

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

**ANÁLISE DA SECAGEM EM LEITO ESPESSO COM E
SEM REVERSÃO DE ESCOAMENTO USANDO
DEGRAUS DE AQUECIMENTO: ENSAIOS NUMÉRICOS**

Vitor Kalil Matos Gebrin

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos, SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 13 de setembro de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

Convidado: Prof. Dr. José Teixeira Freire

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador deste trabalho, professor Fábio Bentes Freire por me proporcionar tantos ensinamentos não só neste trabalho, como na graduação.

A todos os amigos que me apoiaram todos esses anos. Especialmente aos moradores do antigo Apartamento 422, Murilo e Rafael, que me guiaram por tantos caminhos nessa faculdade, como veteranos e grandes amigos.

E, mais importante de tudo, a minha mãe e amiga Teresa Cristina, que me inspirou e sempre me incentivou a estar onde estou, por ter me ensinado, entre tantas outras coisas, o valor do aprendizado. Por estar sempre do meu lado em todas as dificuldades. Obrigado, mãe.

*“Sonho que se sonha só
é só um sonho que se sonha só
mas sonho que se sonha junto é realidade.”*

Raul Seixas

RESUMO

A secagem é um processo que aparenta falsa simplicidade. Ela engloba complexos mecanismos de transferência de calor e de massa que dificultam consideravelmente o desenvolvimento de modelos matemáticos. Por conta disso, controlar e otimizar o processo em tempo real é um desafio que vem sendo amplamente estudado. A técnica de secagem mais simples é a de leito fixo, como, por exemplo, a de grãos de café que ocorre a céu aberto em grandes terrenos de chão batido ou mesmo de cimento, tijolo ou asfalto. O leito fixo é um equipamento amplamente encontrado em aplicações industriais, principalmente na forma de torres de recheio. Ele pode ser usado na secagem em batelada e em pequena escala de sementes com sensibilidade ao choque mecânico, quando é evitado o uso de secadores em que há movimentação dos sólidos. Outra alternativa para a secagem de sementes em leito fixo é a esteira rolante, permitindo a operação em contínuo. Uma das desvantagens mais apontadas do leito fixo é a não uniformidade do produto, devido aos gradientes significativos de temperatura e de umidade durante a secagem. A aplicação de escoamento de ar ora no sentido ascendente, ora no sentido descendente mostrou-se efetiva na redução desses gradientes e na melhora da homogeneidade do produto final. A proposta de Trabalho de Graduação aqui resumida tem por objetivo simular o comportamento dinâmico da secagem em leito fixo espesso com e sem reversão usando degraus de aquecimento. Com os resultados das simulações de um modelo dinâmico desenvolvido na área de sistemas particulados, pretende-se analisar o que muda quando o escoamento de ar aquecido muda de sentido. A fim de simplificar o modelo matemático, a partícula padrão utilizada no estudo foi a alumina, que não encolhe e cujas propriedades físico-químicas não variam no tempo.

Palavras-chave: Secagem em Leito Fixo. Escoamento reverso. Alumina. Degrau de Aquecimento.

ABSTRACT

The drying process may seem mistakenly simple. It includes several complex mechanisms of heat and mass transfer that make the development of mathematical models considerably harder. As a consequence, instantly controlling and optimizing this process has become a well studied challenge. The simplest drying technic is the fixed bed drying, as it occurs when, as an example, the coffee beans are open-air dried on large cement, bricks or asphalt surfaces. The fixed bed drying is widely used in industries, mainly as packed bed columns. This equipment can be used in small scale batch drying of seeds with seeds that are sensible to mechanical shocks, in cases where the moving dryers are not able to operate. Another alternative to fixed bed drying is through the use of treadmills, that allow a continuous operation. A well-known downside of the fixed bed process is the lack of homogeneity in the product, caused by the high temperature and moisture gradients during the drying phenomenon. The application of timed reversal on the airflow direction through the bed results in a product with higher homogeneity. The present thesis here summarized aims to simulate the dynamic behaviour of the fixed bed drying with and without airflow reversal combined with stepwise temperature changes.

Keywords: Fixed Bed Drying. Reversal Air Flow. Alumina. Stepwise Heating.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Ilustração simplificada de um silo secador em leito fixo.14
- Figura 2:** Comparação ilustrativa dos gradientes de umidade e temperatura durante a secagem em leito fixo com e sem a reversão no sentido de escoamento do ar.....15
- Figura 3:** Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem.....22
- Figura 4:** Temperatura da mistura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente. Degrau de 60°C para 80°C e degrau de 80°C para 60°C ..24
- Figura 5:** Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente. Degrau de 60°C para 80°C e degrau de 80°C para 60°C ..25
- Figura 6:** Temperatura da mistura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente truncada em 20 minutos.....28
- Figura 7:** Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente truncada em 20 minutos.....29
- Figura 8:** Temperatura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão de ar com $\Delta t = 10$ minutos. Degrau de 60°C para 80°C e degrau de 80°C para 60°C31
- Figura 9:** Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão de ar com $\Delta t = 10$ minutos. Degrau de 60°C para 80°C e degrau de 80°C para 60°C32
- Figura 10:** Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão com $\Delta t = 10$ minutos, truncada em 20 minutos.....34
- Figura 11:** Coeficiente de variação em função do tempo para a secagem com e sem reversão e com degrau positivo e negativo: para o tempo total e para os primeiros 20 minutos.....35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades físicas e térmicas da Alumina.....	22
--	----

SUMÁRIO

Banca examinadora.....	2
Agradecimentos.....	3
Contracapa.....	4
Resumo.....	5
Abstract.....	6
Lista de figuras.....	7
Lista de quadros.....	8
1 – INTRODUÇÃO	11
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 – Alumina.....	12
2.2 – Secagem em Leito Fixo.....	13
2.2.1 – Secagem em Leito Fixo com Reversão de Ar.....	14
2.2.2 – Secagem em Leito Fixo com Reversão de Ar e Degraus de Temperatura.....	16
2.3 – Secagem em Camada Fina.....	17
2.3.1 – Modelos Matemáticos Empíricos e Semiempíricos de Secagem em Camada Fina.....	17
2.3.2 – Modelo Matemático de Duas Fases para Secagem em Camada Espessa.....	19
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 – Alumina.....	21
3.2 – Módulo de Secagem em Leito Fixo.....	22
3.3 – Dados do Software de Simulação.....	23

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1 – Secagem Com Vazão Ascendente.....	24
4.2 – Secagem Com Reversão na Vazão.....	29
4.3 – Coeficiente de Variação para a Umidade.....	34
5 – CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

1 – INTRODUÇÃO

A secagem é uma das mais importantes operações unitárias da engenharia química, visto que é um dos processos mais antigos, mais comuns e mais diversos já desenvolvidos pelo ser humano (KUCUK et al., 2014). Não obstante, essa operação também se classifica como um dos processos mais energeticamente onerosos devido ao alto calor latente necessário para a vaporização e a baixa eficiência resultante da utilização do ar, o fluido de secagem mais comum. Desse modo, o consumo energético da secagem representa de 10% a 25% da energia total consumida em países como Estados Unidos, Canada, Alemanha e Dinamarca (MUJUMDAR, 2006).

A aplicação da secagem se encontra em diversos setores industriais como na indústria têxtil (JOHANN et al., 2014), alimentícia (IGUAZ et al., 2003), farmacêutica (ZIAEE et al., 2019) e de beneficiamento de grãos (SILVA et al., 2012). Na indústria de beneficiamento de grãos, se faz uso da secagem para reduzir a umidade dos grãos, com o intuito de preservar seu valor nutricional e aparência, assim como fornecer uma maior durabilidade para o armazenamento através da redução da atividade biológica do grão e dos microrganismos nele presentes (ALBINI, 2019). Todavia, uma condução inadequada desse processo pode resultar em danos irreversíveis à qualidade dos grãos, tornando-os inadequados para venda.

