

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

**ANÁLISE DA MODELAGEM MATEMÁTICA SOBRE A  
SECAGEM DE ALUMINA EM LEITO FIXO ESPESSO**

**Mateus Araújo de Mello**

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 - SP**

**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: M.Sc. Guilherme Henrique Alves Pinto

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de começar agradecendo ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Bentes Freire que me aceitou mesmo já tendo outros quatro alunos para orientar e que foi sempre muito atencioso e presente durante todo trabalho.

Agradecer também ao Luan da Silva Barbosa que com certeza nos aprofundou de maneira brilhante no tema e nos guiou com tamanha maestria.

Agradecer aos meus pais, Francisco e Ana pelo amor incondicional e ao apoio durante todos esses anos de graduação.

Aos meus amigos e colegas que foram tão importantes em tantos momentos durante os anos, alguns com passagens breves, outros com passagens longas e que espero que ainda sejam duradouras, sem vocês não estaria onde estou.

Aos meus ídolos por me fazer acreditar em um amanhã melhor para todos. À música, à literatura, ao cinema, às artes em geral; hoje entendo mais do que nunca que as exatas e biológicas só são possíveis por conta das humanidades e que no fim das contas o homem só é humano quando existe o equilíbrio.

## RESUMO

O leito fixo é amplamente aplicado, estudado e reportado na literatura. Desde as torres de recheio encontradas na indústria química até os modernos leitos fixos com membranas usados na produção de hidrogênio, muitas foram as contribuições para que o estado da arte desse tipo de reator fosse alcançado. A secagem em leito fixo, em que o leito de partículas permanece imóvel enquanto o ar percola o meio poroso cedendo calor e absorvendo umidade, é mais utilizada quando se trata de grãos com sensibilidade ao impacto, mesmo assim, em pequena escala. Pode-se, entretanto, estender o conhecimento sobre processos de secagem em leito fixo para os secadores do tipo esteira rolante, além dos silos de armazenamento, no que diz respeito ao comportamento dinâmico. Diferentemente da secagem com movimentação do leito, a de leito fixo acentua os gradientes de temperatura e de umidade das partículas, sendo que essa não uniformidade é um efeito geralmente indesejado. A proposta de TG aqui resumida tem por objetivo fazer simulações de um modelo dinâmico da secagem de alumina em leito fixo, variando tanto as condições operacionais típicas quanto as dimensões do leito. Serão feitos, então, ensaios numéricos usando um programa em MatLab desenvolvido na área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar. Com os resultados das simulações pretende-se identificar tendências de mudança na magnitude dos gradientes internos frente às variações feitas no programa.

**Palavras-chave:** Secagem. Alumina. Simulação.

## **ABSTRACT**

The fixed bed is widely applied, studied and reported in the literature. From the stuffing towers found in the chemical industry to the modern fixed beds with membranes used in the production of hydrogen, many were the contributions to reach the state of the art of this type of reactor. Fixed bed drying, in which the bed of particles remains stationary while the air percolates through the porous medium, yielding heat and absorbing moisture, is more used when dealing with impact-sensitive grains, even so, on a small scale. However, knowledge about fixed bed drying processes can be extended to conveyor belt dryers, in addition to storage silos, with regard to dynamic behavior. Unlike drying with bed movement, fixed bed drying accentuates the temperature and humidity gradients of the particles, and this non-uniformity is a generally undesired effect. The Final Paper proposal summarized here aims to simulate a dynamic model of alumina drying in a fixed bed, varying both typical operating conditions and bed dimensions. Numerical tests will then be carried out using a MatLab program developed in the Particulate Systems area of DEQ/UFSCar. With the results of the simulations it is intended to identify trends of change in the magnitude of the internal gradients in face of the variations made in the program.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagens da superfície de esferas de alumina com diâmetros de 4,00 mm (a) e 3,35 mm (b) e (c) imagens de esferas de alumina de 3,2 mm.....	14
Figura 2: Ilustração simplificada de um silo secador em Leito Fixo. ....	15
Figura 3: Gráfico da curva de secagem. ....	17
Figura 4: Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material. ....	18
Figura 5: Duas fases (sólida e fluida) na secagem de leito fixo no modelo de Massarani e Teles. ....	23
Figura 6: Módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (fora de escala). ....	27
Figura 7: Temperatura do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem .....	33
Figura 8: Temperatura do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) $T_f(z=0)=100^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T_f(z=0)=120^{\circ}\text{C}$ .....	33
Figura 9: Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem .....	34
Figura 10: Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) $T_f=100^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T_f=120^{\circ}\text{C}$ .....	34
Figura 11: Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem .....	35
Figura 12: Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) $T_f=100^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T_f=120^{\circ}\text{C}$ .....	36
Figura 13: Taxa de secagem da partícula em função do tempo. ....	36
Figura 14: Taxa de secagem da partícula em função da umidade.....	37
Figura 15: Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) vazão nominal; (b) metade da vazão nominal; (c) dobro da vazão nominal .....	38
Figura 16: Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) vazão nominal; (b) metade da vazão nominal; (c) dobro da vazão nominal .....	39
Figura 17: Umidade do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) vazão nominal; (b) metade da vazão nominal; (c) dobro da vazão nominal .....	40
Figura 18: Umidade da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm .....	41
Figura 19: Temperatura da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm .....	41
Figura 20: Temperatura do ar de secagem em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm.....	42
Figura 21: Umidade da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm .....	42
Figura 22: Temperatura da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm .....	43
Figura 23: Temperatura do ar de secagem em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm.....	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados de operação para a simulação do processo de secagem .....	32
--	----

