

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Curso de Engenharia Química

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE REVERSÃO NA
HOMOGENEIDADE DE UM LEITO DURANTE A
SECAGEM DE ALUMINA**

Lucas Guellis de Souza

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Coorientador: M.Sc. Luan da Silva Barbosa

São Carlos

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 11 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos

Coorientador: M.Sc. Luan da Silva Barbosa

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos

Professor de Disciplina: Prof. Dr. José Maria Corrêa Bueno

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos

Convidado: Dr. João Pedro Alves de Azevedo Barros

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Bentes Freire por me guiar majestosamente durante essa jornada, demonstrando extrema atenção, paciência e disposição a todo tempo. Um verdadeiro exemplo de uma das profissões mais nobres existentes, a de ensinar.

Igualmente ao M.Sc. Luan da Silva Barbosa, pelas verdadeiras aulas e domínio sobre o tema, sempre me norteando, sanando dúvidas e ensinando sobre os assuntos abordados.

Gostaria também de agradecer aos meus pais, Débora e Ezequiel, e à minha irmã Maria Luiza, que durante toda a graduação me incentivaram e apoiaram, e que sempre me serviram de exemplos de pessoas ilustres e profissionais maravilhosos.

A todos meus amigos e colegas que de alguma forma passaram pela minha vida durante minha graduação, seja dividindo moradia, compartilhando conhecimentos, conversando sobre a vida ou aproveitando momentos de descontração; em especial, aos integrantes dos grupos Preferios e Oufi.

Por fim, um agradecimento especial à Prof^ª. Dra. Mercedes de Moraes, que me serviu e serve de incentivo desde antes do início da graduação, pela paixão pela ciência e pela determinação, que resultaram numa carreira incrível, mais que merecida.

“É justamente a possibilidade de
realizar um sonho que torna a vida
interessante”.

- Paulo Coelho.

RESUMO

Um aspecto indesejável dos secadores de leito fixo é que eles geram um produto com distribuição de umidade e de temperatura das partículas pouco uniforme ao longo dele, na direção do escoamento do ar de secagem. Isso pode resultar num produto fora do padrão de qualidade, podendo acarretar perdas significativas em operações subsequentes. Essa desvantagem pode ser contornada com a inversão periódica do sentido de escoamento do ar aquecido, cujo ônus é o maior tempo de secagem e o maior custo. No processo convencional sem inversão, a temperatura na camada mais próxima da entrada do ar aquecido atinge o equilíbrio dinâmico mais rapidamente que as camadas posteriores, enquanto a camada mais distante da entrada leva mais tempo para isso. No processo de secagem com inversão periódica, o equilíbrio dinâmico da temperatura é perturbado a cada reversão. Dessa forma, a reversão do sentido de escoamento do ar confere um caráter de mistura à secagem em leito fixo, o que deve ser comprovado nos experimentos numéricos pela diminuição do gradiente de umidade. A técnica de reversão tem como parâmetros operacionais o instante inicial de aplicação da primeira mudança de sentido do escoamento e o tempo entre inversões subsequentes. A proposta de TG aqui resumida teve como objetivo avaliar a influência desses parâmetros no grau de uniformização de um leito fixo durante a secagem de partículas de alumina. Foram feitos ensaios numéricos usando um programa em MatLab® desenvolvido na área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar. Com os resultados das simulações, foi possível identificar tendências de mudança na homogeneidade do leito fixo, e que os parâmetros avaliados alteram significativamente a operação do leito, devendo ser analisados a fim de se obter a melhor uniformização do processo.

Palavras-chave: Secagem. Alumina. Simulação.

ABSTRACT

An undesirable aspect of fixed bed dryers is that they generate a product with uneven distribution of moisture and temperature of the particles along it, in the direction of drying air flow. This can result in a non-quality product, which can lead to significant losses in subsequent operations. This disadvantage can be overcome by periodically reversing the direction of flow of the heated air, whose burden is the longer drying time and the higher cost. In the conventional process without inversion, the temperature in the layer closest to the inlet of the heated air reaches dynamic equilibrium faster than the later layers, while the layer farthest from the inlet takes longer to do so. In the drying process with periodic inversion, the dynamic temperature equilibrium is disturbed with each inversion. Thus, the reversal of the air flow direction confers a mixing character to the fixed bed drying, which must be proven in numerical experiments by the reduction of the humidity gradient. The reversal technique has as operational parameters the initial moment of application of the first change in flow direction and the time between subsequent inversions. The final paper proposal summarized here, aimed to evaluate the influence of these parameters on the degree of uniformity of a fixed bed during the drying of alumina particles. Numerical tests were performed using a MatLab® program developed in the Particulate Systems area of DEQ/UFSCar. With the results of the simulations, it was possible to identify trends of change in the homogeneity of the fixed bed, and that the parameters evaluated significantly alter the operation of the bed and must be analyzed in order to obtain the best uniformity of the process.

Keywords: Drying. Alumina. Simulation.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	5
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1- ALUMINA	7
2.2- LEITO FIXO	8
2.3- LEITO FIXO COM REVERSÃO NO SENTIDO DE ESCOAMENTO DO AR	10
2.4- SECAGEM EM CAMADA FINA	11
2.5- SECAGEM EM CAMADA ESPESSA	14
3- MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1- MATERIAL	19
3.2- MÓDULO DE OPERAÇÃO DE SECAGEM	19
3.3- MODELO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO	21
3.4- PARÂMETROS E SIMULAÇÃO	21
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5- CONCLUSÕES	28
CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens de esferas de alumina de 3,2 mm (a) e superfície obtida por microscopia eletrônica de varredura de esferas de 4,00 mm (b) e 3,35 mm (c).....	8
Figura 2 – Esquema de um silo secador em leito fixo com representação da frente de secagem.	9
Figura 3 – Ilustração do leito fixo, com e sem reversão.....	10
Figura 4 – Gráfico da curva de secagem.	12
Figura 5 – Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material.	13
Figura 6 – Esquema do módulo de secagem e volume de controle avaliado para explicar o modelo de duas fases de Brooker et al. (1974).....	15
Figura 7 – Esquema das transferências de calor e massa entre a fase sólida e a fase fluida.	18
Figura 8 – Esquema do módulo de secagem utilizado nas simulações de secagem.....	20
Figura 9 – Esquema de válvulas com sentido ascendente (a) e descendente (b) de escoamento do fluido.....	20
Figura 10 – Ilustração das divisões do módulo de secagem para simulação.....	21
Figura 11 – Gráficos de umidade em função do tempo para cada intervalo de reversão...	23
Figura 12 – Gráficos de umidade em função do tempo com indicações para cada intervalo de reversão.....	25
Figura 13 – Gráfico de umidade em função do tempo em $z = 5$ cm para todos os intervalos de reversão.....	26
Figura 14 – Gráficos de temperatura em função do tempo para cada intervalo de reversão.	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades da alumina utilizadas nas simulações.....	19
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores operacionais utilizados nas simulações.	22
--	----

Tabela 2 – Umidades ao longo do leito em $t = 45$ min.....	25
---	----

NOMENCLARUTRA

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
T	Temperatura	[θ]
T_s	Temperatura da fase sólida	[θ]
T_f	Temperatura da fase fluida	[θ]
X	Umidade em base seca	[M M ⁻¹]
\bar{X}	Umidade média em base seca	[M M ⁻¹]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	[M M ⁻¹]
X_0	Umidade inicial	[M M ⁻¹]
W	Umidade média do leito fixo	[M M ⁻¹]
Y	Umidade absoluta mássica na fase fluida	[M M ⁻¹]
t	Tempo	[t]
t_0	Tempo inicial da aplicação da reversão	[t]
Δt	Intervalo de reversão de secagem	[t]
a	Área superficial do sólido por unidade de volume	[L ² L ⁻³]
A_t	Área de seção transversal da célula de secagem	[L ²]
G	Fluxo mássico	[M L ⁻² t ⁻¹]
C_{ps}	Calor específico da fase sólida	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
C_{pv}	Calor específico do vapor d'água	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
C_{pl}	Calor específico da água líquida	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
P	Pressão absoluta	[M L ⁻¹ t ⁻²]
k	Constante de secagem	[t ⁻¹]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[M t ⁻³ θ^{-1}]
f	Taxa de Secagem	[M M ⁻¹ t ⁻¹]

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Massa específica	[M L ⁻³]
λ	Calor específico de vaporização	[L ² t ⁻²]
ε	Porosidade do leito	[-]

SUBSCRITOS

Subscrito	Descrição
f	Fase fluida
s	Fase sólida

1- INTRODUÇÃO

Com o avanço da eletrônica e da computação, cresce a quantidade de estudos associados à automação, controle, simulação e otimização de processos da indústria química, com a intenção de cada vez mais construir sistemas de produção autônomos com fábricas inteligentes, mais eficientes e que podem se adaptar às mudanças na produção, prevendo e corrigindo possíveis falhas. O ponto de partida desses estudos são os modelos matemáticos que descrevem os sistemas físicos (VUKSANOVIC *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2017).

Uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria alimentícia e farmacêutica é a secagem, que é essencialmente um processo de remoção da umidade em excesso de um material, a depender do seu objetivo, a partir da transferência simultânea de calor e massa (MCCABE *et al.*, 1993). A secagem é uma das etapas de processamento que visa principalmente aumentar o tempo de prateleira do produto, facilitando também o transporte do mesmo por reduzir seu peso. O elevado consumo energético pode inviabilizar economicamente a secagem, dependendo das condições empregadas no processo e da eficiência desse. Esforços vêm sendo concentrados no monitoramento e na otimização do processo, muitas vezes feito de forma rústica e ineficiente, quase artesanal.