A forma mais simples e amplamente utilizada para realizar a secagem é através do processo em leito fixo. A secagem em leito fixo consiste na passagem do fluido de secagem através de uma coluna do material, percolando seus interstícios e, com isso, promovendo o transporte de calor e massa entre a fase fluída e a fase sólida. A utilização do leito fixo é vantajosa no caso de secagem de partículas sensíveis a impactos mecânicos, uma vez que minimiza a movimentação do material no leito. Contudo, esse método apresenta a desvantagem de gerar leitos com alto gradiente de umidade, o que resulta em produtos não-homogêneos e, portanto, de menor valor agregado, uma vez que a secagem acima ou abaixo do ideal prejudica a qualidade do material (ALBINI, 2019; RUIZ-LOPEZ, 2008).

Uma forma de aumentar a homogeneidade do leito é realizar a secagem com reversão do ar. Este método de operação consiste na inversão periódica do sentido de escoamento do fluido de secagem através do leito. Embora possua a vantagem de tornar a umidade mais homogênea e diminuir as diferenças de temperaturas do leito, a

secagem com reversão pode resultar no aumento do consumo energético específico e na redução da eficiência de secagem (GENARO,2021).

Para compensar a diminuição da eficiência energética da secagem em leito fixo com reversão, uma alternativa é a aplicação de degraus de temperatura. Esse método permite aumentar a velocidade do processo e, assim, sua eficiência, pois impacta favoravelmente a cinética de secagem (CHUA, 2001). O estudo da combinação da reversão do escoamento de ar com a aplicação de degraus de temperatura é fundamental pois pode representar um método de secagem de grãos mais eficiente energeticamente e que possa produzir grãos de maior qualidade e valor agregado. Desse modo, o objetivo desse trabalho é simular o comportamento da secagem em leito fixo com e sem reversão usando degraus de aquecimento. Para realizar as simulações, será aplicado o modelo dinâmico desenvolvido na área de sistemas particulados, com base em uma partícula padrão constituída de alumina.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Alumina

O óxido de alumínio (Al_2O_3) ou alumina é um material muito importante na indústria de minérios pois é a principal matéria-prima na obtenção de alumínio metálico (HIND et al., 1999). Contudo, devido às suas propriedades físicas (alta porosidade e área superficial e estabilidade térmica) a alumina ativada vem encontrando diversos usos em outras áreas como no estudo de transferência de massa e energia, na forma de adsorvente, suporte para catalisadores, dessecador, entre outras (GENARO, 2021).

Na indústria de beneficiamento de grãos, esse óxido possui um papel importante, uma vez que é um excelente absorvente e pode ser utilizado como um grão modelo, facilitando a análise dos fenômenos de transferência de calor e massa na secagem (SOUSA, 2017). A aplicação da alumina como grão modelo na secagem de leito fixo permite reduzir a complexidade da modelagem dos comportamentos do sistema, uma vez que a alumina é um material mais simples estruturalmente, se comparada com sementes reais, que são compostos de diversas camadas e tecidos. Desse modo, o uso da alumina na secagem de leito fixo permite minimizar o efeito da redução e compactação do leito que ocorre no processo com grãos reais, além de

facilitar o processo de remoção da umidade devido à baixa resistência que o material apresenta à transferência de massa da água fracamente ligada (Calçada et al., 2006).

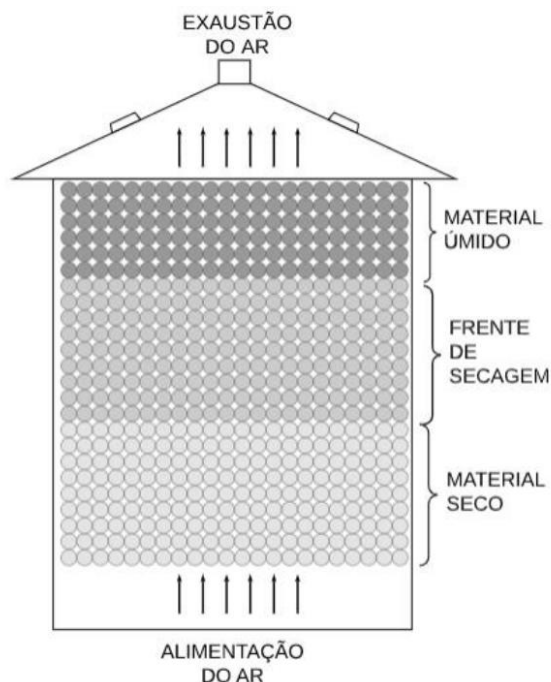
Todavia, como relatado por Barbosa (2022), a alumina é um material inorgânico e possui uma maior quantidade de água fracamente ligada em sua superfície quando úmida, se comparada com grãos reais. Essa diferença resulta em uma remoção mais fácil da água superficial no início do processo, contudo também acarreta uma maior ocorrência de reumidificação após a reversão do ar, pois as esferas de alumina readsorvem a água com relativa facilidade.

2.2 – Secagem em Leito Fixo

A secagem em leito pode ser realizada tanto sem a utilização de equipamentos específicos, no caso da secagem a céu aberto de produtos orgânicos, como com aplicação de colunas de recheio, equipamentos que contêm um leito de partículas úmidas através do qual ocorre a passagem forçada do fluido de secagem. Em indústrias como a de beneficiamento de grãos, as partículas submetidas à secagem são sensíveis a choques mecânicos, o que incentiva o uso de equipamentos com leitos fixos, que evitam a movimentação das sementes durante o processo.

Na secagem neste tipo de equipamento, o fluido de secagem (na maioria dos casos, ar) atravessa forçadamente o espaço intersticial do leito, que se mantém estático. O fluido seco e aquecido, ao entrar em contato com as partículas úmidas e com menor temperatura, promove a transferência de massa da fase sólida para a fase fluída e a transferência de calor da fase fluída para a sólida. Com isso, ao sair do equipamento, o fluido se encontra com maior umidade e a uma temperatura menor, se comparado a entrada. Contudo, como na porção mais próxima a entrada, o gradiente de temperatura e umidade entre a fase fluída e a fase sólida é maior, a transferência de calor e massa ocorre de forma mais intensa nesta área. Conforme o fluido atravessa o leito, estes gradientes são reduzidos e, de forma semelhante, a transferência de calor e massa também sofre redução. De acordo com Barrozo et al. (2014) e Genaro (2021), esse comportamento forma uma frente de secagem (Figura 1), ou seja, diferentes zonas de secagem no leito de acordo com a distância da posição de entrada do fluido.

Figura 1: Ilustração simplificada de um silo secador em leito fixo.



Fonte: Genaro (2021)

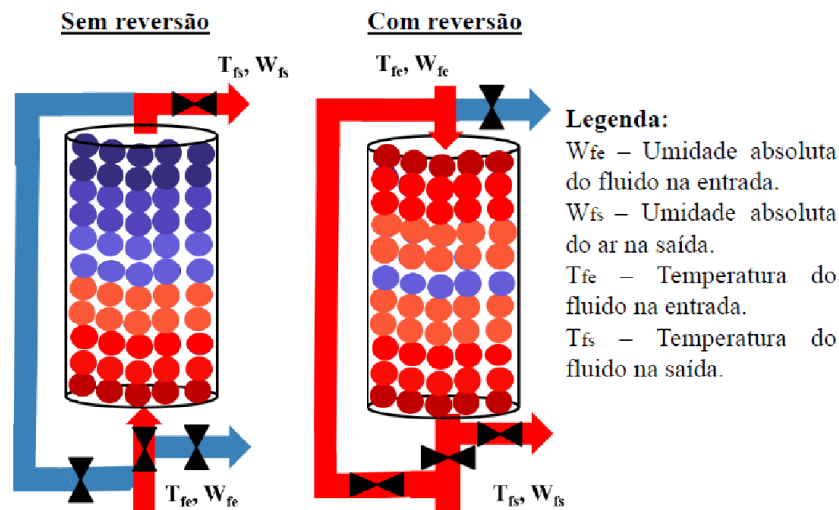
As partículas mais próximas a entrada têm sua umidade reduzida mais rapidamente do que as partículas na exaustão do fluido. Como resultado, o material resultante da secagem em leito fixo é heterogêneo (BARROZO et al., 2014; BARBOSA, 2022). A formação deste tipo de leito proporciona uma desvantagem para a aplicação desse equipamento, uma vez que a homogeneidade do produto é determinante para a qualidade no caso da secagem de grãos, uma vez que a secagem acima ou abaixo do ideal afeta as propriedades físicas da semente, assim como sua capacidade de germinar posteriormente.