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam alumina para estudos de secagem em leito fixo e de transporte de calor, massa e momento. ....	13
Quadro 2: Propriedades físicas e térmicas da alumina. ....	25

## NOMENCLARUTRA

### LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
T	Temperatura	[ $\theta$ ]
$T_s$	Temperatura da fase sólida	[ $\theta$ ]
$T_f$	Temperatura da fase fluida	[ $\theta$ ]
$T_{mix}$	Temperatura da mistura entre fases sólida e fluida	[ $\theta$ ]
UR	Umidade relativa	[-]
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]
$\Delta t$	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	[ $M L^{-2} t^{-1}$ ]
$C_{pf}$	Calor específico do ar seco	[ $L^2 t^{-2} \theta^{-1}$ ]
$C_{ps}$	Calor específico da fase sólida	[ $L^2 t^{-2} \theta^{-1}$ ]
$C_{pv}$	Calor específico do vapor d'água	[ $L^2 t^{-2} \theta^{-1}$ ]

$C_{p1}$	Calor específico da água líquida	$[L^2 t^{-2} \theta^{-1}]$
$P$	Pressão absoluta	$[M L^{-1} t^{-2}]$
$P_{ab}$	Pressão do vapor de água na temperatura do ar	$[M L^{-1} t^{-2}]$
$P_{sat}$	Pressão do vapor de água saturado	$[M L^{-1} t^{-2}]$
$k$	Constante de secagem	$[t^{-1}]$
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[M t^{-3} \theta^{-1}]$
$f$	Taxa de Secagem	$[M M^{-1} t^{-1}]$

### LETRAS GREGAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\rho$	Massa específica	$[M L^{-3}]$
$\lambda$	Calor específico de vaporização	$[L^2 t^{-2}]$
$\varepsilon$	Porosidade do leito	$[-]$

<b>Subscrito</b>	<b>Descrição</b>
$f$	Fase fluida
$s$	Fase sólida

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1. Alumina .....	12
2.2. SECAGEM EM LEITO FIXO .....	14
2.3. SECAGEM EM CAMADA FINA .....	16
2.3.1. MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS E NÃO EMPÍRICOS DE SECAGEM EM CAMADA FINA .....	18
2.3.2. MODELO DIFUSIVO PARA A SECAGEM EM CAMADA FINA .....	20
2.4. MODELO DE DUAS FASES DE MASSARANI E TELES .....	22
2.5. ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL SOBRE A SECAGEM DA ALUMINA .....	24
3 MODELAGEM E MÉTODOS .....	25
3.1. MATERIAIS .....	25
3.1.1. ALUMINA .....	25
3.1.2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL .....	26
3.2. SECAGEM EM CAMADA ESPESSA .....	27
3.3. MODELO DE DUAS FASES PARA SECAGEM EM LEITO FIXO ESPESSE .....	28
3.3.1. CONDIÇÕES DO AR DE SECAGEM .....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	31
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços na informática e na eletrônica mudaram tanto a facilidade quanto o ritmo da tomada de decisões em projetos de várias escalas. A indústria vem aplicando tecnologias de ponta para atender a demanda de redução do consumo de energia e aumento da eficiência. Nesse contexto, o termo “Indústria 4.0” sugere sistemas autônomos e inteligentes, capazes de prever falhas e se adaptar às mudanças na produção. No contexto da engenharia, isso é possível por meio de sistemas de aquisição de dados em tempo real, algoritmos de tomada de decisão, automação de processos, sistemas de controle, simulação e otimização. O desenvolvimento dessas tecnologias requer, como ponto de partida, uma descrição matemática confiável dos processos.

Dentre os processos e operações unitárias encontrados em aplicações no setor produtivo, a secagem é uma etapa de produção nas indústrias química, têxtil, alimentícia, farmacêutica e de beneficiamento de grãos e sementes. A secagem industrial visa fornecer um produto mais leve e de qualidade uniforme, melhorando o transporte, o armazenamento e a preservação das características físico-químicas do material, aumentando, assim seu tempo de prateleira. A secagem é um processo de alta demanda energética, respondendo por 5-33% do uso total de energia industrial na maioria dos países industrializados, independentemente do tipo de aplicação (GENARO, 2021). O alto custo da energia para aquecimento do ar de secagem juntamente com a energia gasta por sopradores, necessária para forçar o escoamento do ar, precisa ser otimizado de tal forma que o processo seja economicamente viável.