Existem diversas configurações de secadores, como os de leito fixo, leito fluidizado, vibro-fluidizado, leito de jorro, secador rotativo, dentre outros. O enfoque aqui foi no secador de leito fixo, que emprega um mecanismo de secagem convectiva, onde o sólido particulado permanece estático enquanto o ar aquecido percola o meio poroso. O ar que está seco e quente transfere energia na forma de calor para o material que está mais frio e úmido, fazendo evaporar a fase líquida presente nele, absorvendo-a (SHERWOOD, 1929a). Como o sólido não se movimenta durante a secagem, há um menor impacto mecânico quando comparado a outros métodos, permitindo a utilização de materiais mais sensíveis. Essa é uma das principais vantagens do leito fixo.

Como desvantagens desse tipo de leito, pode-se citar a falta de homogeneidade do material durante a secagem, pois são formados gradientes de umidade e temperatura e variações nas propriedades do gás e das partículas ao longo da altura do leito, o que prejudica a qualidade do produto.

A secagem em leito fixo é recomendada para sementes que geralmente são sensíveis aos choques mecânicos. A ampliação de escala do leito fixo é feita sem dificuldades, entretanto, em sua configuração convencional ele só opera em batelada. No contexto dos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de secagem do DEQ/UFSCar, a abordagem do leito fixo

é feita como se ele fosse uma célula de estudo, em que os mecanismos de transferência podem ser estendidos para outros secadores, como, por exemplo, a esteira rolante.

Cronologicamente, a secagem de alumina em leito fixo espesso surgiu como tema de pesquisa no Centro de Secagem após a conclusão da Tese de doutorado de Albini (2019). Em seu trabalho, Albini (2019) estudou a secagem de cevada em leito fixo espesso com reversão de escoamento, conseguindo reduzir os gradientes de temperatura e de umidade do grão. Entretanto, ao buscar um modelo matemático para descrever o processo, Albini (2019) se deparou com dificuldades inerentes ao grão, como encolhimento e variação no tempo dos parâmetros físico-químicos e dos coeficientes de transferência. Incentivada por essa dificuldade, Genaro (2021) desenvolveu e verificou experimentalmente um modelo para a secagem de alumina em leito fixo espesso com reversão. O uso da alumina permitiu que um sólido ideal, de estrutura interna simples, fosse utilizado em um equipamento bem conhecido. O resultado disso foi o programa computacional utilizado nesse Trabalho de Graduação.

O objetivo do presente trabalho foi, então, analisar os efeitos dos parâmetros de reversão na homogeneização do leito de alumina. Como possíveis parâmetros de reversão entende-se o instante da primeira reversão, algum tempo após o início da secagem, e a sua duração. Por limitação de tempo, o estudo ficou restrito ao uso de parâmetros simétricos de reversão, ou seja, mesmo valor para o instante da primeira reversão e a sua duração. As simulações foram feitas no *software* MatLab® 2015a com os dados plotados utilizando a biblioteca Matplotlib, executada em Python 3.7.9. A partir disso, foram feitas análises e comparações dos sistemas.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentadas propriedades físicas e químicas da alumina, além de algumas características em relação ao equipamento que foi utilizado na simulação do processo e explicações referentes ao processo de reversão de sentido do escoamento deste equipamento. Modelos de secagem em camada fina e em camada espessa são discutidos segundo análise de Genaro (2021), que gerou o programa utilizado nesse trabalho de graduação.

2.1- Alumina

A alumina, ou óxido de alumínio (Al_2O_3), é obtida através da bauxita por um processo denominado Processo Bayer, e é a matéria prima para a produção de alumínio eletrolítico, ou alumínio primário (CARDOSO *et al.*, 2011). A bauxita é uma rocha avermelhada e sua utilização para este fim só é proveitosa se o percentual de alumina estiver entre 50 e 55% (SAMPAIO *et al.*, 2005).

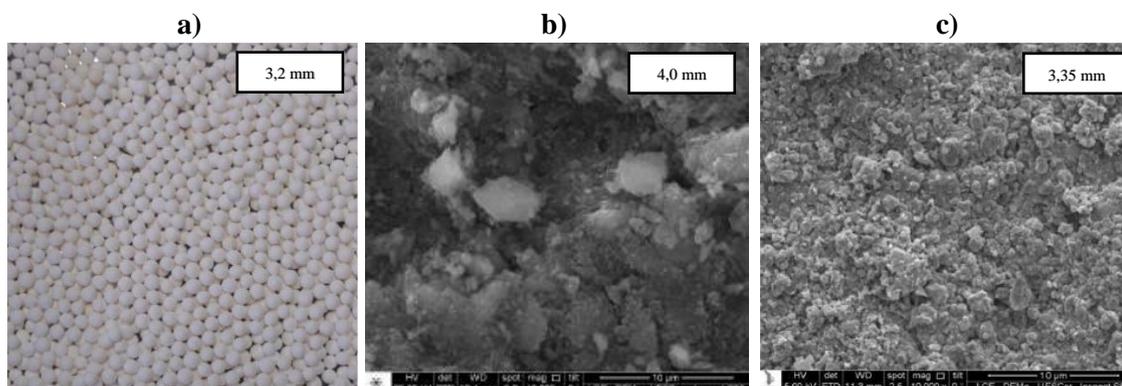
Como principais propriedades, a alumina possui elevadas porosidade, capacidade e estabilidade térmica, área superficial e propriedades mecânicas que permitem também a sua utilização em processos para o tratamento de água, atuando como adsorvente de fluoretos (ALVARINHO *et al.*, 2000), como matéria de refratários, na cromatografia (HIND *et al.*, 1999) e como suporte para catalisadores (ALVARENGA, 2013).

No contexto do presente estudo, a alumina se apresenta como um material adequado para modelagem pela simplicidade da sua estrutura interna, em contraste com grãos e sementes que são compostos por várias camadas, de vários tecidos diferentes. As propriedades físicas da alumina anteriormente mencionadas são estáveis e não dependem da umidade, sendo constantes durante a secagem. Isso simplifica significativamente o modelo, cujos parâmetros deixam de ser variantes no tempo (SOUSA, 2017).

Além disso, Calçada *et al.* (2006) relacionam a estrutura física e a alta porosidade da alumina com a facilidade na remoção de umidade com baixa resistência a transferência de calor e massa. Boa parte da água presente na alumina úmida é livre, diferentemente de grãos e de sementes em que a água é fortemente ligada à estrutura do sólido. O grão de alumina transfere umidade para o ar com a mesma facilidade que o ar transfere umidade para a alumina. Esse é outro fator que simplifica tanto a modelagem quanto a análise dos resultados.

Na Figura 1 - a) foram apresentadas imagens obtidas das esferas de alumina e na Figura 1 - b) e c) da superfície captada por microscopia eletrônica de varredura pelos respectivos autores.

Figura 1 – Imagens de esferas de alumina de 3,2 mm (a) e superfície obtida por microscopia eletrônica de varredura de esferas de 4,00 mm (b) e 3,35 mm (c).



Fonte: a) Genaro (2021); b) e c) Perazzini (2014).

Um ponto importante a ser ressaltado, é que o objetivo do estudo é otimizar a secagem de grãos e sementes, e a utilização da alumina, tendo em mente as propriedades citadas, funciona como um “grão artificial ideal”, possuindo um comportamento parecido com um grão real, porém, facilitando a modelagem por ser perfeitamente esférica, não possuir casca e não encolher. A secagem da alumina estabelece limites superiores e inferiores se comparada à secagem de particulado orgânico, sendo um ponto de partida apropriado e interessante no desenvolvimento e adaptação da técnica de reversão para diferentes materiais.

2.2- Leito fixo

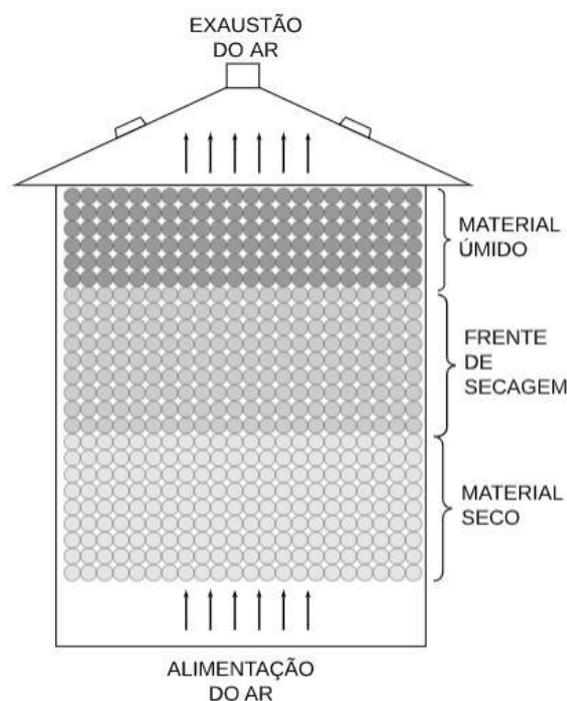
Existem diversos tipos de secadores que podem ser utilizados e estudados, como os de leito fixo, leito móvel ou fluidizados, secadores rotativos, secadores de bandejas, dentre outros. Além de não promover choque mecânico entre as partículas, o secador tipo leito fixo tem a vantagem de operar com vazões de escoamento menores, não só gastando menos energia para soprar o ar aquecido como também permitindo que esse ar saia do equipamento mais saturado. Quanto mais saturado o ar na exaustão do secador, mais eficiente é a secagem. Apesar da configuração de leito fixo desse trabalho ser pouco encontrada como secador de

sementes, os mecanismos de transferência de calor e de massa são os mesmos que ocorrem, por exemplo, no secador tipo esteira rolante.

Outro ponto importante é que esse tipo de leito possui um custo de fabricação e de implementação mais baixo do que os outros equipamentos, sendo também de fácil ampliação de escala. Entretanto, segundo Genaro (2021) e BARROZO *et al.* (2014), ele se restringe à operação em batelada, dificultando o aumento de produção.