2.2.1 – Secagem em Leito Fixo com Reversão de Ar

Para minimizar a formação indesejada de frentes de secagem no leito, faz-se necessário aplicar métodos alternativos no processo de secagem de sementes. Uma alternativa frequentemente utilizada para manipular a umidade ao longo do escoamento e fornecer produtos mais homogêneos é a reversão no escoamento de ar (RUIZ-LOPEZ, 2008).

Este método consiste em reverter a direção do escoamento do fluido de secagem em intervalos de tempo periódicos durante o processo, o que promove uma maior transferência de calor e massa nas extremidades do equipamento. Com isso, ocorre a formação de duas frentes de secagem distintas, uma ascendente e outra descendente (GENARO, 2021), o que concentra a umidade na porção intermediária do secador e fornece um leito com uma distribuição de umidade e temperatura mais uniforme e homogênea (Figura 2). (RATTI E MUJUMDAR, 1995; RUIZ-LOPEZ, 2008; ALBINI, 2019).

Figura 2: Comparação ilustrativa dos gradientes de umidade e temperatura durante a secagem em leito fixo com e sem a reversão no sentido de escoamento do ar.



Fonte: Genaro (2021)

Ratti e Mujumdar (1995) desenvolveram um modelo para a secagem em leito fixo com reversão de ar que incorpora a diminuição do tamanho das sementes, para analisar os efeitos da reversão nos perfis de temperatura e umidade do leito. Ao comparar os resultados da simulação com os dados experimentais previamente obtidos da secagem em leito fixo de cilindros de cenouras, os autores observaram que a os perfis de umidade e temperatura foram atenuados com a aplicação da reversão, resultando em um produto mais homogêneo, sem alterar drasticamente as curvas de secagem do material.

Para expandir a análise desse tipo de processo, Albin (2019) realizou o estudo conjunto dos dados experimentais e modelados para a secagem de leito fixo com e sem reversão de grãos de cevada, com a aplicação de uma modelo de duas fases para a

transferência de calor e massa. Além da promoção de uma maior homogeneidade do leito, a autora observou que as eficiências energéticas da secagem de cevada foram ligeiramente menores ao se utilizar a reversão do escoamento de ar se comparada com o processo convencional. Além disso, Albini (2019) também relata que o modelo de duas fases desenvolvido apresentou uma boa concordância com os dados experimentais.

Com base no modelo desenvolvido por Albini (2019), Genaro (2021) realizou um estudo detalhado da secagem com e sem reversão de ar para esferas de alumina em leito fracionado, a fim de diminuir o impacto das variações das propriedades físicas das partículas que constituem o leito. Genaro observou que, para o sistema analisado, a reversão do escoamento do ar resultou no aumento do tempo necessário para o equilíbrio térmico periódico assim como em uma menor eficiência de secagem. A autora atribuiu a diminuição nos fatores energéticos ao fenômeno de perda e ganho de umidade observado no leito. Ao realizar a reversão do escoamento, partículas no extremo oposto à entrada de ar sofreram um aumento na umidade, o que prejudicou a secagem das esferas de alumina, ao se comparar com o processo convencional.

2.2.2 – Secagem em Leito Fixo com Reversão de Ar e Degraus de Temperatura

Dadas as desvantagens de uma menor eficiência energética e maiores períodos de secagem observados pelos estudos de Albini (2019) e Genaro (2021), faz-se necessário buscar uma alternativa para tornar a secagem em leito fixo com reversão de ar economicamente mais viável. Dentre as variáveis passíveis de serem manipuladas no processo, a temperatura é uma das mais simples de se controlar e analisar.

Uma forma de se aumentar a velocidade e a eficiência de processos de secagem com a manipulação da temperatura é a aplicação de degraus de variações. Nessa operação, a temperatura do fluido de secagem sofre variações periódicas bruscas, crescentes ou decrescentes. Este método foi estudado por Chua et al. (2001), que compararam o tempo total de secagem de fatias de banana, para incrementos e decréscimos discretos periódicos da temperatura. Os autores puderam constatar que a aplicação desse método resultou em uma redução significativa no tempo necessário para reduzir a umidade do material até o nível desejado.

Desse modo, o presente trabalho propõe, através de simulações com modelo de duas fases, a análise da combinação da variação em degrau da temperatura em conjunto com a reversão no escoamento de ar, para o desenvolvimento de um processo mais eficiente e economicamente viável na secagem em leito fixo.

2.3 – Secagem em Camada Fina

Para desenvolver modelagens matemáticas apropriadas para a otimização e projeto de equipamentos de secagem em leito fixo, é necessário antes ter conhecimento de como ocorre o processo de secagem de um dado material. Para entender as transferências de calor e massa nesses processos, é possível utilizar os dados da secagem de uma camada fina do material. De acordo com Kucuk et al. (2014), o modelo de camada fina resultante pode ser aplicado se:

- I. um único grão ou camada de grãos é exposta ao ar de secagem nas mesmas condições de temperatura, pressão e umidade;
- II. no caso de uma multicamada de grãos de diversas espessuras, em que, a qualquer momento do processo, todos os pontos estão no mesmo estado termodinâmico e com as mesmas propriedades físicas.

Embora em um primeiro momento as suposições da camada fina pareçam demasiadamente ideais para possibilitar a simulação de um cenário real, a análise dos dados obtidos da cinética de secagem de uma camada fina permite obter as equações necessárias para a estruturação de modelos mais complexos, como os de camada espessa (GENARO, 2021).

2.3.1 – Modelos Matemáticos Empíricos e Semiempíricos de Secagem em Camada Fina

Os modelos matemáticos empíricos e semiempíricos são baseados nos dados experimentais e são análogos à solução geral da equação de difusão, também conhecida como Lei de Fick. Desse modo, estes modelos assumem uma proporção entre a taxa de secagem e a diferença entre a umidade em um dado momento e a umidade de equilíbrio do material (ALBINI, 2019). Dentre os modelos dessa natureza, o modelo de Lewis

(1921) é o mais simples, que compara a secagem em camada fina diretamente com a Lei de Resfriamento de Newton (Equação 1).

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

Ao integrarmos a Equação 1 acima e aplicando a função exponencial de ambos os lados, obtemos a Equação 2.

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

Outros modelos, como os de Page (1949) (Equação 3) e Overhults, ou Page Modificado (Equação 4), são adaptações do modelo de Lewis, onde a constante k perde o significado físico (ERBAY e ICIER, 2010).

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = e^{-kt^n} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = e^{-(kt)^n} \quad (4)$$

A constante k é chamada de constante de secagem e representa parâmetros do processo intrínsecos aos fenômenos de transferência de massa externos e internos (GENARO, 2021). Esta constante possui uma relação do tipo Arrhenius com a temperatura, na forma da Equação 5 para o modelo de Lewis e de Page, e na forma da Equação 6 para o modelo de Overhults.

$$k = k_0 \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (5)$$

$$k = e^{\left(k_0 + \frac{E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

2.3.2 – Modelo Matemático de Duas Fases para Secagem em Camada Espessa

A partir das equações obtidas dos dados experimentais para a secagem de camada fina, em conjunto com o estudo dos fenômenos de transferência de calor, massa e movimento, pode-se desenvolver modelos matemáticos com a capacidade de prever o comportamento de sistemas mais complexos. Com esses modelos mais rigorosos, é possível desenvolver softwares de simulação para otimização dos processos (RUIZ-LÓPEZ et al., 2008; GENARO, 2021).

Dentre os modelos utilizados para a secagem de camada espessa, os modelos de duas fases, também chamados de modelos de não equilíbrio, vêm recebendo crescente atenção na literatura (ALBINI, 2019). Estes modelos analisam a secagem das partículas sólidas como um processo de transferência de calor e massa que ocorre entre uma fase fluida e uma fase sólida, e a transferência de massa ocorre somente com a água. Desse modo, cada ponto do sistema possui uma velocidade, umidade e temperatura para cada uma das fases.