Na secagem em leito fixo, as partículas úmidas são empacotadas dentro de uma coluna, geralmente de formato cilíndrico, que promove o contato sólido/fluido. O ar de secagem percorre o leito de partículas, percolando o meio poroso e estático. Nesse processo, o ar quente transfere energia na forma de calor para o material úmido, sendo que o excesso de água que evapora é transferido do interior das partículas para o fluido em movimento. A secagem em leito fixo proporciona menor atrito mecânico do material se comparada à secagem por fluidização, por jorro ou por vibrofluidização, outros modos de operação de leitos. Se por um lado, isso é uma vantagem do leito fixo, por

outro, a operação gera gradientes significativos de temperatura e umidade uma vez que não há mistura de sólidos. Essa questão precisa ser monitorada para não comprometer a qualidade do produto final. O leito fixo opera somente em batelada, podendo ser adequado na produção em pequena escala de sólidos sensíveis ao atrito mecânico, além de ser uma interessante célula de estudo dos mecanismos de transferência de calor e de massa. Esses estudos podem perfeitamente gerar conhecimento, por exemplo, para a secagem em esteira rolante, que caso fosse possível seria uma espécie de leito fixo operando continuamente. O objetivo deste Trabalho de Graduação foi fazer simulações de um modelo dinâmico da secagem de alumina em leito fixo, variando tanto as condições operacionais típicas quanto as dimensões do leito. A partir dos ensaios numéricos usando um programa em MatLab desenvolvido na área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar, foram analisados os efeitos das variações de altura do leito, vazão mássica do ar de secagem, diâmetro do leito e temperatura do ar de entrada na dinâmica da secagem. Com os resultados das simulações, foi possível identificar tendências de mudança na magnitude dos gradientes internos frente às variações implementadas no programa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O conjunto de trabalhos que forneceu a base para o entendimento do tema abordado é apresentado a seguir. A principal referência para o presente trabalho foi a dissertação de Mestrado da aluna do PPGEQ/UFSCar Luana Boger Genaro. As demais complementam partes específicas do desenvolvimento.

### **2.1. ALUMINA**

O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), também conhecido como alumina, está presente em um minério natural de cor vermelha, a bauxita, que é utilizada para a produção do alumínio (HIND et al., 1999) quando o teor da bauxita se encontra entre 50% e 55% (SAMPAIO et al., 2005), por razões de viabilidade econômica.

Fora a produção de alumínio, a alumina quando está em sua forma ativada possui características como: elevada porosidade, estabilidade térmica, área superficial e propriedades mecânicas. Tais características possibilitam que seja utilizada como adsorvente de fluoretos em tratamentos de água (ALVARINHO et al., 2000), dessecante, cromatografia, na formação de materiais refratários (HIND et al., 1999) e como suporte para catalisadores (ALVARENGA, 2013).

Alguns estudos envolvendo a alumina que foram utilizados aparecem no quadro 1. Esses estudos abrangem algumas características como transporte de massa, energia e momento. Como a alumina é um material inorgânico que apresenta propriedades físicas que não sofrem variações muito significativas durante o processo é possível reduzir a complexidade dos modelos matemáticos aplicados. As esferas de alumina são consideradas um grão modelo, pois favorecem as análises de mecanismos tanto internos quanto externos de transferência que são envolvidos na secagem (SOUSA, 2017).

**Quadro 1:** Alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam alumina para estudos de secagem em leito fixo e de transporte de calor, massa e momento.

<b>Referência</b>	<b>Descrição</b>
Calçada (1994)	Modelou e simulou a secagem de esferas de alumina em leito fixo com fluxo ascendente de ar e camada espessa.
Perazzini (2014)	Estudou a secagem em leito fixo em camada fina e espessa utilizando esferas de alumina. Também determinou isotermas de equilíbrio e caracterizou as partículas de alumina e o meio poroso.
Reis (2015)	Estudo de secagem da alumina em leito vibrofluidizado, também contemplando secagem em estufa e em camada fina de leito fixo.
Altino (2019)	Estudou a fluidodinâmica da secagem em leito fixo com materiais particulados com diversas características internas e externas (cevada, aveia, lentilha verde, soja e esferas de alumina) visando avaliar a sua influência no processo.
Genaro (2021)	Realizou um estudo experimental e numérico da secagem de