No leito fixo, o material sólido permanece estático enquanto o ar quente escoar de forma forçada, percolando os espaços vazios entre as partículas, retirando umidade do sólido e a transportando para fora do secador. O ar ascendente percorre o leito da base até o topo, transferindo calor para o sólido. O sólido, por sua vez, transfere umidade para o ar aquecido, portanto, o ar quente e seco que entra na base resfria-se e satura-se à medida em que se desloca até a exaustão. Ao longo do processo, isso leva à formação de uma frente de secagem (BARROZO *et al.*, 2014), como mostrado na Figura 2 elaborada por Genaro (2021).

Figura 2 – Esquema de um silo secador em leito fixo com representação da frente de secagem.



Fonte: Genaro (2021).

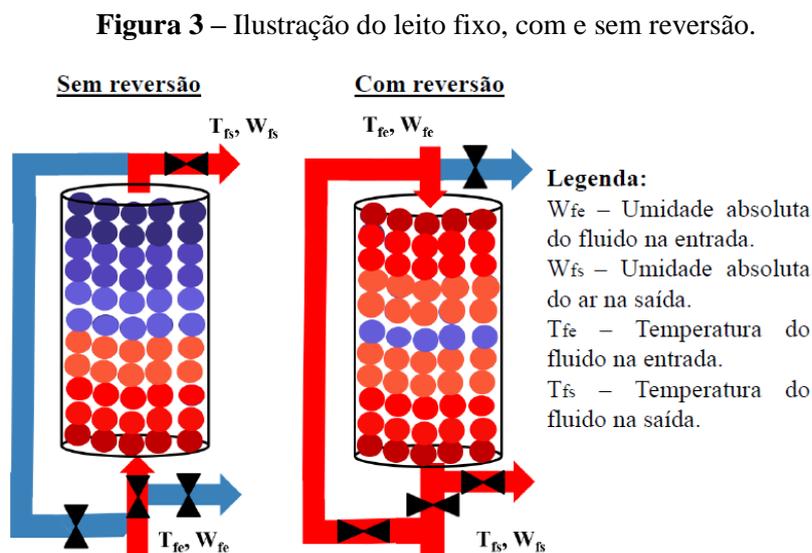
Apesar de ser um fenômeno recorrente neste equipamento, essa frente de secagem é indesejada pois altera a uniformidade tanto das propriedades quanto da qualidade do produto. Um exemplo prático disso, ou seja, dessa indesejada não uniformidade, ocorre com grãos de

café que passam pela torrefação; os grãos com umidade alta podem não pirolisar e os com umidade muito baixa podem ficar chamuscados. No caso específico de sementes, temperaturas elevadas podem reduzir ou até mesmo impedir a germinação delas (RATTI e MUJUMDAR, 1995; PORDAGE e LANGRISH, 2007; BARROZO *et al.* 2014; BALA, 2017; ALBINI, 2019).

2.3- Leito fixo com reversão no sentido de escoamento do ar

Como anteriormente mencionado, uma forma de reduzir significativamente os gradientes de umidade e de temperatura seria a livre movimentação das partículas, utilizando leitos fluidizados, vidro-fluidizados ou mesmo agitadores e misturadores mecânicos, porém, essas diferentes configurações de leitos podem causar impactos entre as partículas que danificam o produto final. Não havendo a possibilidade de usar um leito móvel, a alternativa para diminuir os gradientes em um leito fixo é alcançada pela técnica da reversão (ALBINI, 2019; CHUA *et al.*, 2003; GENARO, 2021).

A técnica da reversão de escoamento é parametrizada pelo instante em que a primeira mudança no sentido de escoamento é feita (t_0) e o intervalo de duração das reversões (Δt) (DAVILA *et al.*, 1983; RATTI e MUJUMDAR, 1995, GENARO, 2021). A Figura 3 ilustra um esquema simplificado em que aparecem os dois modos de operação, ou seja, sem e com reversão. É possível perceber que com a reversão, as frentes de secagem (representadas pela cor azul), que ocorrem então em ambos os sentidos, deslocam a região de maior umidade para o centro do leito.



Fonte: Genaro, 2021.

A fim de entender melhor e otimizar a técnica da reversão, foram utilizados modelos matemáticos para o leito fixo consagrados na literatura. Toda e qualquer modelagem em secagem começa pelo estudo em camada fina, que despreza gradientes em função da pequena espessura. Conceitualmente, a camada fina é uma altura de leito em que não há gradientes significativos. Em seguida, existem modelos na literatura que descrevem a secagem de sólidos em camada espessa, levando em conta a presença de gradientes significativos de temperatura e de umidade. Nessa seção são mostrados alguns modelos disponíveis na literatura que foram utilizadas por Genaro (2021).

2.4- Secagem em camada fina

Também é chamada de secagem em camada delgada, e segundo Bucklin *et al.* (2013), é geralmente feita para análise das variáveis da operação, como temperatura e velocidade do ar, e para entender o comportamento do material que está sendo seco.

De acordo com Kucuk *et al.* (2014), no geral, a análise em camada fina é utilizada quando:

1. Um único produto ou monocamada dele são sujeitos às mesmas condições de temperatura, umidade e velocidade do ar.
2. Uma multicamada do produto onde as condições termodinâmicas do ar permanecem constantes durante todo o processo.

A condição de camada fina é expressa quando um volume de controle não apresenta gradientes axiais significativos de temperatura e de umidade; experimentalmente, isso ocorre quando não há diferença mensurável entre as temperaturas de alimentação e de exaustão, sendo essa diferença, então, dentro do erro associado à medida (GENARO, 2021).

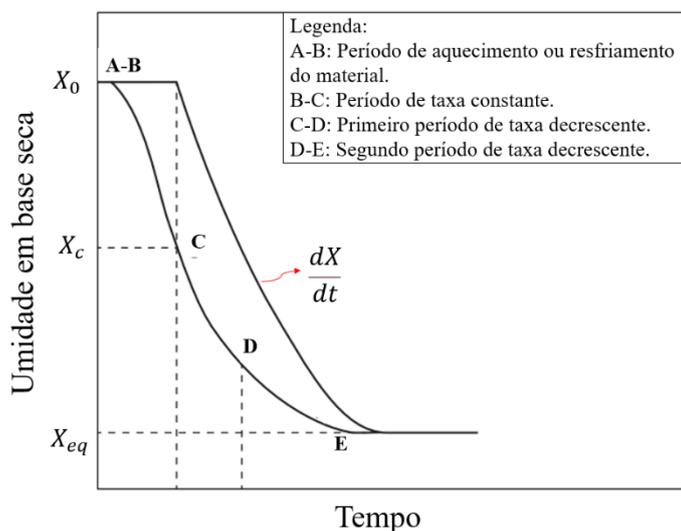
Existem três mecanismos principais de secagem e suas relações com a cinética de secagem de acordo com Sherwood (1929a; 1929b; 1930) e Lewis (1921), e são eles:

1. Evaporação do líquido na superfície do sólido. Quando a resistência interna a difusão do líquido é pequena comparada a resistência para remoção do vapor na superfície.
2. Evaporação na superfície do sólido. Quando a resistência a difusão do líquido intrapartícula é maior comparada com a resistência para a remoção do vapor da superfície.

3. Evaporação no interior do sólido. Quando a resistência a difusão interna do líquido é maior quando comparada com a resistência total para a remoção do vapor.

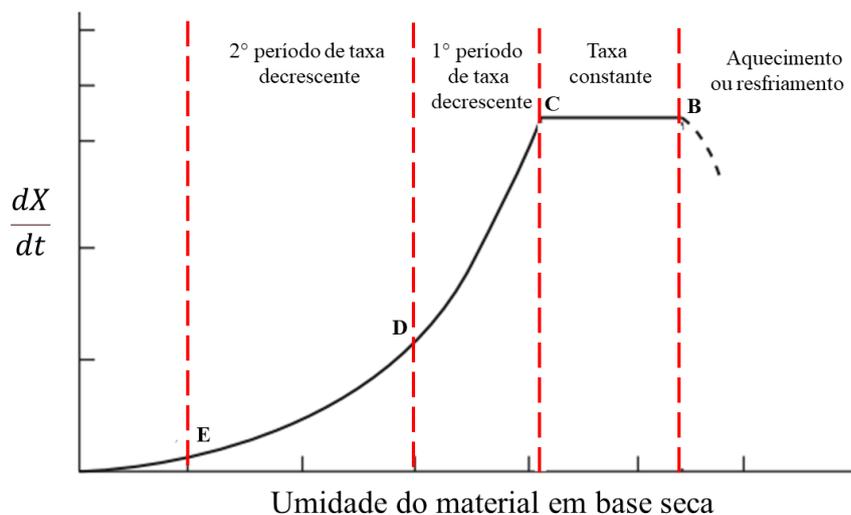
No presente trabalho, o estudo em camada fina teve como papel definir uma descrição matemática para a cinética de secagem. Sherwood (1929b) explica que durante a secagem diferentes mecanismos podem acontecer dependendo das condições do ar utilizado. A partir da análise do comportamento mostrado nas Figuras 4 e 5 é possível entender os mecanismos de secagem e como eles atuam. No início, há um período de taxa de secagem constante (B-C), que representa o item 1 para materiais com líquido na superfície, logo após, um período de taxa decrescente (C-D), onde a umidade líquida da superfície diminui e o mecanismo do item 2 prevalece, havendo evaporação na superfície do sólido, ou o mecanismo do item 3, havendo evaporação no interior do sólido (D-E). A umidade na transição de taxa constante para decrescente representa a umidade crítica X_c do material (GENARO, 2021).

Figura 4 – Gráfico da curva de secagem.



Fonte: Genaro, 2021.

Figura 5 – Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material.



Fonte: Genaro, 2021.

Existem dois estágios de taxa de secagem decrescente, a primeira quando a diminuição da umidade na superfície do sólido predomina e a segunda quando a diminuição da umidade no interior dele controla o processo. Em grãos a secagem não costuma apresentar o período de taxa constante, apenas o período de taxa decrescente (GENARO, 2021).