Para facilitar a realização dos cálculos, Brooker et al. (1974) aplicaram simplificações às equações do modelo, baseadas nas seguintes suposições:

- As fases sólida e fluida são avaliadas como mistura ideal;
- As propriedades físicas do fluido e do sólido são constantes;
- As perdas de calor do sistema são desprezíveis;
- Os gradientes de temperatura no interior das partículas são desprezíveis;
- O encolhimento do leito durante o processo é desprezível;
- A condução de calor e a difusão de massa entre partículas são desprezíveis;
- O escoamento é unidirecional, com distribuição uniforme de temperatura, velocidade e umidade da fase fluida.

Com o uso dessas simplificações e com a cinética da secagem é possível compor o modelo com as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento (Massarani e Silva Telles (1992)). Com isso, as seguintes equações foram obtidas para o modelo:

- Balanço de energia para a fase fluída:

$$\varepsilon C p_f \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + C p_f G_f (1 + W) \nabla T_f = -h a (T_f + T_s) - C p_f (T_f - T_s) f \quad (7)$$

- Balanço de energia para a fase sólida:

$$(1 - \varepsilon) C p_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + C p_s G_s (1 + X) \nabla T_s = h a (T_f - T_s) - \lambda f \quad (8)$$

- Balanço de massa para a fase fluída:

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{W}{1 + W} \right) + G_f \nabla W = f \quad (9)$$

- Balanço de massa para a fase sólida:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + X} \right) + G_s \nabla X = -f \quad (10)$$

Para a taxa de secagem, são utilizadas as seguintes equações:

$$f = k_y a (Y_{f,e} - Y_f) \quad (11)$$

$$k_y = \frac{h}{c p_f} \quad (12)$$

Em que os subscritos s e f são indicativos das fases sólida e fluída, respectivamente, X é a fração de água da fase sólida, T é a temperatura, Y a fração de água da fase fluída, $Y_{e,f}$ é a umidade da fase fluída em equilíbrio com a fase sólida,

valor obtido das isotermas de secagem, h é o coeficiente de transferência de calor entre as fases, k_y é o coeficiente de transferência de massa, G é a velocidade mássica, C_p o calor específico, λ o calor latente de evaporação da água à temperatura da fase sólida, a é a superfície específica do sólido por unidade de volume do meio poroso e ε é a porosidade do leito.

Com base nessas equações e nos dados experimentais obtidos, Genaro (2021) desenvolveu o script para a simulação da secagem da alumina em camada espessa com e sem reversão de ar, que foi utilizado neste trabalho para avaliar a umidade e a temperatura do leito fixo ao longo do processo. O uso de esferas de alumina permitiu a simulação de um grão ideal, o qual não passa pelo processo de encolhimento observado na secagem de grande parte dos grãos reais (ALBINI, 2019), e permite a análise dos fenômenos de transferência de calor e massa de forma mais simples.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção será utilizada para apresentar as propriedades do material simulado, as esferas de alumina, assim como o sistema criado para realizar os experimentos que levaram ao desenvolvimento do *software* por Genaro (2021), e algumas características sobre o *software* em si.

3.1 – Alumina

O material utilizado na modelagem e simulação foram esferas de alumina com diâmetro médio de 3,2 mm. As propriedades físicas e térmicas da alumina podem ser encontradas na literatura, como descrito no Quadro 1.

Quadro 1: Propriedades físicas e térmicas da Alumina.

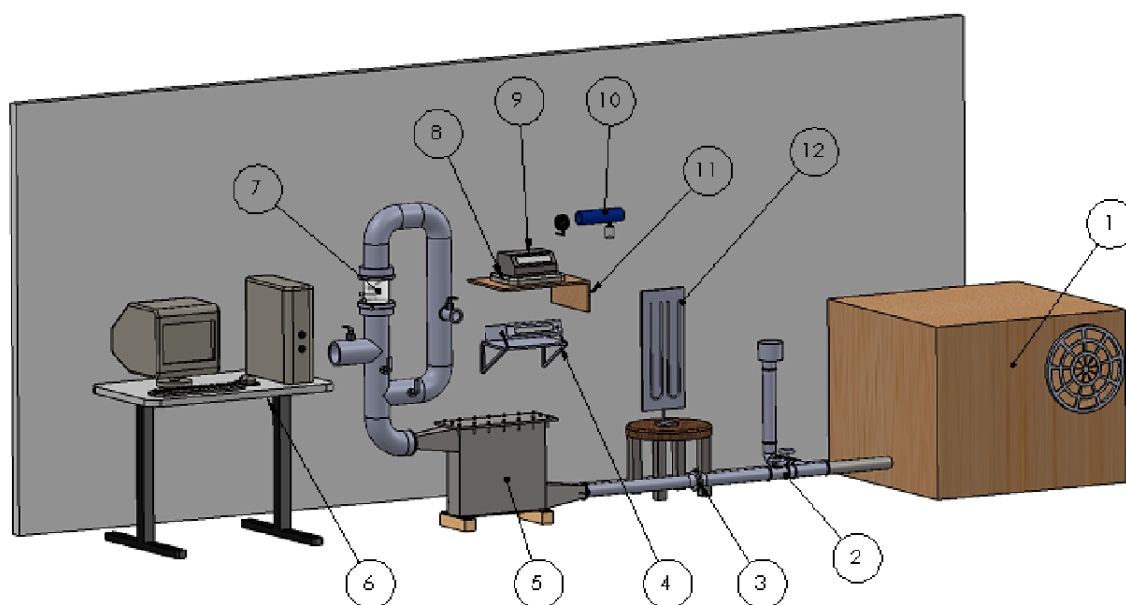
Propriedade	Referência
Massa específica: $\rho_s = 2160(1 + X)$ [Kg m^{-3}]	Calçada <i>et.al</i> (1994)
Área específica: $a = 294,81$ [m $^2g^{-1}$]	Perazzini (2014)
Volume específico do poro da partícula: $V_p = 0,40$ [cm $^3g^{-1}$]	Perazzini (2014)
Diâmetro médio do poro da partícula: $D_p = 5.43$ [nm]	Perazzini (2014)
Condutividade térmica específica no ponto de estagnação: $k_{ef} = 4.6 \pm 0.14$ [Wm $^{-1}K^{-1}$]	Perazzini (2014)

Fonte: Genaro (2021)

3.2 – Módulo de Secagem em Leito Fixo

O sistema simulado no modelo é baseado no módulo experimental ilustrado na Figura 3, instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A descrição dos componentes que constitui este equipamento se encontra na legenda da Figura 3. Genaro (2021) utilizou este mesmo módulo para realizar os experimentos que resultaram no desenvolvimento do *software* aqui aplicado.

Figura 3: Ilustração do módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (desenho fora de escala).



LEGENDA:

1	Isolamento Acústico do Soprador	7	Célula de secagem
2	By-Pass	8	Placa de aquisição de dados
3	Placa de Orifício	9	Digi-Sense
4	Controlador de Temperatura	10	Psicrômetro
5	Aquecedor de ar	11	Transdutor de pressão
6	Computador	12	Manômetro

Fonte: Genaro (2021)

Neste equipamento, o ar, fluído de secagem utilizado, é captado pelo soprador (1), e em sequência é aquecido (5) antes de passar pela célula de secagem (7). Entre o aquecedor de ar e a célula de secagem, encontra-se um sistema de tubulações acompanhadas por válvulas, que permite direcionar o escoamento do ar pela célula de forma ascendente ou descendente.