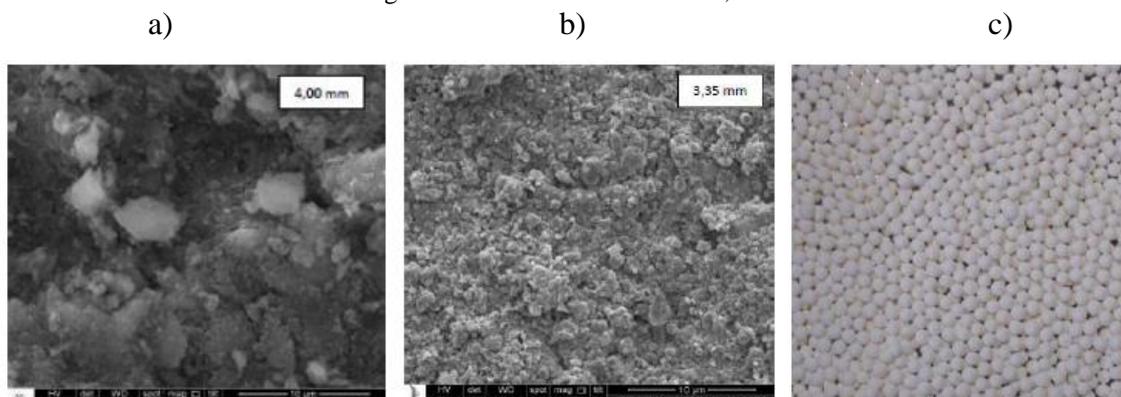
	alumina em leito fixo com reversão do ar de secagem
--	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesses estudos, a secagem foi analisada no contexto da fundamentação teórica, com foco nos diferentes mecanismos de transferência de calor e de massa.

Ainda assim, a análise feita na alumina pode ser estendida para grãos e sementes, identificando e entendendo as diferenças e, principalmente, se a água dentro do sólido é forte ou fracamente ligada à sua estrutura (SOUSA, 2017). Na Figura 1 são apresentadas imagens da superfície da alumina obtidas por microscopia eletrônica de varredura (1.a e 1.b) e imagens da esfera de alumina (1.c):

**Figura 1:** Imagens da superfície de esferas de alumina com diâmetros de 4,00 mm (a) e 3,35 mm (b) e (c) imagens de esferas de alumina de 3,2 mm



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

## 2.2. SECAGEM EM LEITO FIXO

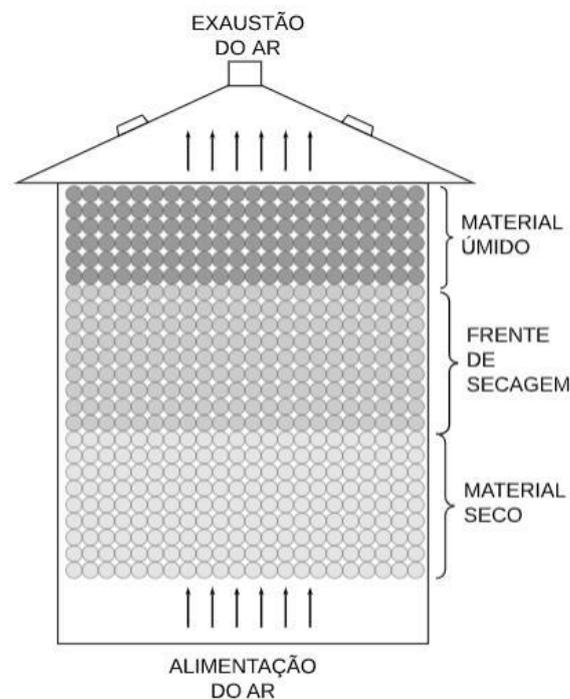
Os secadores de leito fixo são equipamentos simples e de fácil manutenção e ampliação de escala. Apresentam a vantagem em relação aos secadores de leitos móveis de não precisarem de energia adicional para movimentar os sólidos, garantindo, portanto, um custo de operação mais baixo. Entretanto, se por um lado ele impede o impacto mecânico do material particulado, por outro, ele se limita à operação em batelada, dificultando o aumento de produção (BARROZO et al., 2014; PRADO e SARTORI, 2011). Em alguns casos, principalmente envolvendo a secagem de sementes que são notoriamente sensíveis ao processamento, não há alternativa senão usar o leito fixo. Secadores tipo esteira rolante também têm características de leito fixo, mas operam

em contínuo, compartilhando modelos matemáticos semelhantes e sendo mais adequados para o setor produtivo.

O agronegócio é o setor produtivo cujas demandas incentivaram vários dos estudos desenvolvidos pela área de sistemas particulados do DEQ/UFSCar. No Brasil, cerca de 20% do Produto Interno Bruto é proveniente do agronegócio, que movimenta a economia e envolve grandes volumes de produto (MAPA, 2019). A secagem ainda apresenta nessa área processos realizados de forma artesanal e ineficiente, a produção é grande e o produto final, via de regra, possui baixo valor agregado, gerando desafios quanto à viabilidade econômica do processo (GENARO, 2021). A secagem natural a céu aberto em grandes terrenos é comum, assim como secadores rudimentares de ar aquecido ainda podem ser encontrados. O custo e a dificuldade de implantar novas técnicas é sempre uma questão que precisa ser levada em conta.