Modelo de Lewis

Também é conhecido como modelo de Newton e é uma analogia entre a transferência de massa e a Lei de Resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção. Para isso ele considera a taxa de secagem como sendo proporcional à diferença entre a umidade do material em um instante de tempo e a umidade de equilíbrio, como representado na Equação 1 (GENARO, 2021)

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = k(\bar{X} - X_{eq}) \quad (1)$$

Integrando nos dois lados da equação obtêm-se o modelo de Lewis (1921):

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2)$$

Neste modelo, k é a constante de secagem que representa parâmetros dos processos intrínsecos aos fenômenos de transferência de massa externos e internos, e pode ser relacionado à temperatura a partir da correlação de Arrhenius apresentada na Equação 2.

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (3)$$

2.5- Secagem em camada espessa

Os modelos de secagem em camada espessa são amplamente utilizados para prever o comportamento de secadores, para simulação, otimização, controle e projeto, e segundo Genaro (2021), diversos autores apresentam diferentes equações para modelagem de secadores com e sem reversão, que consideram mais ou menos parâmetros, apresentando diferenças também nas condições de contorno utilizadas e nos algoritmos que foram utilizados para interpretar essas equações.

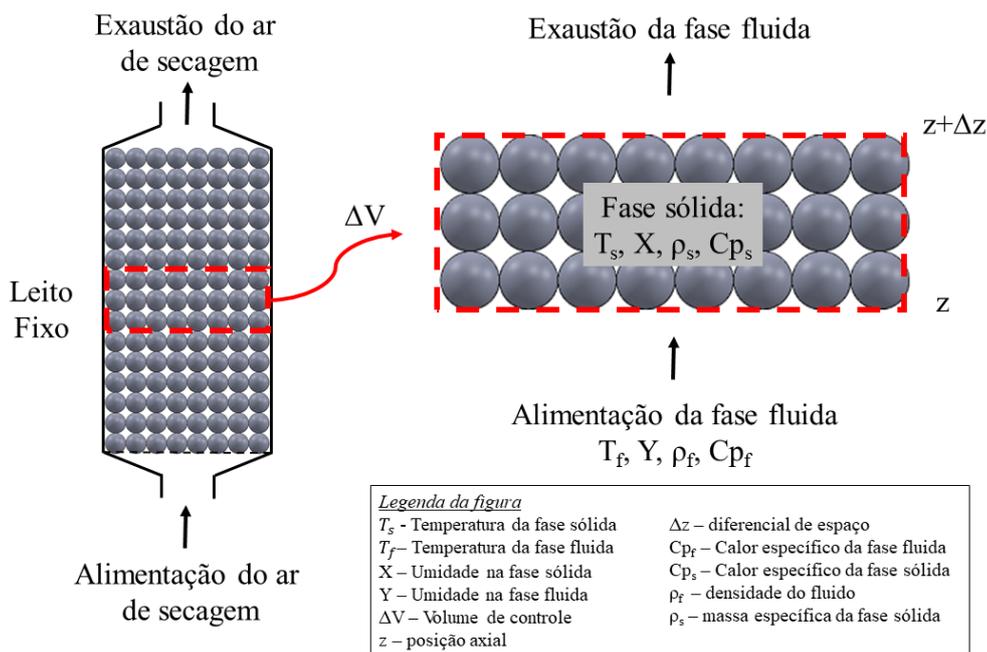
Existem modelos totalmente teóricos, empíricos e híbridos e a utilização de cada um deles vai depender da precisão necessária e da finalidade do processo. Todos esses modelos citados estão explicados na sessão de revisão bibliográfica de seu trabalho.

2.5.1- Modelo de duas fases

Este modelo também é conhecido como modelo de não equilíbrio e considera equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento entre a fase sólida e o fluido, relacionando variáveis como temperatura e umidade em função da posição e tempo por meio de equações diferenciais parciais (MASSARANI e TELLES, 1992; CENKOWSKI *et al.*, 1993; PRADO e SARTORI, 2011).

A Figura 6 elaborada por Genaro (2021) ilustra um leito fixo fora de escala com o volume de controle utilizado para explicar o modelo de duas fases proposto por Bakker-Arkema *et al.* (1967) e simplificado por Brooker *et al.* (1974).

Figura 6 – Esquema do módulo de secagem e volume de controle avaliado para explicar o modelo de duas fases de Brooker *et al.* (1974).



Fonte: Genaro, 2021.

Neste modelo, as variáveis de temperatura das fases sólida e fluida, T_f e T_s respectivamente, e as variáveis de umidade das fases sólida e fluida, X e Y respectivamente, são funções da posição, z , e do tempo, t . Para isso, as seguintes hipóteses são adotadas: (BROOKER *et al.*, 1974; GENARO, 2021)

- Encolhimento das partículas no leito é desprezível;
- Gradientes internos de temperatura nos grãos são desprezíveis;
- Condução de calor e transferência de massa entre os grãos são desprezíveis;
- Fluxo pistonado do ar de secagem;
- Variações na temperatura da fase fluida com o tempo, $(\partial T_f / \partial t)$, e variações da umidade da fase fluida com o tempo, $(\partial Y / \partial t)$, são desprezíveis quando comparadas com as variações de temperatura da fase fluida com a posição axial, $(\partial T_f / \partial z)$, e variações da umidade da fase fluida com a posição axial, $(\partial Y / \partial z)$, do leito fixo na direção do escoamento da fase fluida;
- Transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível;
- Cp_s , Cp_v e Cp_l constantes considerando curtos intervalos de tempo;
- Equação de cinética de secagem em camada fina e isotermas para umidade de equilíbrio conhecidas.

As equações de conservação de massa e energia deste modelo são apresentadas a seguir.

Balço de massa para a fase s3lida:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \text{Equa\c{c}\~ao de taxa de secagem de camada fina} \quad (4)$$

Balço de massa para a fase fluida:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = - \frac{\rho_s}{G_f} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \quad (5)$$

Balço de energia para a fase s3lida:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{h a (T_f - T_s)}{\rho_s (Cp_s + Cp_l \bar{X})} + G_f \frac{\partial Y}{\partial z} \left[\frac{\lambda + Cp_v (T_f - T_s)}{\rho_s (Cp_s + Cp_l \bar{X})} \right] \quad (6)$$

Balço de energia para a fase fluida:

$$\frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{h a (T_f - T_s)}{G_f (Cp_f + Cp_l Y)} \quad (7)$$

2.5.2- Modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992)

Este modelo considera em sua an3lise que as duas fases do sistema, s3lida e fluida, possuem propriedades cont3nuas como temperatura, umidade e velocidade. A fase s3lida seria a jun\c{c}\~ao da matriz seca com a 3gua l3quida presente e a fase fluida seria a jun\c{c}\~ao do ar de secagem com o vapor d'3gua carregado por ela.

Na modelagem s3o considerados os fen3menos difusivos, convectivos e dispersivos para a transfer3ncia de massa e a condu\c{c}\~ao para transfer3ncia de calor e al3m das equa\c{c}\~oes de conserva\c{c}\~ao apresentadas no Item 2.5.1, o modelo tamb3m considera equa\c{c}\~oes de conserva\c{c}\~ao de quantidade de movimento, as isotermas de secagem e equa\c{c}\~oes constitutivas para ambas as fases.

Para o equacionamento, as seguintes considerações foram feitas:

- escoamento unidirecional do ar de secagem
- Gradientes de pressão desprezíveis
- Comportamento ideal da fase fluida
- Transporte convectivo de massa e calor entre fases
- Transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível
- Temperatura, umidade e velocidade do ar são uniformes na seção de entrada
- Não há interação de movimento entre as fases

Assim, as equações de conservação são:

Balço de massa para a fase fluida:

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Y}{1+Y} \right) + G_f \nabla Y = f \quad (8)$$

Balço de massa para a fase s3lida:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1+X} \right) + G_s \nabla X = -f \quad (9)$$

Balço de energia para a fase fluida:

$$\varepsilon C p_f \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C p_f G_f (1 + Y) \nabla T_f = -h a (T_f + T_s) - C p_f (T_f - T_s) f \quad (10)$$

Balço de energia para a fase s3lida:

$$(1 - \varepsilon) C p_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + C p_s G_s (1 + X) \nabla T_s = h a (T_f - T_s) - f \lambda \quad (11)$$