3.3 – Dados do Software de Simulação

Para solucionar o sistema de equações diferenciais parciais resultantes do modelo foi utilizado o Método das Linhas, que transformou o sistema em um conjunto de equações diferenciais ordinárias contínuas no tempo. O sistema resultante é contínuo no tempo e discreto no espaço, e os resultados são obtidos através da integração no tempo. (GENARO, 2021). A solução do sistema de EDOs foi obtido através da utilização do *software* MatLab® R2016a com o solver ode23s.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

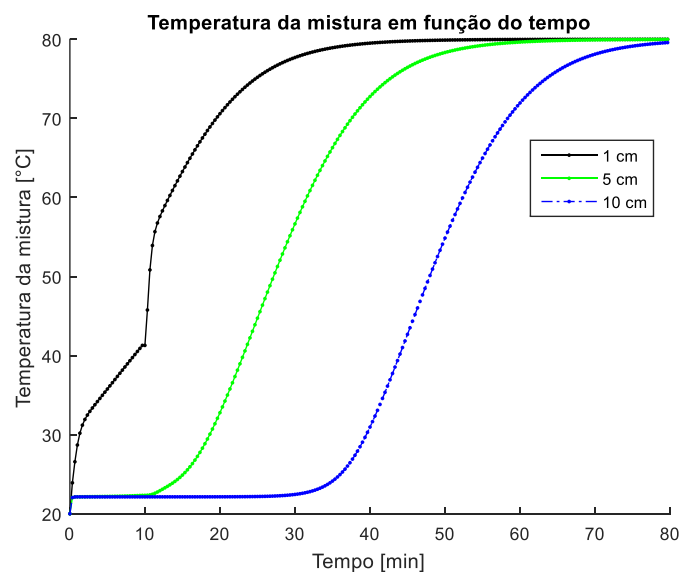
As simulações computacionais a serem discutidas nesta seção foram geradas a partir do script desenvolvido por Genaro (2021), para a secagem da Alumina a partir da umidade inicial de 0.45 kg de água/kg de sólido seco, até a umidade de equilíbrio. Como parâmetros, foram simuladas a temperatura de mistura e a umidade do sólido, em três diferentes posições do leito: a altura de 1 cm, a altura máxima do leito ($z = 10$ cm) e

a seção intermediária ($z = 5$ cm). Os quatro cenários simulados foram feitos com as combinações: de secagem sem reversão e com reversão com intervalos de $\Delta t = 10$ minutos; de secagem com degrau positivo de 60°C para 80°C após 10 minutos e secagem com degrau negativo de 80°C para 60°C após decorridos 10 minutos do processo.

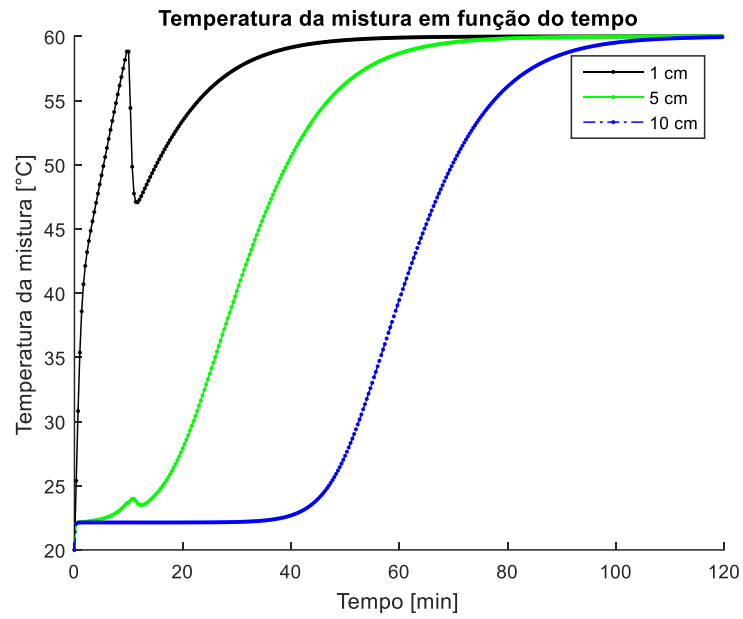
4.1 – Secagem Com Vazão Ascendente

Nas Figuras 4 e 5, podem ser observados os resultados obtidos para a temperatura de mistura e para a umidade ao longo do processo na secagem convencional para o degrau positivo e para o degrau negativo, ambos aplicados 10 minutos após o início da simulação.

Figura 4: Temperatura da mistura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente. Degrâu de 60°C para 80°C (a) e degrâu de 80°C para 60°C (b).



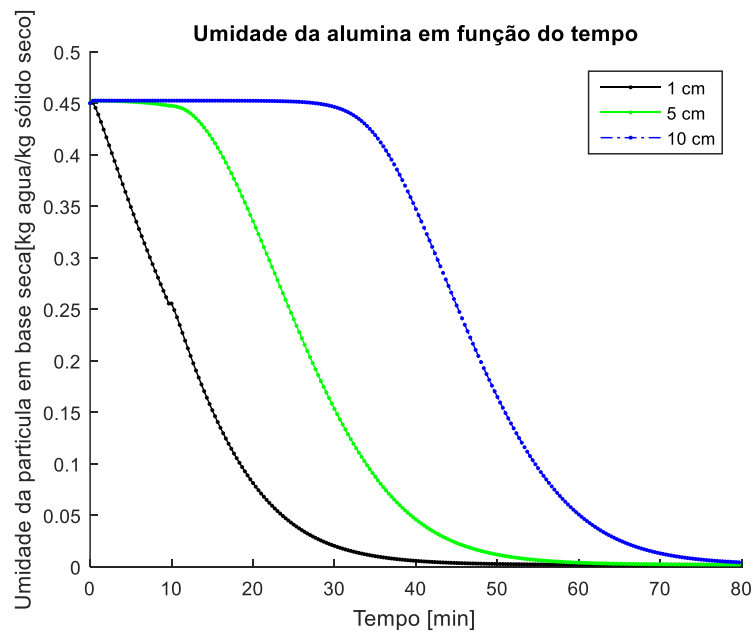
(a)



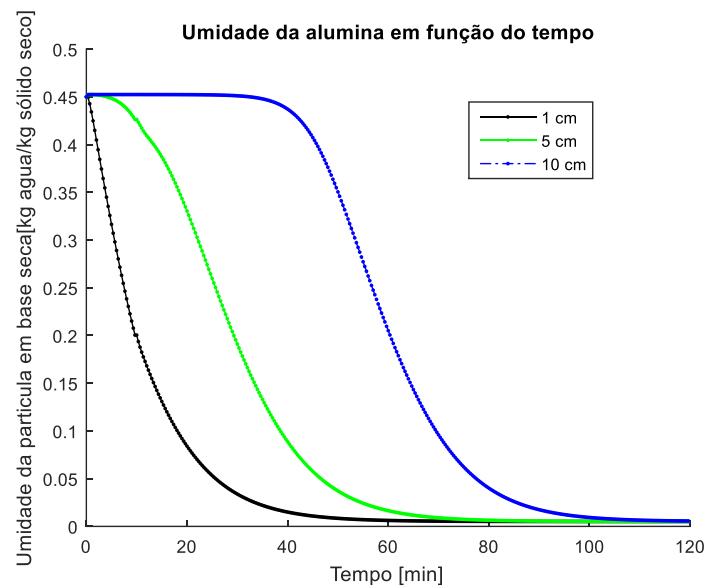
(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 5: Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente. Degrau de 60°C para 80°C (a) e degrau de 80°C para 60°C (b).



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com a análise de ambas as simulações da temperatura (Figura 5) pode-se notar que a secagem com o degrau negativo possui um aquecimento inicial mais acentuado do que o processo com degrau positivo, atingindo rapidamente um pico local de $58,8^{\circ}\text{C}$. Isso é de se esperar, uma vez que a temperatura mais alta do ar de entrada no início do processo (80°C para o degrau negativo e 60°C para o degrau positivo) acarreta um aquecimento mais acelerado nesta etapa.

Contudo, após a aplicação do degrau negativo em $t = 10$ minutos (Figura 4b), observa-se uma brusca diminuição na temperatura do sistema por um curto período, após o qual a temperatura retorna a aumentar. Esse fenômeno possivelmente se deve à diminuição da temperatura do ar de secagem que está em contato com as esferas de alumina nas posições mais próximas à entrada. Embora o ar entre no secador a 60°C , a presença de umidade do sólido causa não só a evaporação da água, mas também um resfriamento no ar e no leito. Para possibilitar que a água na superfície da alumina seja evaporada é necessário que seja fornecida energia na forma de calor latente, que é transferida a partir do ar seco, o que acaba por resfriando-o. Isso resulta no contato posterior entre ar de secagem e sólido, onde o primeiro está a uma temperatura inferior à

do segundo e acaba por resfriar o leito como um todo por um curto período. Contudo, conforme o sólido seca o sistema retorna a sofrer incrementos na temperatura até o fim do processo.