No leito fixo o ar quente percorre os espaços vazios deixados pelas partículas, ao passo que a massa sólida permanece parada. Observando-se a Figura 2, é possível identificar uma zona de transição chamada de frente de secagem onde o material úmido que fica próximo à entrada de ar quente é aquecido mais rapidamente e seca antes que o material que se encontra mais próximo do local de saída do ar (BARROZO et al., 2014).

**Figura 2:** Ilustração simplificada de um silo secador em Leito Fixo.



Fonte: Genaro (2021)

Na operação convencional com escoamento de ar apenas no sentido ascendente, ocorre a formação de gradientes de temperatura e de umidade como mostra os trabalhos de Souza (2013), Ratti e Mujumdar (1995) e Perazzini (2014). Gradientes significativos são indesejáveis, pois alteram as propriedades e a qualidade do produto final de uma batelada de secagem (RATTI e MUJUMDAR, 1995).

### 2.3. SECAGEM EM CAMADA FINA

A secagem delgada, ou em camada fina, em geral, é utilizada para que se possa analisar a influência da condição de operação (temperatura e velocidade do ar) nos mecanismos de transferência. O principal objetivo da análise em camada fina é a descrição matemática da cinética de secagem (BALA, 2017). Assim, através dos estudos da cinética de secagem em camada fina, é possível obter informações úteis a respeito dos principais mecanismos de transferência na secagem de determinado material, como apontado nos estudos de Sherwood (1929a; 1929b; 1930) e Lewis (1921). A secagem de sólidos é, em grande parte, controlada pelo grau de ligação da água com a estrutura interna da matéria (BUCKLIN et al., 2013). Segundo Kucuk *et al.* (2014), é possível usar os modelos de secagem em camada fina nas seguintes condições:

- Uma monocamada (produto único) é exposta às mesmas condições de secagem, velocidade do ar, umidade do ar e temperatura do ar.
- Uma multicamada do material se, em qualquer momento do processo, o estado termodinâmico permanecer o mesmo para temperatura e umidade do ar de secagem.

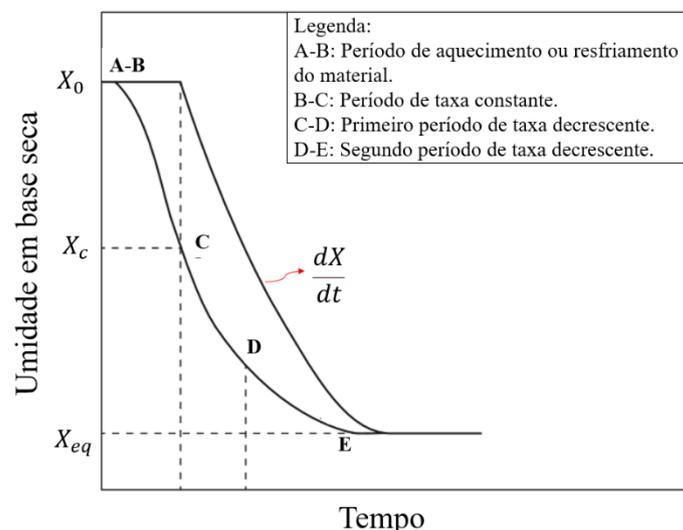
Conceitualmente, a camada fina é definida como uma espessura de leito em que não há variação mensurável das variáveis de estado, ou seja, das temperaturas e umidades em ambas as fases. Em outras palavras, de acordo com Vieira (2012) e Perazzini (2014), quando a secagem em leito fixo não apresenta gradientes axiais significativos de temperatura e umidade é descrita a condição de camada fina.

Sherwood (1929a; 1929b; 1930) descreve a remoção da água do interior de um material sólido para a sua superfície e em seguida para o ar aquecido da seguinte forma:

- Evaporação do líquido na superfície do sólido: a resistência a remoção de vapor da superfície é grande em relação à resistência difusiva no interior do sólido
- Evaporação na superfície do sólido: o interior do sólido apresenta maior resistência à difusão do líquido em relação à resistência superficial para a remoção de vapor.
- Evaporação no interior do sólido: a resistência interna do líquido à difusão é maior do que a resistência global de remoção do vapor de água.