A transfer3ncia de massa entre fases 3 descrita por:

$$f = k_y a (Y_{f,e} - Y_f) \quad (12)$$

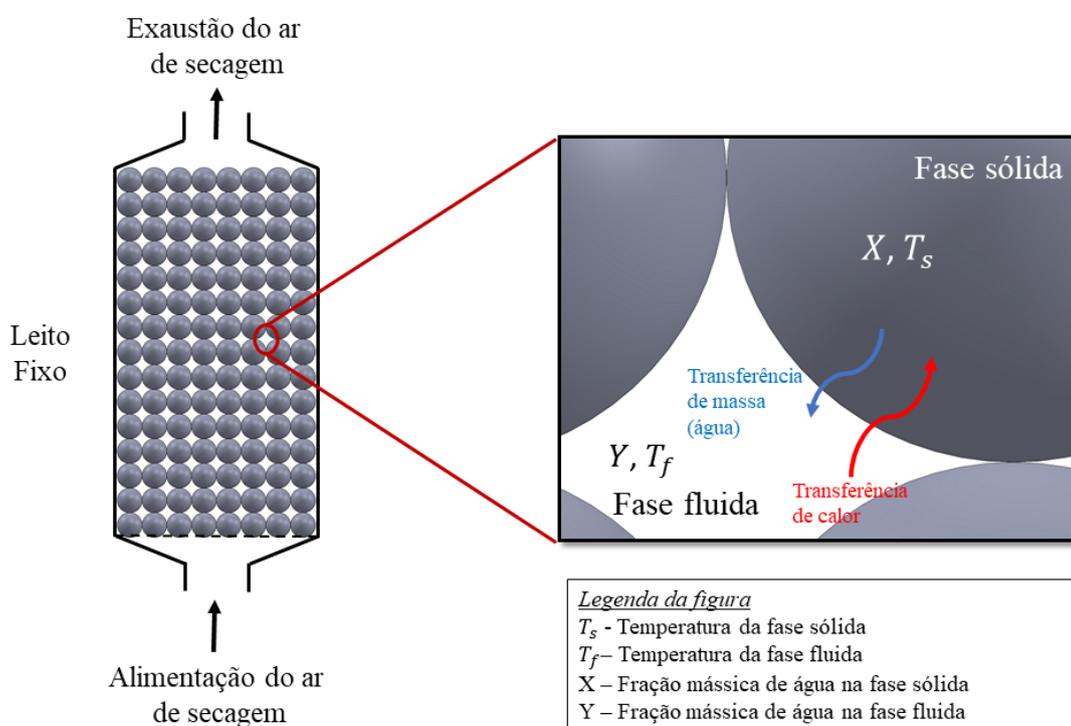
Onde,

$$k_y = \frac{h}{C p_f} \quad (13)$$

Com s e f representando as fases sólida e fluida respectivamente, T a temperatura, X a fra o de água na fase sólida, Y a fra o de água na fase fluida, $Y_{f,e}$ a umidade na fase fluida em equilíbrio com a fase sólida (isotermas de secagem), h o coeficiente de transferência de calor entre fases, k_y o coeficiente de transferência de massa, C_p o calor específico, λ o calor latente de evapora o da água na temperatura da fase sólida, a   a superfície específica do sólido por volume do meio poroso, G a velocidade mássica, e ε a porosidade do leito fixo.

Na Figura 7   possível observar um esquema fora de escala de como são os mecanismos de transferência de massa e de calor na interface sólido/fluido.

Figura 7 – Esquema das transferências de calor e massa entre a fase sólida e a fase fluida.



Fonte: Genaro, 2021.

Um aspecto importante comum a ambos os modelos anteriormente apresentados   que eles consideram contínuas tanto a fase fluida quanto a fase sólida. Por essa razão,   possível usar ferramentas matemáticas como derivadas e integrais, não só para o tempo, mas também para o espaço.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão são apresentadas algumas propriedades da alumina, assim como a caracterização do leito de secagem, o modelo e o software utilizados para a simulação incluindo parâmetros e variáveis dela.

3.1- Material

Para a modelagem, foram utilizadas esferas de alumina com diâmetro médio de 3,2 mm. Alguns valores de propriedades físicas da alumina, encontradas na literatura, foram dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades da alumina utilizadas nas simulações.

Referência	Propriedade
Calçada <i>et al.</i> (1994)	Massa específica da alumina [kg m ⁻³]: $\rho_s=1690$
Perazzini (2014)	Área específica [m ² g ⁻¹]: 294,81
Perazzini (2014)	Volume específico dos poros da partícula [cm ³ g ⁻¹]: 0,40
Perazzini (2014)	Diâmetro médio dos poros da partícula [nm]: 5,43
Perazzini (2014)	Condutividade térmica efetiva na estagnação [W m ⁻¹ K ⁻¹]: $k_{ef}=4,6 \pm 0,14$
Calçada <i>et al.</i> (2006)	Calor específico da partícula em função da temperatura (T_s): $Cp_s=41,04 (22,08+8,97 \cdot 10^{-3} T_s-5,23 \cdot 10^{-5} T_s^2)$

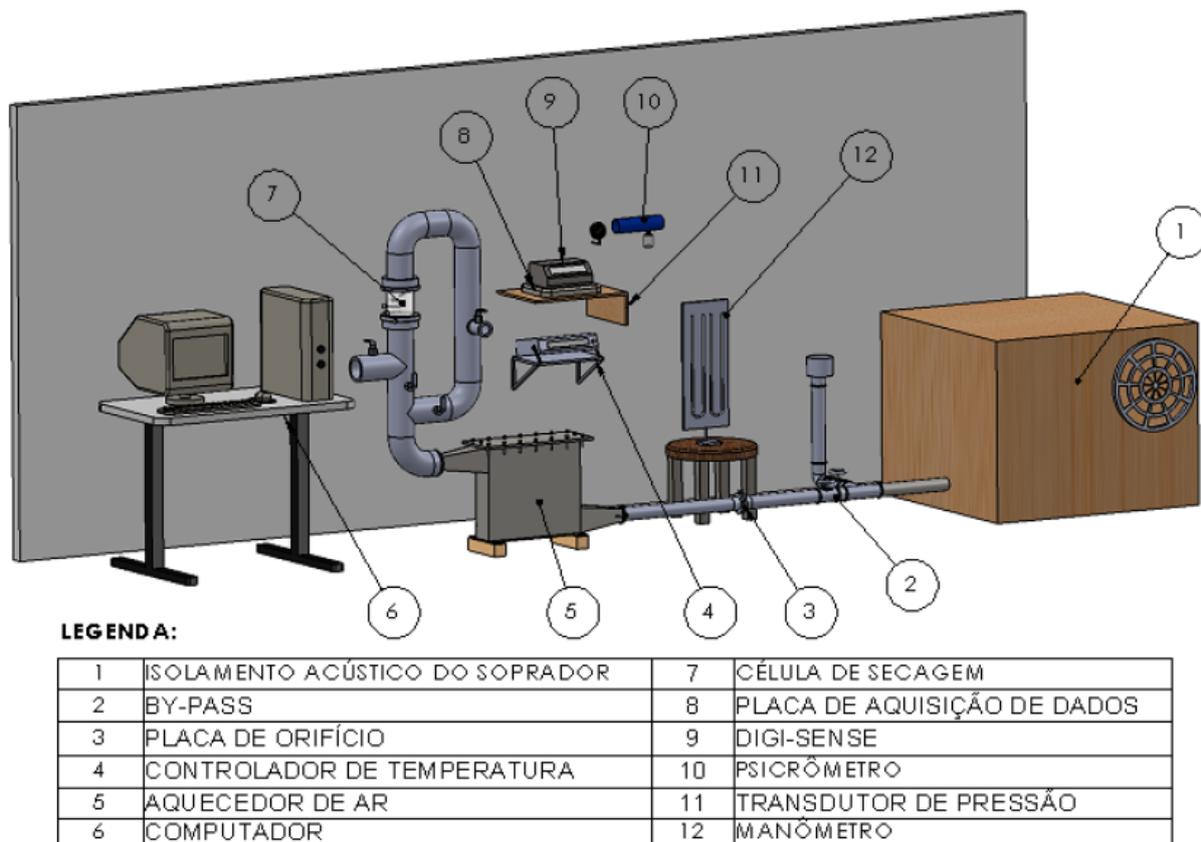
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2- Módulo de operação de secagem

O sistema de secagem simulado foi baseado no sistema experimental utilizado por Genaro (2021) que consiste no módulo apresentado na Figura 8. Este, é formado resumidamente por um soprador, um aquecedor de ar, um conjunto de tubulações e válvulas que definem o sentido de escoamento do ar aquecido e a célula de secagem, que se configura em um leito fixo de 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro, preenchido com as esferas de alumina de 3,2 mm de diâmetro.

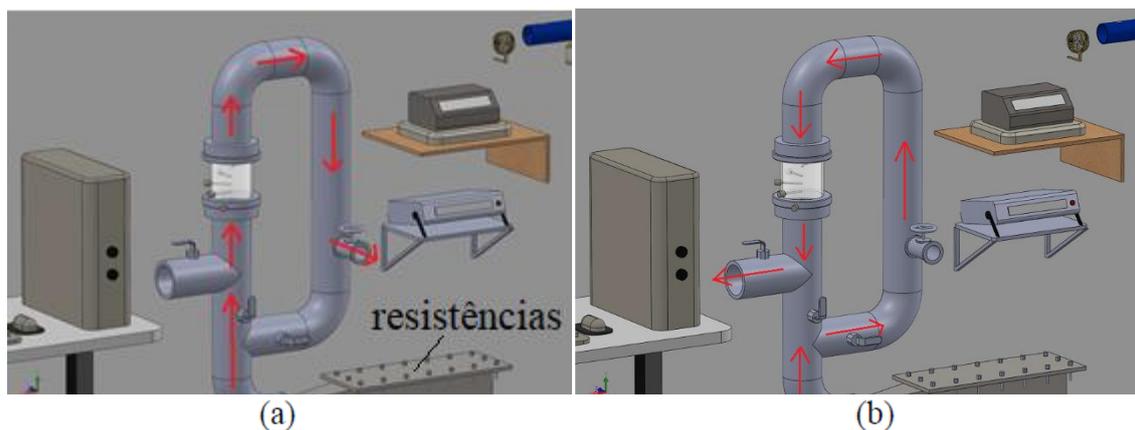
O ar de secagem, antes de entrar no leito, é bombeado para um aquecedor de ar que utiliza uma resistência elétrica para o aquecimento, e o sistema de reversão do escoamento do fluxo pode ser entendido a partir da Figura 9, elaborada por Genaro (2021), onde é possível observar o sistema de válvulas que podem ser configuradas para ambos os sentidos: (a) ascendente e (b) descendente, indicados pelas setas.

Figura 8 – Esquema do módulo de secagem utilizado nas simulações de secagem.



Fonte: Genaro, 2021.

Figura 9 – Esquema de válvulas com sentido ascendente (a) e descendente (b) de escoamento do fluido.



Fonte: Genaro, 2021.

