desse procedimento, sendo um artifício vantajoso do ponto de vista de qualidade do produto e economicamente promissor, especialmente na secagem de grãos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo possibilita algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização e melhoria das medições de umidade relativa do ar por meio dos sensores instalados nas extremidades das células de secagem do aparato experimental;
- Desenvolvimento de um algoritmo de solução do modelo de transferência de calor e massa a duas fases da secagem com reversão de escoamento utilizando dados de umidade relativa do ar nas extremidades do leito para atualizar os parâmetros de transferência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. 2015.
- ALBINI, G. **ESTUDO DA SECAGEM DE GRÃOS EM LEITO FIXO, COM E SEM ESCOAMENTO REVERSO DO AR DE SECAGEM**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2019.
- ALONSO, L. F. T.; PARK, K. J. Métodos de seleção de secadores. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 208–216, jun. 2005.
- ALTINO, H. O. N. **SECAGEM EM LEITO FIXO DE MATERIAIS GRANULARES COM DIFERENTES ESFERICIDADES**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.. 2019.
- AOAC (ED.). **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 17. ed. Gaithersburg, Maryland: ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS, 2002.
- BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. [s.l: s.n.].
- BALASUBRAMANIAN, D. PH—Postharvest Technology: Physical Properties of Raw Cashew Nut. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 3, p. 291–297, 1 mar. 2001.
- BERBERT, P. A. et al. Drying of Coffee (*Coffea arabica* L.) in a Fixed Bed with a Simulated Periodic Airflow Reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 59, n. 3, p. 195–202, 1 nov. 1994.
- BRITO, R. C. **ESTUDO ENERGÉTICO DA SECAGEM DE SORGO [*Sorghum bicolor* (L) Moench] EM LEITO DE JORRO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2017.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1 fev. 1938.

BUCKLIN, R. et al. Grain Storage Systems Design. **Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition**, p. 123–175, 1 jan. 2013.

BUZRUL, S. Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. **Processes** **2022**, Vol. 10, Page 118, v. 10, n. 1, p. 118, 7 jan. 2022.

CHAMPION, W. M.; HALSEY, G. D. Physical Adsorption on Uniform Surfaces. **Journal of Physical Chemistry**, v. 57, n. 7, p. 646–648, 1953.

CHANG, C. S. Thermal Conductivity of Wheat, Corn, and Grain Sorghum as Affected by Bulk Density and Moisture Content. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 5, p. 1447–1450, set. 1986.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 424 p.

DAL-BÓ, V. **ESTUDO DA SECAGEM DA POLPA DO ABACATE (*Persea americana*)**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2021.

DEFENDI, R. O. **SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2013.

EMBRAPA. **Sorgo - BRS 330**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/404/sorgo---brs-330>>. Acesso em: 1 mar. 2021.

EMBRAPA. **Armazenamento inadequado de grãos resulta em cerca de 15% de perdas**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3860638/armazenamento-inadequado-de-graos-resulta-em-cerca-de-15-de-perdas>>. Acesso em: 28 out. 2020.

FELIZARDO, M. P. **SECAGEM DE CEVADA: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ANATOMIA E DO MEIO DE TRANSPORTE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2018.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FREIRE, F. B. et al. An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste

drying in spouted bed. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 577–584, 2017.

GENARO, L. B. **Leito Fixo com Reversão do Ar de Secagem: Estudo Experimental e Numérico da Secagem de Alumina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2021.

GENARO, L. B. et al. Solid Drying in a Thick Fixed Bed With Airflow Reversal. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 170, n. October 2021, 2021.

GLUECK, J. A.; ROONEY, L. W. **Chemistry and structure of grain in relation to mold resistance**. International Workshop on Sorghum Diseases, 11-15 Dec 1978. **Anais...Hyderabad, India**. Patancheru, A.P.: India: ICRISAT, 1980.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 7, p. 85–89, 1961.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO - IAP; **Cultura do sorgo**.

JAIN, R. K.; BAL, S. Properties of pearl millet. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, v. 66, n. 2, p. 85–91, 1997.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; RIBEIRO, J. P. Economic viability acquisition of a drying-storing facility, designed for small farms. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 795–803, 2006.

KEEY, R. B. (OXFORD). **Drying - Principles and Practice**. New York: Pergamon Press, 1972.

LANGMUIR, I. THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1 set. 1918.

LERMAN, P.; WENNERBERG, O. Experimental method for designing a biomass bed dryer. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. SUPPL. 1, p. S31–S39, 1 out. 2011.

LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427–432, 1 maio 1921.

MA, E. K.-C. **Morphological and anatomical development of sorghum seed**. [s.l.] Texas Tech University, 1975.

MAPA. PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO Brasil 2019/20 a 2029/30 Projeções de Longo Prazo. **Mapa**, p. 102, 2020.

MASSARANI, G.; SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. (Eds.). . **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: [s.n.].

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. 1. ed. New York: Gordon and Breach, 1986.

MUJUMDAR, A. S. Part I Fundamental Aspects - Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). . **Handbook of Industrial Drying**. 3rd. ed. New York: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2006. p. 23.

NAVARRO, S.; NOYES, R. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

OVERHULTS, D. G. et al. Drying Soybeans With Heated Air. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 1, p. 112–0113, 1973.

PAGE, G. E. **Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layers**. [s.l.] Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1949.

PANIGRAHI, S. S. et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: A review. **Drying Technology**, v. 38, n. 13, p. 1677–1697, 2019.

PARRY, J. L. **Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review** *Journal of Agricultural Engineering Research* Academic Press, , 1 jul. 1985.

PERAZZINI, H. **SECAGEM DE RESÍDUOS CÍTRICOS EM SECADOR ROTATIVO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2011.

PERAZZINI, H. **SECAGEM DE SÓLIDOS POROSOS GRANULARES**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2014.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Chemical engineer's handbook**. 7ª Edição ed. [s.l.] Editora

McGraw-Hill, 1998.

PRADO, M. M. DO; SARTORI, D. J. M. Heat and Mass Transfer in Packed Bed Drying of Shrinking Particles. **Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications**, 2011.

PRADO, M. M. **SECAGEM EM LEITO FIXO DE SEMENTES COM MUCILAGEM**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2004.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, v. 26, n. 3, p. 259–271, 1 jan. 1995.

RIAHI, E.; RAMASWAMY, H. S. Structure and Composition of Cereal Grains and Legumes. In: RAMASWAMY, A. C. et al. (Eds.). . **Handbook of Postharvest Technology**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. p. 1–16.

ROONEY, L. W.; MILLER, F. R. **Variation in the Structure and Kernel Characteristics of Sorghum**. (L. . Rooney, D. S. Murty, Eds.)International Symposium on Sorghum Grain Quality. **Anais...Patancheru - Índia: ICRISAT, 1982. Disponível em: <<http://oar.icrisat.org/789/>>. Acesso em: 9 mar. 2022**

RUAS, D. G.; GARCIA, J. C.; TEIXEIRA, N. M. Origem e importância do sorgo para o Brasil. EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Recomendações para o cultivo do sorgo**. Sete Lagoas: EMBRAPA, 1988. p 7-11 (Circular Técnica, 1).

RUIZ-LÓPEZ, I. I. et al. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 3, p. 310–318, 1 dez. 2008.

SABLANI, S. S.; RAMASWAMY, H. S. Physical and Thermal Properties of Cereal Grains. In: AMALENDU CHAKRAVERTY et al. (Eds.). . **Handbook of Postharvest Technology**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. p. 17–40.

SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—I. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, n. 1, p. 12–16, 1 jan. 1929.

SILVA, J. DE S. E; AFONSO, A. A. L.; DONZELLES, S. M. L. SECAGEM E SECADORES. In: SILVA, J. DE S. E (Ed.). . **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2ª edição ed. Viçosa - MG: ISSUU, 2012. p. 107–138.

SKARBALIUS, G. et al. Iterative method for fast estimation of convective drying characteristics of biomass. **Applied Physics - Cornell University**, v. 1, p. 35, 26 maio 2021.

SOUZA, G. F. M. V. et al. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 38–44, 2015.

STROSHINE, R. **Physical properties of agricultural materials and food products**. West Lafayette, IN: Copy Cat, 1998.

VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. WATER ACTIVITY AND ITS ESTIMATION IN FOOD SYSTEMS: THEORETICAL ASPECTS. **Water Activity: Influences on Food Quality**, p. 1–61, 1981.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2012.

WANG, Z. H.; CHEN, G. Heat and mass transfer in fixed-bed drying. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 19, p. 4233–4243, 25 jun. 1999.

ZEYMER, J. S. **MODELAGEM MATEMÁTICA DOS FENÔMENOS DE HIGROSCOPIA E RESPIRAÇÃO DE GRÃOS DE SOJA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2021.