Além de haver simultaneamente mais de um mecanismo agindo durante a secagem, Sherwood (1929a; 1929b; 1930) ressalta que mesmo partindo de condições iniciais de umidade iguais, um material pode secar por mecanismos diferentes dependendo das condições do ar. Para materiais com líquido em sua superfície, por exemplo, é possível observar em um primeiro momento uma resistência de transferência semelhante ao de evaporação do líquido na superfície do sólido, como mostram as Figuras 3 e 4, com período de taxa de secagem constante. Com o passar do tempo, o processo se encaminha para os outros dois estágios com a diminuição da umidade líquida presente na superfície do sólido, ocorrendo então tanto a evaporação na superfície do sólido quanto a evaporação no interior do sólido. Nesta etapa, podemos observar, na Figura 4, que ocorre a passagem do período de taxa constante para o período de taxa decrescente. A umidade crítica do material ( $X_c$ ) é a umidade do material que corresponde ao início do período de taxa decrescente (SHERWOOD, 1929b).

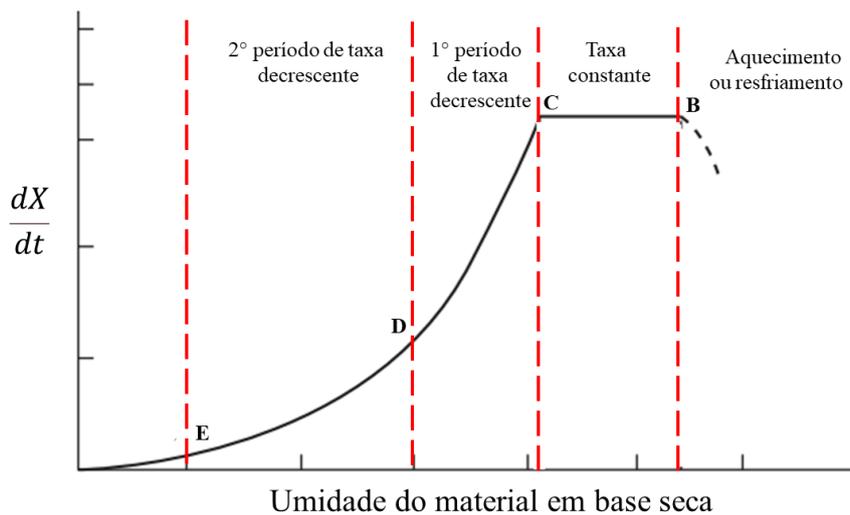
**Figura 3:** Gráfico da curva de secagem.



Fonte: Genaro (2021).

A taxa de secagem decrescente pode ser dividida em duas etapas. Em um primeiro momento ocorre a diminuição da umidade na superfície molhada, já num segundo estágio é a difusão da umidade no interior do material que controla o processo como podemos observar pelas figuras 3 e 4. A análise da secagem em camada fina serve essencialmente para revelar os diferentes estágios supracitados, tal que em cima desse conhecimento, sejam ajustados modelos matemáticos para a cinética de secagem.

**Figura 4:** Gráfico da taxa de secagem em função da umidade do material.



Fonte: Genaro (2021).

### 2.3.1. MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS E NÃO EMPÍRICOS DE SECAGEM EM CAMADA FINA

O modelo de Lewis (1921) ou, como também é conhecido, modelo de Newton, relaciona a transferência de massa com a Lei de Resfriamento de Newton, fazendo uma analogia com a transferência de calor por convecção. Neste modelo, a diferença entre a umidade do material em um dado instante e a umidade de equilíbrio é proporcional à taxa de secagem (Equação 1).

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

A constante de secagem  $k$  engloba as diversas características que definem o contato sólido/fluido, e as resistências de ambas as fases, sendo para a transferência de massa o que o coeficiente convectivo é para a transferência de calor. Ela é ajustada a partir de dados experimentais. Resolvendo a equação diferencial através de uma integração multiplicada por uma função exponencial em ambos os lados da equação, obtém-se o modelo de Lewis:

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

Esse foi o modelo usado nas simulações. A partir de pequenas mudanças no modelo de Lewis, são obtidos os modelos empíricos de Page (1949) e de Overhults (também conhecido como Page Modificado), onde os parâmetros  $k$  e  $n$  perdem seu significado físico (ERBAY e ICIER, 2010). Os modelos de Page e de Overhults são dados, respectivamente, pelas Equações 3 e 4:

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

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

Cada grão e semente se ajusta a uma equação de cinética de secagem. Para alguns grãos foi utilizada inicialmente a Equação 5, a seguir, que representa o modelo de Henderson e Pabis (1961). Este modelo tem sua origem na segunda Lei de Fick da Difusão, e é obtido pelo truncamento da série infinita no primeiro termo da Equação 12. Associando-se um pequeno erro a este primeiro termo da série, é possível utilizar a equação quando o tempo de secagem for suficientemente grande (ERBAY e ICIER, 2010).