3.3- Modelo utilizado na simulação

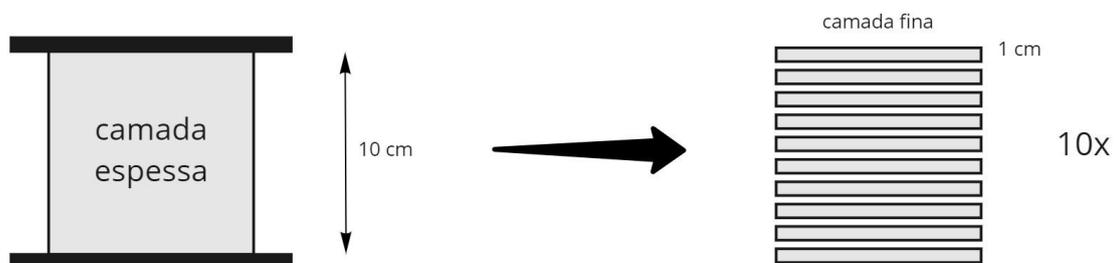
Dentre os modelos de camada fina e camada espessa apresentados nas sessões 2.4 e 2.5, optou-se por utilizar o modelo de camada fina de Lewis (1921), dado pela Equação 2, por ser mais simples, demandando assim um menor esforço computacional e com uma probabilidade maior dos resultados convergirem.

Sendo mais simples, ele possui uma menor complexidade de parâmetros, sendo possível a sua utilização especificando apenas 1 ou 2 deles, e mesmo assim, manter uma boa representação cinética de secagem em camada fina.

3.4- Parâmetros e simulação

A simulação foi feita utilizando o *software* MatLab® 2015a, que possui funções pré-programadas de fácil utilização. E para facilitar ainda mais a programação, deixar o *script* mais bem estruturado e a simulação mais rápida, considerou-se o leito fixo espesso de 10 cm como sendo dez leitos fixos delgados de 1 cm cada, como é possível observar na ilustração da Figura 10.

Figura 10 – Ilustração das divisões do módulo de secagem para simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Como dentro de cada leito delgado não há gradientes significativos de temperatura e umidade, eles podem ser considerados pequenos tanques de mistura perfeita, e o leito total (espesso), um sistema desses dez leitos delgados ligados em série.

O MatLab possui algumas funções padrão para resolução de equações diferenciais rígidas, chamadas de “*stiff*” e a utilizada para este caso foi a *ode23s*, discretizando o modelo matemático na coordenada axial e integrando ao longo do tempo de secagem. Esta função

foi escolhida pois há mudanças bruscas em condições de contorno na base e no topo, em cada reversão ocorrida, e ela contempla esse tipo de comportamento, não sendo possível a utilização de outro tipo de função.

Outro ponto interessante a ser citado é que esta função resolve as equações a partir do método Runge-Kutta, dividindo o tempo em intervalos desiguais de acordo com a variação da resposta; intervalos menores quando a resposta varia muito e maiores quando a resposta varia pouco. Além disso, foi necessário especificar uma tolerância de erro relativo na aba “options” para que a simulação acontecesse corretamente.

Para a simulação, foram utilizados os valores nominais de operação apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores operacionais utilizados nas simulações.

Temperatura do ar aquecido ascendente	100°C
Temperatura do ar aquecido descendente	90°C
Vazão mássica do ar	0,390 kg/min
Umidade inicial do ar (base seca)	0,016
Teor de umidade inicial da alumina (base seca)	0,45
Temperatura inicial do leito	20,8°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença entre as temperaturas de entrada nos sentidos ascendente e descendente foi considerada pois, como é possível observar na Figura 9 do Item 3.2 o caminho percorrido pelo fluido no sentido reverso é maior, fazendo com que ele perca mais energia para trocas com o ambiente depois de sair do aquecedor, antes de entrar no leito.

As simulações foram feitas alterando o intervalo de tempo entre cada reversão (Δt) no sentido de escoamento do fluido e o instante inicial em que as reversões começaram a acontecer (t_0), para entender os efeitos desses parâmetros no processo, sendo elas:

- $\Delta t = 5$ minutos, com $t_0 = 5 \text{ min}$.
- $\Delta t = 10$ minutos, com $t_0 = 10 \text{ min}$.
- $\Delta t = 15$ minutos, com $t_0 = 15 \text{ min}$.

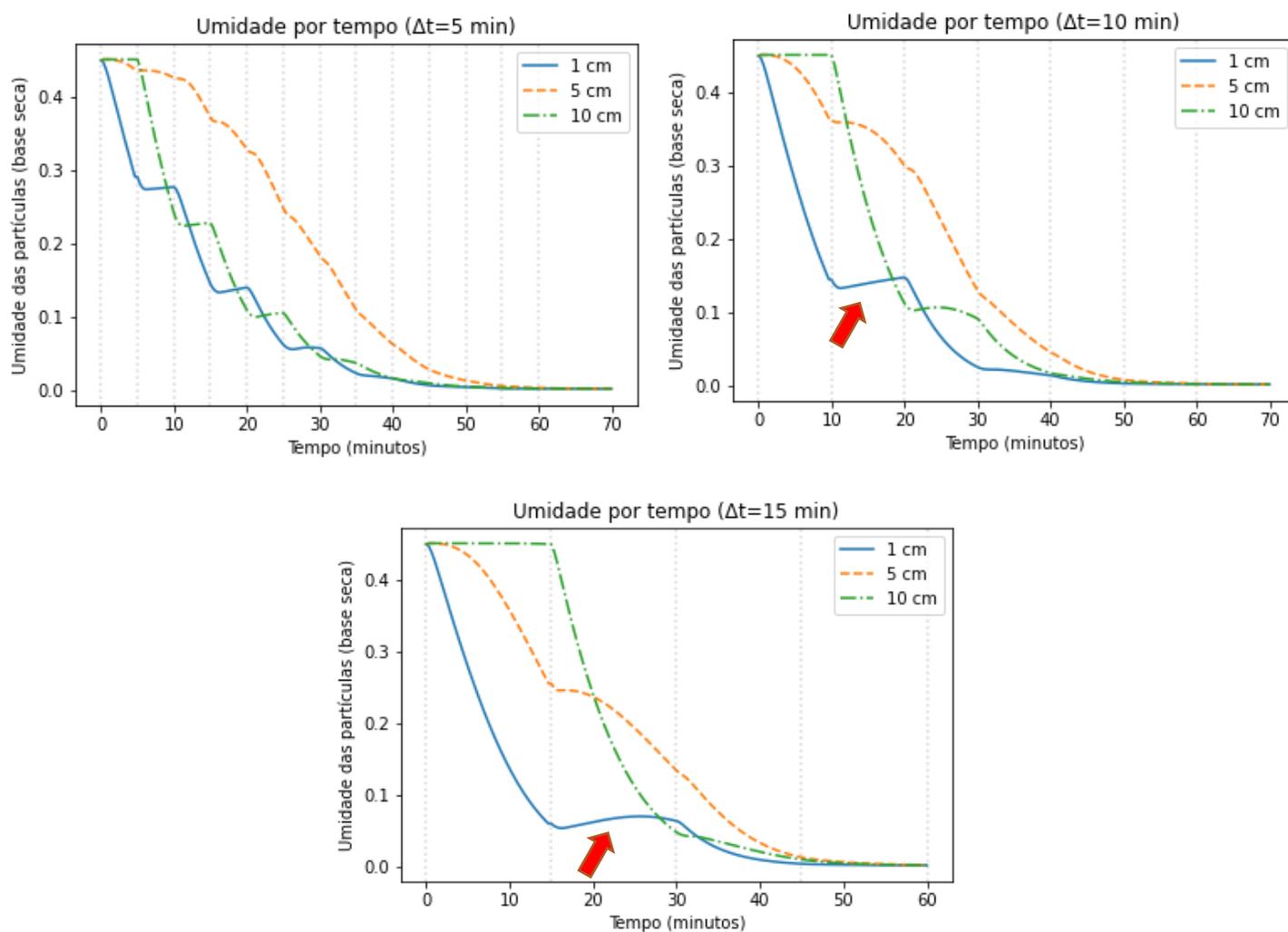
Assim, para a simulação, foram analisadas a cada 0,33 segundo a umidade e a temperatura em três pontos distintos de um leito fixo de 10 cm de altura, sendo eles $z = 1 \text{ cm}$, $z = 5 \text{ cm}$, e $z = 10 \text{ cm}$, até que ocorra o equilíbrio.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a simulação caracterizada no item 3, obteve-se aproximadamente 200 dados para cada configuração em cada um dos três pontos analisados no eixo z, que foram dispostos em gráficos para análise. Os principais aspectos observados durante as comparações das três simulações foram o gasto energético, que está diretamente relacionado ao tempo de secagem até que o equilíbrio seja atingido, e características físico-químicas do produto, que estão relacionadas aos gradientes de temperatura e umidade resultantes do processo.

A Figura 11 apresenta os gráficos para cada um dos Δt variados, e neles, a umidade em função do tempo para cada ponto em z.

Figura 11 – Gráficos de umidade em função do tempo para cada intervalo de reversão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, é possível observar que a umidade média em $z = 1 \text{ cm}$ começa a diminuir mais rapidamente quando comparada com os outros dois pontos analisados pois o ar de secagem inicia seu caminho por ele, e a umidade em $z = 10 \text{ cm}$ só começa a diminuir para os três casos quando a primeira reversão é aplicada.