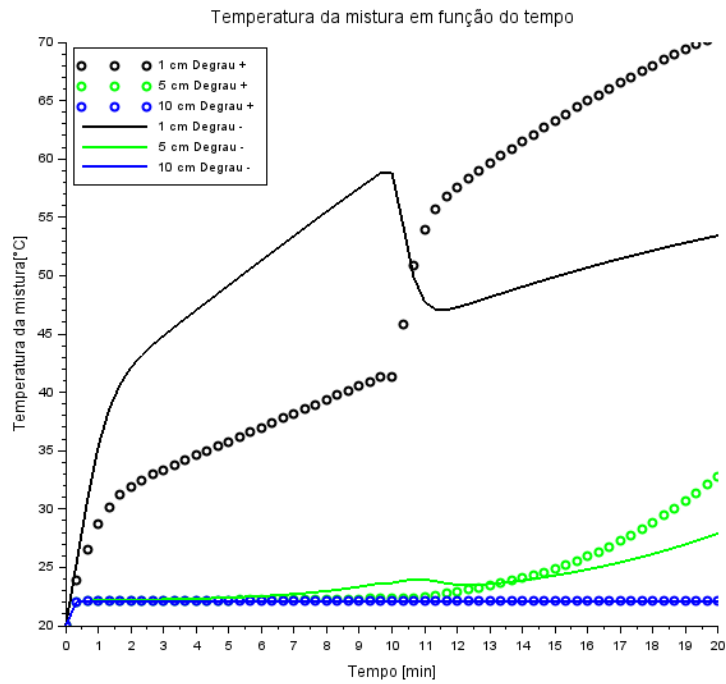
Diferentemente da situação anteriormente citada, o sistema que sofre o degrau positivo apresenta um notável incremento na velocidade de aumento da temperatura após a aplicação do degrau, como esperado, e nenhuma queda na temperatura após a variação de temperatura.

Em relação à umidade do sólido nota-se que, para a simulação com o degrau negativo, a umidade diminui de forma mais acentuada na entrada do sistema durante o início da secagem. Assim como para a temperatura, essa redução de umidade acentuada se deve à maior temperatura do ar de entrada no processo, uma vez que maiores temperaturas promovem um aumento na transferência de massa de água da alumina para o ar, através do incremento no coeficiente convectivo.

Outro ponto importante a se notar é que, nos dois casos, o tempo total de secagem foi menor para o sistema que sofre o degrau positivo se comparado com o sistema de degrau negativo. Como, na primeira situação, o ar de secagem passa a maior parte do processo com uma temperatura de 80°C, espera-se que a secagem seja mais rápida ao ser comparada com o processo de degrau negativo, que possui o ar de secagem majoritariamente a 60°C. Essa diferença de temperatura resulta em uma maior taxa de transferência de massa entre fases no sistema que sofre o degrau positivo na temperatura.

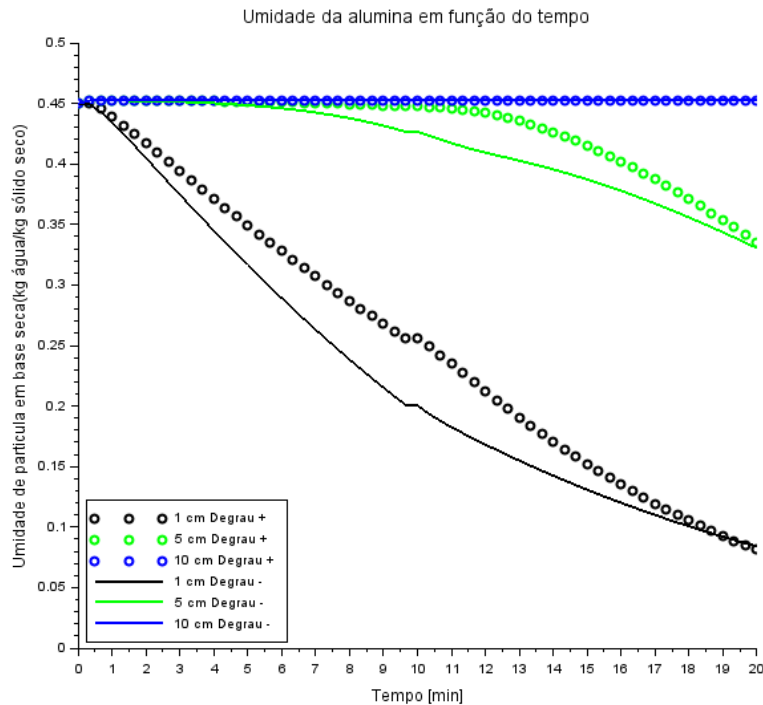
Ao se limitar a análise aos primeiros 20 minutos do processo, como ilustrado nas Figura 6 e 7, pode-se analisar a diferença entre os dois métodos de aplicação do degrau na temperatura. Como mencionado acima, a temperatura de mistura sofre incrementos mais acentuados nos primeiros 10 minutos, e em seguida, desacelera o aquecimento no degrau negativo. O comportamento oposto pode ser observado na secagem com degrau positivo. Contudo, analisando a simulação da umidade, concluiu-se que ambos os métodos de aplicação do degrau são equivalentes na secagem do material e resultam em sistemas similares após os 20 minutos. Portanto, para a secagem convencional, não há diferença no tipo do degrau aplicado. Se aplicados na metade do tempo total do processo, ambos causam as mesmas alterações no sistema.

Figura 6: Temperatura da mistura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente truncada em 20 minutos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 7: Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e vazão ascendente truncada em 20 minutos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

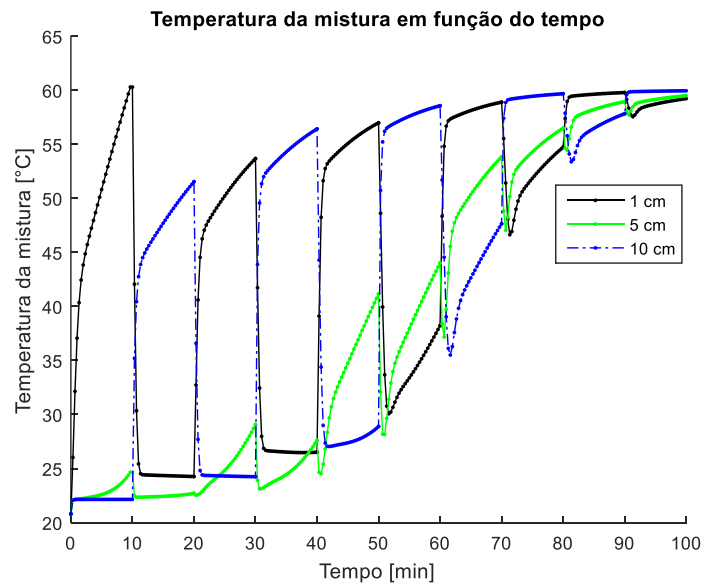
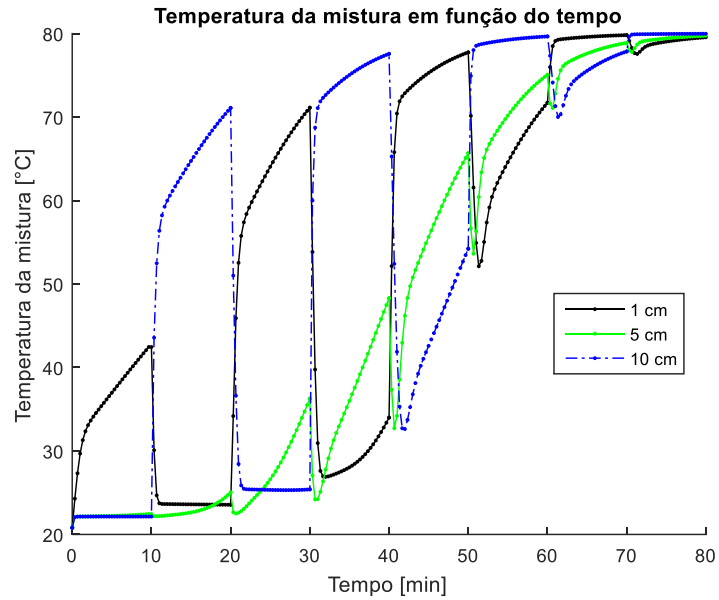
4.2 – Secagem Com Reversão na Vazão

Na Figura 8 observa-se perfis característicos da reversão da vazão de ar na secagem, similares aos observados por Genaro (2021) e Albin (2019), caracterizados pela queda abrupta da temperatura nas seções mais próximas à entrada do ar após cada reversão. Esse comportamento se relaciona a esse tipo de secagem, uma vez que, diferentemente do processo convencional, são criadas duas frentes de secagem no sistema ao mesmo tempo, que se iniciam as extremidades do equipamento. Assim, a umidade fica concentrada na seção média do leito e as extremidades passam pela secagem de forma alternada, o que causa grandes variações na temperatura do sistema a cada reversão. A amplitude dessas variações diminui com o avanço do processo e com a expansão das duas frentes de secagem.