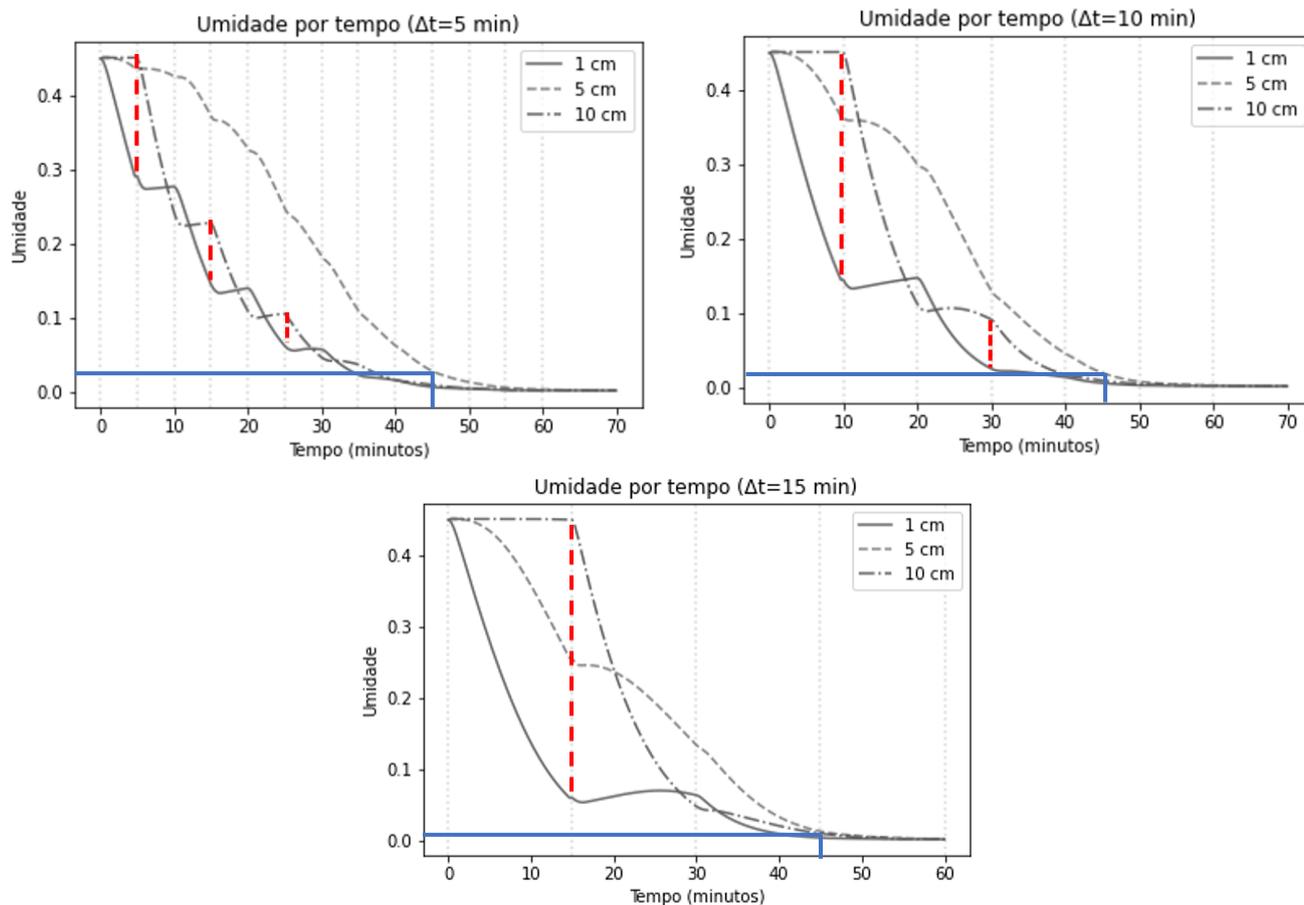
Um fenômeno indesejado que fica evidente é a chamada reumidificação, que ocorre de forma mais expressiva nas extremidades e após cada reversão, indicada na Figura 11 pelas setas vermelhas, quando, após uma reversão, a umidade do material para de diminuir e começa a aumentar. Quando uma reversão acontece, o ar que passava seco por uma extremidade começa a passar mais úmido, próximo à saturação, pois agora ele percorre todo o leito absorvendo água antes de chegar no mesmo ponto. Como o sistema está fora de equilíbrio, a umidade é transportada do ar para o sólido por estar mais úmido que ele, ocorrendo uma reumidificação. Esse efeito foi maior em situações com intervalos maiores de reversão (Δt), e também foi observado por Berbert *et al.* (1994) na secagem de café e nos resultados apresentados por Sabbah *et al.* (1979) na secagem de soja.

A reumidificação é indesejada pois vai contra o objetivo principal do processo que é a secagem do material, e aumentando a umidade dele em algum ponto do leito, é preciso secá-lo novamente para que seja atingido o equilíbrio desejado. Isso faz com que o tempo de secagem aumente, provocando maiores gastos energéticos na secagem.

Como é possível observar, as diferenças de umidade entre os pontos $z = 1 \text{ cm}$ e $z = 10 \text{ cm}$ são menores durante toda a secagem quando as reversões acontecem de 5 em 5 minutos do que quando acontecem de 10 em 10 minutos, que são menores do que quando acontecem de 15 em 15 minutos. Essas diferenças mencionadas são proporcionais aos tracejados vermelhos *plotados* nos gráficos da Figura 12.

Apesar dessa maior homogeneidade nos extremos para tempos de reversão menores, o tempo total de secagem acaba sendo um pouco maior para esses casos, o que acarreta um gasto energético maior, se não forem considerados os gastos mecânicos para a reversão do sentido do fluido. Visualmente, ainda na Figura 12, é perceptível, observando os segmentos de reta azuis, que próximo aos 45 minutos de experimento e $z = 5 \text{ cm}$, para $\Delta t = 5 \text{ min}$ ainda há uma quantidade significativa de umidade, para $\Delta t = 10 \text{ min}$ também há um pouco de umidade, e para $\Delta t = 15 \text{ min}$ quase não resta umidade neste ponto. Os valores também foram dispostos na Tabela 2 para facilitar a comparação, e neles, é possível perceber que para $\Delta t = 15 \text{ min}$, os valores terminaram menores e mais próximos, ou seja, um leito mais seco e mais homogêneo do que para outros intervalos.

Figura 12 – Gráficos de umidade em função do tempo com indicações para cada intervalo de reversão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

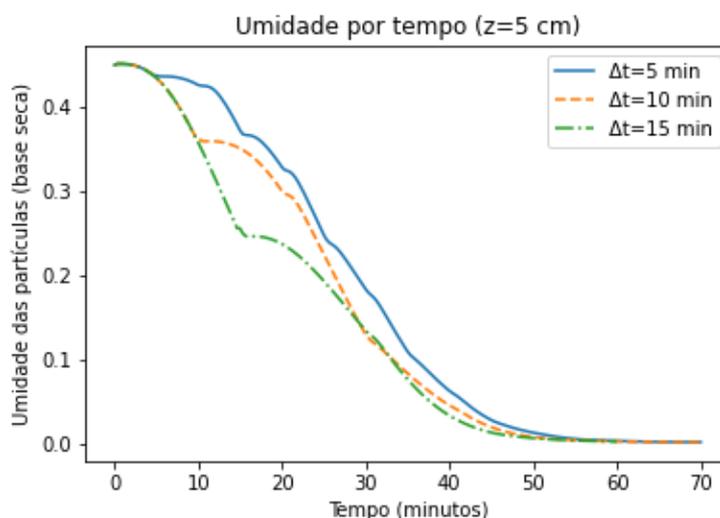
Tabela 2 – Umidades ao longo do leito em $t = 45$ min.

Intervalos de reversão (Δt)	5 min	10 min	15 min
Instante de tempo (t)	45.0 min	45.0 min	45.0 min
Umidade em $z = 1$ cm	0,0060	0,0052	0,0037
Umidade em $z = 5$ cm	0,0275	0,0191	0,0127
Umidade em $z = 10$ cm	0,0089	0,0088	0,0097

Fonte: Elaborado pelo autor.

Isso mostra que há uma maior homogeneidade nas extremidades do leito quando o intervalo de reversão é menor, porém, analisando o centro do leito ($z = 5 \text{ cm}$) na Figura 13, que apresenta o gráfico para $z = 5 \text{ cm}$, com a umidade em função do tempo para cada um dos Δt analisados, percebe-se que durante quase toda a simulação a umidade ficou menor para reversões de 15 minutos, seguido por reversões de 10 minutos, e por fim, reversões a cada 5 minutos. Visualmente isso fica representado pela curva verde (tracejada-pontilhada) abaixo da curva alaranjada (apenas tracejada), que ficam abaixo da linha azulada (linha sólida). Essa secagem mais efetiva no centro do leito para reversões maiores ocorre pois quanto menor o intervalo de tempo entre as reversões, por mais tempo o ar saturado fica em contato com o centro do leito e por mais tempo ele passa seco pelas extremidades.

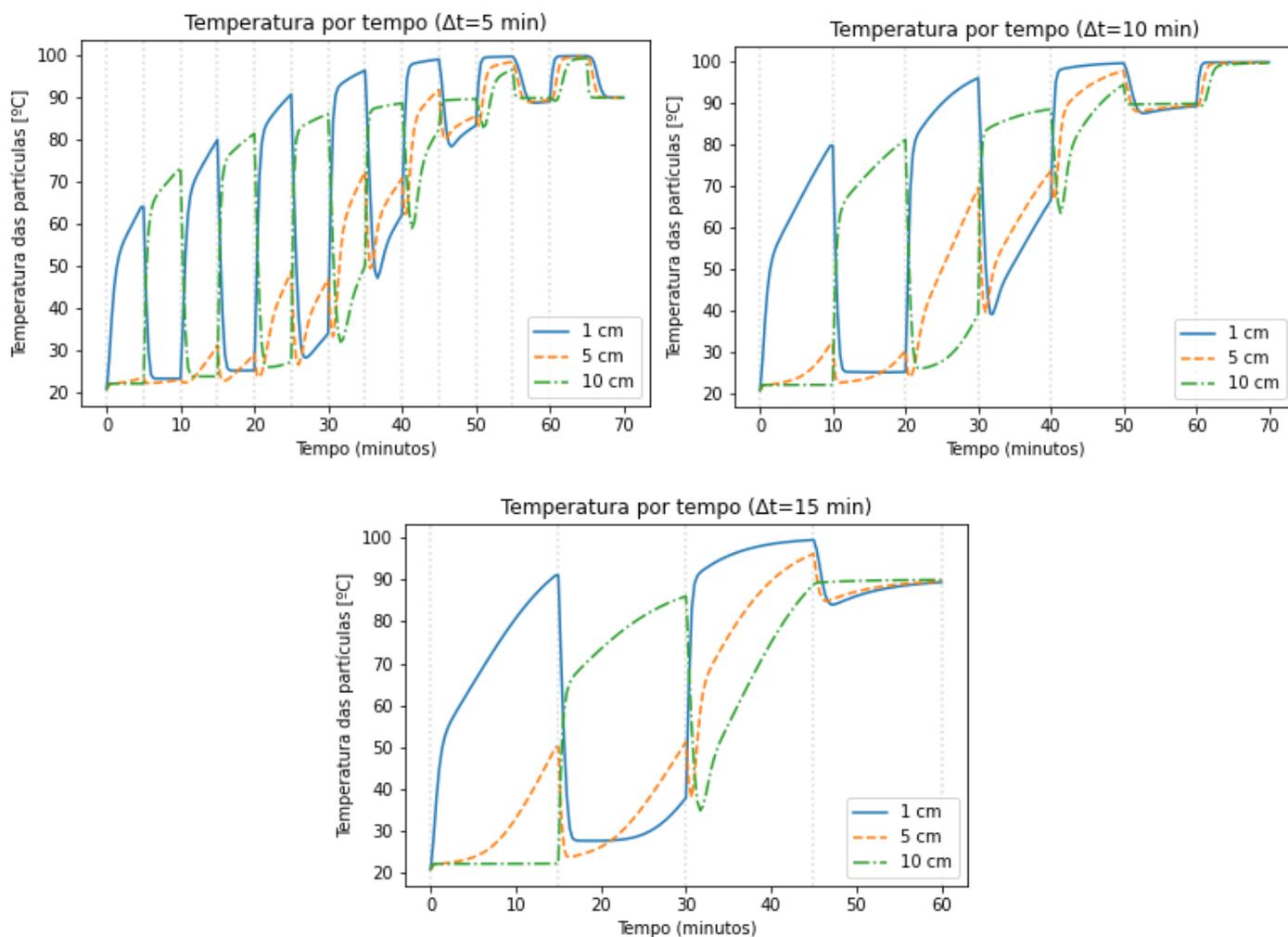
Figura 13 – Gráfico de umidade em função do tempo em $z = 5 \text{ cm}$ para todos os intervalos de reversão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 14 apresenta os gráficos para cada um dos Δt variados, com a temperatura em função do tempo para cada ponto em z , nela é possível observar que quanto menor o intervalo de reversão, mais tempo a temperatura do centro do leito demora para aumentar. No caso de reversões a cada 5 minutos, por exemplo, a temperatura em $z = 5 \text{ cm}$ começa a subir só após a segunda reversão, ou seja, em $t = 10 \text{ min}$, e ela vai sofrendo pequenas alterações até atingir o equilíbrio dinâmico com o restante do leito, enquanto isso, nas extremidades, vão havendo mudanças bruscas de temperatura a cada reversão. Em todos os casos foi atingido um equilíbrio térmico dinâmico após um determinado tempo de operação, efeito que também foi observado por outros autores como Genaro (2021) e Albin (2019).

Figura 14 – Gráficos de temperatura em função do tempo para cada intervalo de reversão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma situação que o modelo não prevê, mas que deve ser levado em conta na análise dos resultados é que nela as reversões acontecem instantaneamente e os efeitos dela já começam a ser considerados. Pensando no sistema apresentado no item 3.2, as reversões seriam feitas manualmente pelo operador, que deve alterar a posição de quatro válvulas para que o sentido de escoamento do fluido se inverta totalmente, o que pode levar alguns segundos, fazendo com que o leito fique num estado transitivo entre os dois modos de operação por algum tempo. Outro fator que seria limitado por esse manuseio das válvulas é o tempo mínimo das reversões, visto que quanto menor o intervalo entre elas, mais significativo, percentualmente, é o tempo de manuseio.

5- CONCLUSÕES

A partir do estudo e da simulação da secagem em leito fixo de alumina com reversão no sentido do escoamento do fluido, pôde-se concluir que os parâmetros da técnica de reversão de escoamento alteram significativamente a operação do leito. E que a reversão a cada 10 minutos foi a que manteve as camadas de 1, 5 e 10 cm mais próximas em termos das variáveis de estado durante o processo de secagem.

Além disso, intervalos pequenos de duração da reversão perturbam o processo mais vezes, fazendo com que a frente de secagem leve mais tempo para alcançar as camadas mais internas, próximas à metade da altura. Cada secagem tem um tempo próprio para entrar em regime, intervalos muito pequenos de reversão demoram mais para entrar em equilíbrio dinâmico. A cinética de secagem é uma curva característica utilizada como referência para determinar o tempo de regime.

Por outro lado, intervalos mais longos fazem o contrário, ficando mais próximos do tempo de regime e da operação convencional com escoamento unidirecional. Quando isso acontece, o papel da reversão fica reduzido

Outro ponto observado, foi que a indesejada, mas inevitável, reumidificação, ocorreu para os três módulos de reversão.

Por fim, os experimentos numéricos mostraram que as respostas das simulações foram coerentes e fisicamente consistentes. Isso permitiu que o estudo fosse feito próximo de como teria sido no laboratório.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por falta de tempo e pelas consequências causadas pela pandemia do COVID-19, este trabalho de graduação precisou ser feito inteiramente à distância, limitando o leque de possibilidades que o assunto poderia ter trazido, assim, ficam algumas sugestões para próximos estudos:

- Análise energética do modelo apresentado conjuntamente aos resultados experimentais;
- Variação de outros parâmetros do processo como temperaturas, umidades e formato do leito;
- Variação de material e diâmetro das partículas além de utilizar outros modelos mais complexos, que levam em consideração mais fenômenos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABT, E.; ROBIN, L. P. Perspective on Cadmium and Lead in Cocoa and Chocolate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, p. 13008-13015, Novembro 2020.

ALBINI, G. **Estudo da Secagem de Grãos em Leito Fixo, com e sem escoamento reverso do ar de secagem**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2019.

ALVARENGA, C. M. **Alumina recoberta com carbono como suporte de catalisadores em reações de HDS**, p.26. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ALVARINHO, S. B.; MARTINELLI, J. R.. **Utilização de alumina para a remoção de fluoretos em águas e efluentes**. **Cerâmica**, São Paulo, v. 46, n. 298, p. 104-117, 2000.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DEBOER, S. F.; ROTH, M. G. Grain drying simulation. Research Report, n. 224, Michigan State University, E. Lansing., 1974. Citado por: DAVILA, S. I.; CHEN, L. H.; WELCH, G. B. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, p. 1842–1848, 1983.

BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. Second ed. WILEY Blackwell, 2017.

BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. **Journal of Stored Products Research**, v. 42, n. 3, p. 348–356, 2006.

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; FILHO, J. B. P. 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, 1994. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021863484710778>

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. Drying cereal grains. Connecticut: The AVI Publishing Company, INC., 1974. Citado por: CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PABIS, S. Deep-Bed Grain Drying - A Review of Particular Theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553–1582, 1993. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373939308916919>

BUCKLIN, R.; THOMPSON, S.; MONTROSS, M.; ABDEL-HADI, A. Grain Storage Systems Design. **Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering**. p.123–175, 2013. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00007-0>.

CALÇADA, L. A.; MANCINI, M. C.; WILDHAGEN, G. R. S. Drying of Inorganic Particulate Compounds. **Drying Technology**, 24, p. 349–358, 2006.

CARDOSO, J. G. R. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 43-88, Março 2011.

CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PABIS, S. Deep-Bed Grain Drying - A Review of Particular Theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553–1582, 1993. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373939308916919>

DAVILA, S. I.; CHEN, L. H.; WELCH, G. B. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, p. 1842–1848, 1983.

GENARO, B. L. Leito fixo com reversão do ar de secagem: estudo experimental e numérico da secagem de alumina. Dissertação – Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2021.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, 146, p. 359–374, 1999.

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 757–773, 2014.

LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Journal of Industrial & Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427–432, 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50137a021>

MCCABE, W. L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5ª edição. McGraw-Hill, Inc., 1993.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

PORDAGE, L. J.; LANGRISH, T. A. G. Stack-wide behavior for hardwood drying. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1779–1789, 2007.

PRADO, M. M.; SARTORI, D. J. M. Simultaneous heat and mass transfer in packed bed drying of seeds having a mucilage coating. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 1, p. 39–50, 2008.

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, 1995.

SABBAH, M. A.; MEYER, G. E.; KEENER, H. M.; ROLLER, W. L. Simulation Studies of Reversed-Direction Airflow Drying Method for Soybean Seed in a Fixed Bed. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 5, p. 1162–1166, 1979.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; **Rochas e Minerais Industriais**. Capítulo 13: Bauxita, CETEM, p.279, 2005.

SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—I. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 21, n. 1, p. 12–16, 1929a. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50229a004>

SHERWOOD, T. K. The Drying of solids—II. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 21, n. 10, p. 976–980, 1929b. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50238a021>

SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—III Mechanism of the Drying of Pulp and Paper. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 22, n. 2, p. 132–136, 1930. Disponível em: http://www.boneandjoint.org.uk/highwire/filestream/13335/field_highwire_article_pdf/0/741.full-text.pdf

SOUSA, R.C. Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2017a.

VUKSANOVIC, D.; UGARAK, J.; KORCOK, D. Industry 4.0: **The future concepts and new visions of factory of the future development**. **Advanced Engineering systems**. International Scientific Conference on ict and e-business related research – SINTEZA, 2016.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017. Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>