É importante notar que, como observado por Barbosa (2022), a alumina úmida possui uma grande quantidade de umidade fracamente ligada, o que facilita a adsorção de umidade durante as reversões. De acordo com o autor, essa característica do material acarreta uma maior oscilação na temperatura, se comparada com partículas orgânicas. Este fenômeno ocorre em função da reumidificação das partículas após cada reversão (que é mais intensa para as esferas de alumina do que no material orgânico), o que leva o sistema a utilizar uma maior parte do calor fornecido pelo fluido de secagem como calor latente. Isso resulta em uma menor calor utilizado para manter a elevação da temperatura obtida anteriormente (BARBOSA, 2022).

A presença dos degraus de temperatura acentua os efeitos da primeira reversão, que ocorre concomitantemente à aplicação do degrau. Esse efeito fica mais evidente na Figura 8b, onde é visível que, nos primeiros 10 minutos, a temperatura na altura de 1 cm cresce de maneira brusca, ultrapassando o valor do estado estacionário (atinge $60,3^{\circ}\text{C}$). Este comportamento se deve à alta temperatura do ar de entrada, que intensifica o gradiente de temperatura no leito. Esse gradiente é lentamente reduzido ao longo da secagem, conforme as frentes de secagem concentram a umidade restante na porção central do leito ($z = 5 \text{ cm}$).

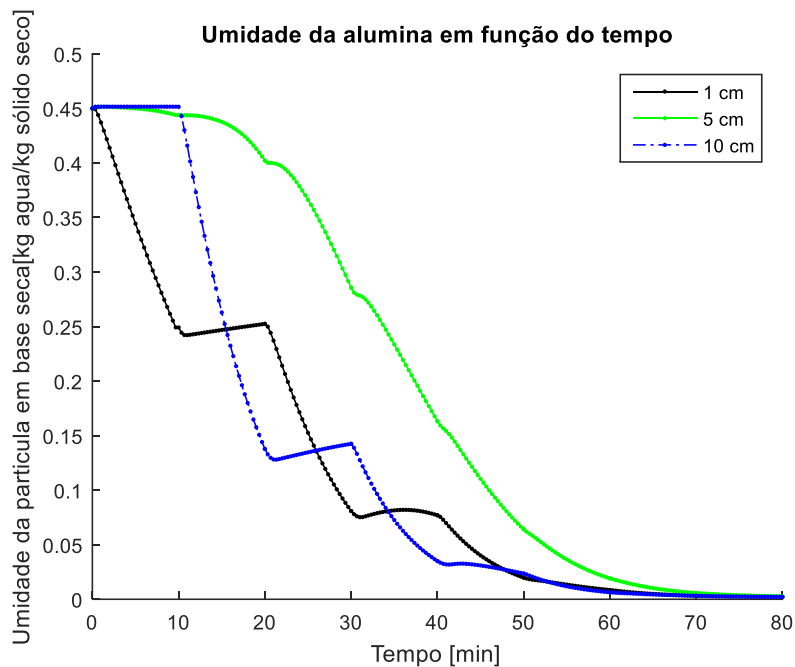
Figura 8: Temperatura em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão de ar com $\Delta t = 10$ minutos. Degrau de 60°C para 80°C (a) e degrau de 80°C para 60°C (b).



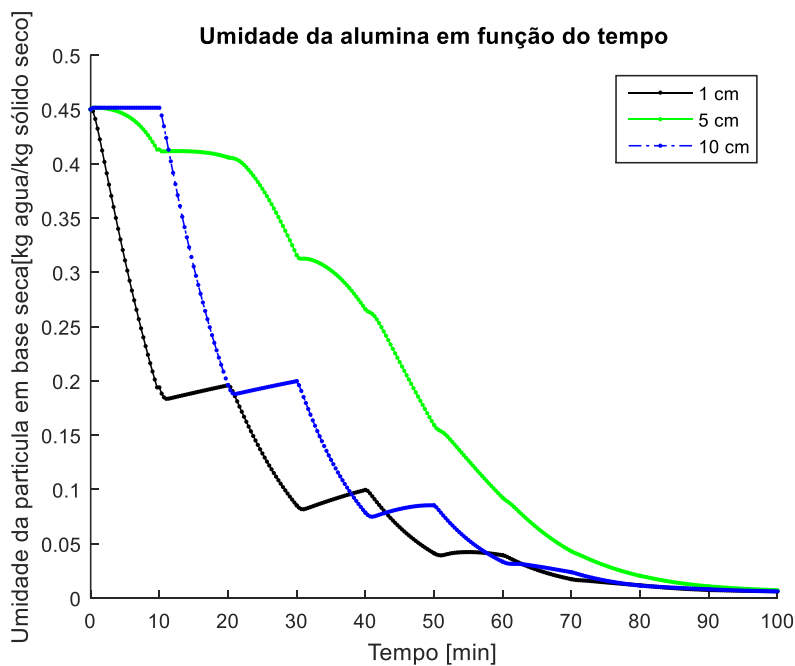
Fonte: Elaborado pelo Autor

A principal influência do degrau de temperatura é apresentada pela variável de umidade da alumina. Como mostrado na Figura 9, o processo que recebe o degrau negativo sofre uma queda significativamente mais rápida da umidade na posição inferior do sistema ($z = 1$ cm), assim como ocorre na secagem convencional. Contudo, paralelamente, a umidade na porção superior do equipamento ($z = 10$ cm) é menor na simulação com o degrau positivo do que com o degrau negativo, enquanto a seção intermediária ($z = 5$ cm) é semelhante nos dois casos.

Figura 9: Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão de ar com $\Delta t = 10$ minutos. Degrâu de 60°C para 80°C (a) e degrâu de 80°C para 60°C (b).



(a)

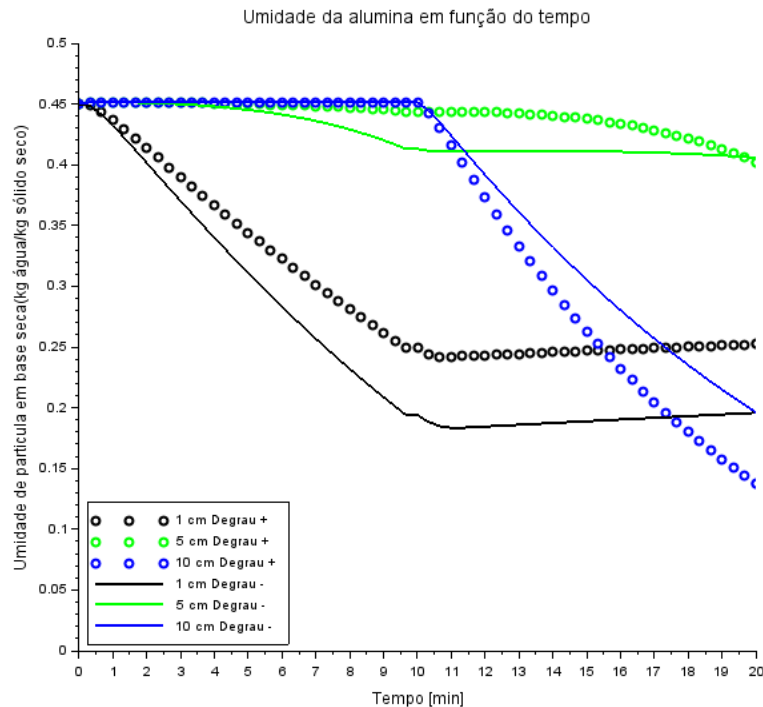


(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Se a análise for restringida aos primeiros 20 minutos da secagem (Figura 10), torna-se evidente que o calor que, no degrau positivo é usado para secar a parte superior do leito, é utilizado no sistema de degrau negativo para reduzir a umidade na porção inferior. Desse modo, o degrau negativo gera uma configuração de umidade muito mais uniforme, com duas frentes de secagem praticamente simétricas em relação à porção central do equipamento, se comparada ao sistema que passa pela variação positiva na temperatura. Isto implica em uma uniformidade maior no leito para esse caso.

Figura 10: Umidade do sólido em função do tempo com degrau aplicado em $t = 10$ minutos e reversão da vazão com $\Delta t = 10$ minutos, truncada em 20 minutos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

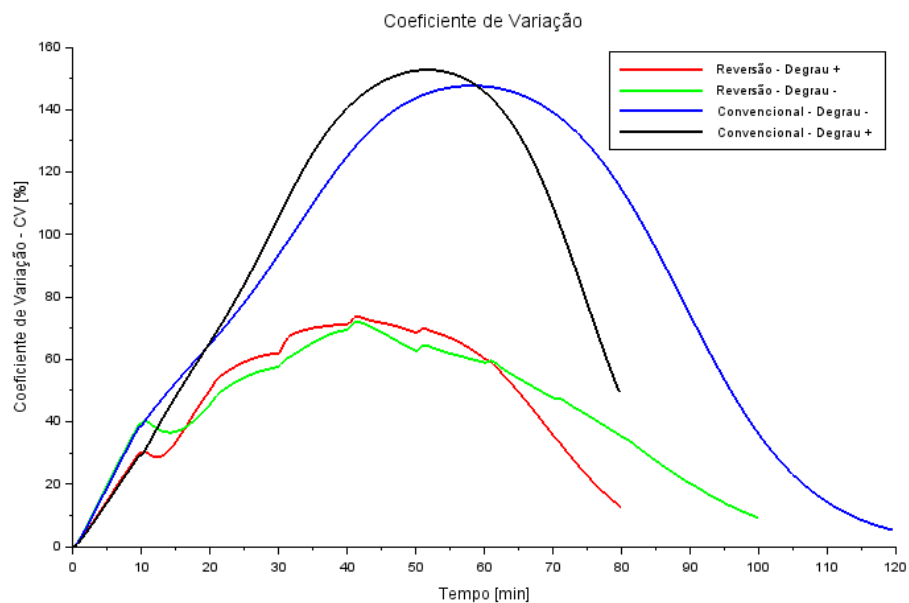
4.3 – Coeficiente de Variação para a Umidade

Na Figura 11a, observa-se, primeiramente, que as secagens com reversão do ar possuem, de forma geral, um coeficiente de variação inferior ao dos processos convencionais, concordando com o relatado por Genaro (2021) para esse tipo de sistema. Além disso, ao se limitar a análise aos primeiros 20 minutos do processo, é possível afirmar que a aplicação do degrau negativo resultou em uma menor variação ao longo o do leito entre todos os cenários testados. Isto permite concluir que, para obter-se uma secagem mais uniforme, é recomendado que o processo seja iniciado a uma temperatura maior e finalizado a uma temperatura menor.

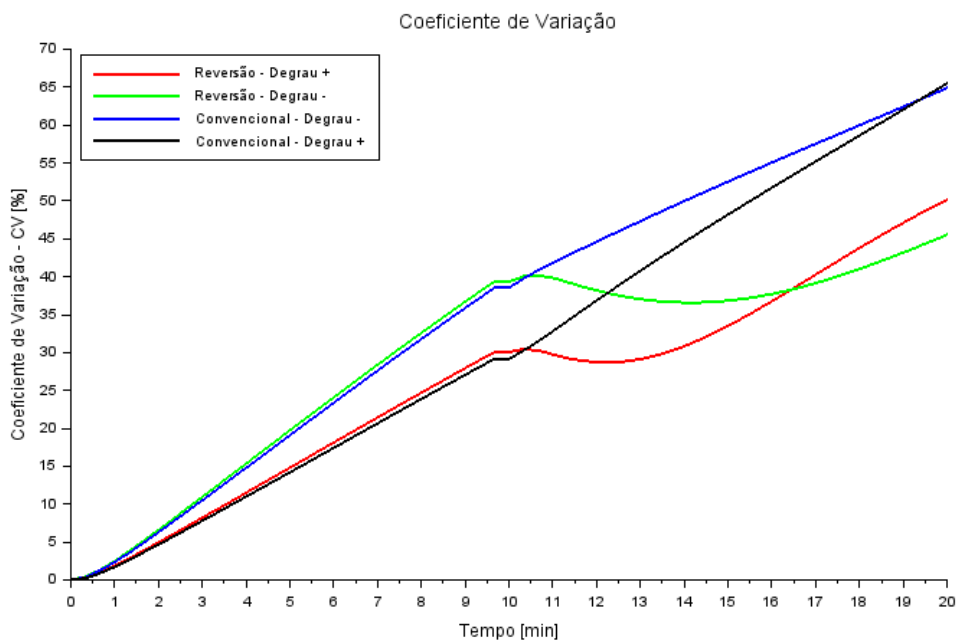
Possivelmente este fenômeno se deve ao fato de que, no início do processo, a energia fornecida pelo ar de secagem é utilizada tanto para secar a alumina quanto para aumentar a temperatura do leito. Desse modo, utilizar primeiramente uma temperatura

mais alta significa acelerar a etapa de aquecimento do leito, que é lenta e requer energia. Isto resulta em uma retirada rápida da água em excesso, fracamente ligada às esferas de alumina (Genaro, 2021), e gera menos perturbações na temperatura e umidade do leito, tornando-o mais homogêneo.

Figura 11: Coeficiente de variação em função do tempo para a secagem com e sem reversão e com degrau positivo e negativo: para o tempo total (a) e para os primeiros 20 minutos (b).



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

5 – CONCLUSÃO

Com base na análise das simulações realizadas para a secagem da alumina em leito fixo através do Software de MatLab, pode-se concluir que a aplicação do degrau de temperatura não causa efeitos positivos ou negativos na secagem em leito convencional. Contudo, também foi verificado a utilização desse tipo de variação de temperatura em conjunto com a reversão de ar resulta em uma maior homogeneidade do leito após a secagem, o que torna o processo uma valiosa alternativa à secagem tradicional quando se tem como objetivo atingir uma umidade com menor variação através do leito. Fazer uso da secagem com reversão em combinação com o degrau negativo na temperatura forneceu menores valores no coeficiente de variação de umidade do leito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BARBOSA, L S. 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. Tese – Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2022.

BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. *Drying Technology*, v. 32, n. 10, p. 1127–1141, 2014.

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>.

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

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts – An overview. *Bioresource Technology*, v. 90, n. 3, p. 285–295, 2003.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 50, n. 5, p. 441– 464, 2010.

GENARO, L. B.; Leito fixo com reversão do ar de secagem: Estudo experimental e numérico da secagem de alumina. Tese – Mestrado em Engenharia Química. 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.

- IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; MARTINEZ, G.; LOPEZ, A.; VÍRSEDA, P.** Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*. Vol 59. p. 151-160, 2003.
- JOHANN, G.; SILVA, E.A.; LIMA, O.C.M.; PEREIRA, N.C.** Mathematical modeling of a convective textile drying process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 21. p. 959-965, 2014.
- 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.
- MASSARANI, G., SILVA TELLES, A.** Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: **FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M.** Tópicos especiais em secagem. São Carlos: Editora UFSCar, 1992.
- MUJUMDAR, A. S.** *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press / Taylor & Francis Group. 2006.
- PERAZZINI, H.** Secagem de sólidos porosos granulares. Tese – Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- 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.
- RUIZ-LÓPEZ, I. I., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E., COBOS-VIVALDO, R., HERMAN-LARA, E.** Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. *Journal of Food Engineering*, 2008, Vol. 89, p. 310-318.
- SILVA, F.R.G.B.; SOUZA, M.; COSTA, A.M.S.; JORGE, L.M.M; PARAÍSO, P.R.** Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. *Powder Technology*. Vol. 29. p. 61-70, 2012.
- 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, 2017.

ZIAEE, A.; ALBADARIN, A.B.; PADRELA, L.; FEMMER, T.; O'REILLY, E.; WALKER, G. Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches. European Journal of Pharmaceutical Sciences. v. 127. p. 300-318, 2019.