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a \exp(-kt) \quad (5)$$

Como já mencionado, nos modelos de cinética, a constante de secagem  $k$  reflete os processos característicos dos fenômenos de transferência de massa internos e externos. O parâmetro  $k$  está relacionado com a temperatura e pode ser dado pela Equação 6 do tipo Arrhenius, para os modelos de Lewis (1921), Page (1949) e Henderson e Pabis (1961).

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Já para a correlação de Overhults utiliza-se a equação 7:

$$k = \exp\left(k_0 + \frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Esses modelos são simples e de fácil solução, mas não descrevem a cinética de secagem de alguns grãos e sementes, podendo-se citar aqui a cevada. Nesses casos, costuma-se usar o modelo difusivo truncado.

### **2.3.2. MODELO DIFUSIVO PARA A SECAGEM EM CAMADA FINA**

O modelo difusivo é baseado na segunda Lei de Fick da difusão. Em coordenadas esféricas, a equação diferencial parcial do modelo difusivo é dada pela Equação 8, válida no domínio  $0 < r < R$ . Esta equação pode ser encontrada em diversos trabalhos da literatura, podendo-se citar Arrieche (2007), Barrozo et al., (2006), Gastón et al., (2002) e Giner e Mascheroni (2001).

Para o modelo difusivo tradicional, que nos permite estimar a umidade média de uma partícula ao longo do tempo, são feitas algumas considerações:

- Formato da partícula esférico;
- Encolhimento desprezível;
- Difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) constante;
- Transporte de massa unidirecional

Das hipóteses acima, a Difusividade efetiva constante é a que mais costuma causar desvios, visto que esse parâmetro geralmente varia ao longo da secagem. Outros desvios podem ser causados por outros parâmetros também, como encolhimento que modifica os limites do modelo (fronteira móvel). Neste modelo, proposto por Crank (1975) para a Equação 8, aplicam-se condições iniciais explicitadas nas equações 9, 10 e 11, a fim de se obter uma solução analítica. Para tal solução, considera-se uma resistência interna predominante à transferência de massa, e, portanto, para números de  $Bim > 0,1$  (SANDER et al., 2001), considera-se que a umidade da superfície é equivalente à de equilíbrio durante a secagem (condição de contorno 1).

Assumindo-se esta primeira condição de contorno e uma condição de simetria em  $r=0$ , bem como a umidade inicial da partícula (Equação 9), obtêm-se a solução de Crank (1975) para a umidade média (Equação 12).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r}) \right] \quad (8)$$

**Condição inicial (t=0):**

$$X(r, 0) = X_0 \quad (9)$$

**Condição de contorno 1 (r=R):**

$$X(R, t) = X_{eq} \quad (10)$$

**Condição de contorno 2 (r=0):**

$$\frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \quad (12)$$

O modelo descrito acima é mais difundido na literatura para descrever a cinética de secagem em camada fina. A secagem da alumina ajusta-se bem à Equação de Lewis (2), as demais foram incluídas no texto somente para contextualizar com a secagem de grãos e sementes, que é de interesse prático.

#### 2.4. MODELO DE DUAS FASES DE MASSARANI E TELES

O modelo de duas fases de Massarani e Teles (1992) descreve a secagem em camada espessa levando em consideração os gradientes de temperatura e de umidade. A camada espessa, na área de sistemas particulados, é definida como uma altura em que os gradientes de umidade e temperatura são significativos. Por hipótese inicial, as fases são meios contínuos em contato dentro do secador. Calçada *et al.* (1994), Albin (2019) e Genaro (2021) usaram esse modelo para o secador de leito fixo espesso com e sem reversão de escoamento do ar.

O cerne deste modelo está na Teoria de Misturas de Truesdell (1957) e na proposição de Gurtin e Vargas (1971). Os materiais são divididos em duas porções na secagem, uma fase é sólida enquanto a outra é fluida, onde se trabalham os conceitos de umidade e temperatura em cada fase. As duas fases são consideradas como:

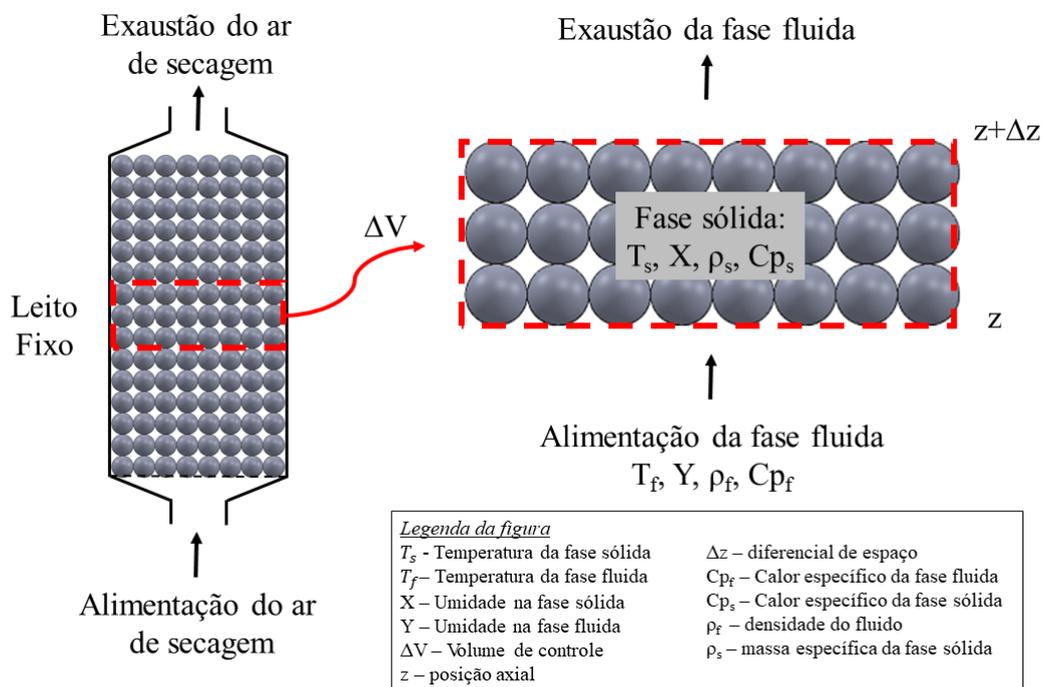
- Fase fluida: vapor de água e o ar de secagem;
- Fase sólida: matriz seca e água líquida.

No modelo de duas fases original, são utilizadas as equações de quantidade de energia, quantidade de movimento, conservação de massa, isotermas de secagem e equações constitutivas. Porém, como se trata de um modelo geral utilizado para diversos tipos de abordagem, é possível simplificá-lo a ponto de se utilizar o modelo

para várias configurações de secadores, incluindo o secador de leito fixo utilizado na simulação deste trabalho.

As duas fases do Modelo de Massarani e Teles são descritas na Figura 5 onde constam informações como:

**Figura 5:** Duas fases (sólida e fluida) na secagem de leito fixo no modelo de Massarani e Teles.



Fonte: Genaro (2021).

No estudo de Calçada *et al.* (1994), foram utilizadas esferas de alumina nos experimentos de secagem. Os autores concluíram que a temperatura do ar de entrada tem menor influência na cinética de secagem em camada fina do que a vazão do ar. Albini (2019) usou o modelo de Massarani e Teles para descrever a transferência de massa e calor em leito fixo de cevada com escoamento ascendente. O modelo foi simulado havendo nos resultados desvios entre 1,0% e 13,6% em relação aos dados

experimentais. No caso da cevada, o encolhimento do grão, desprezado no modelo, distanciou o resultado experimental do numérico.

Genaro (2021) desenvolveu e verificou experimentalmente um modelo para a secagem de alumina com e sem reversão do escoamento de ar numa mesma configuração de leito fixo que o utilizado por Albini (2019). A motivação para esse estudo foi obter um modelo para um sólido simples, que pudesse ser estendido para demais sólidos. Com isso, a alumina foi escolhida por ser perfeitamente esférica, por não encolher e por seus parâmetros físico-químicos permanecerem constantes ao longo da secagem. O uso da alumina permitiu que o foco do trabalho fosse principalmente na modelagem e na análise energética da técnica de reversão, visto que tanto o sólido quanto o equipamento em si (após mais de seis anos de desenvolvimento) fossem administrados com menos dificuldade que um aparelho novo.

## **2.5. ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL SOBRE A SECAGEM DA ALUMINA**

Os experimentos numéricos analisados no presente trabalho foram feitos a partir do programa MatLab gerado por Genaro (2021). Usando somente o módulo de operação convencional, ou seja, de escoamento ascendente, foram feitas simulações no MatLab@2015a. A alumina potencializa as taxas de transferência, principalmente de massa, por poder ser encharcada em sua matriz poroso com água fracamente ligada à estrutura do sólido. Dessa forma, a baixa resistência tanto para o sólido transferir umidade para o ar, quanto de o ar transferir umidade de volta para o sólido, faz com que as taxas sejam elevadas. Questões importantes na secagem, como a saturação do ar e a indesejada reumidificação do sólido, são mais facilmente analisadas usando partículas de alumina.

Então, como meio poroso, foram utilizadas esferas de alumina com diâmetro médio de  $3,2 \pm 0,2$  mm saturadas com água. Nos experimentos numéricos, a temperatura de secagem foi de  $100^{\circ}\text{C}$ , impraticável para um sólido orgânico, mas perfeitamente aceitável para a secagem de alumina, que resiste termicamente a temperaturas elevadas. A velocidade superficial do ar de secagem foi de  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 3 MODELAGEM E MÉTODOS

A integração numérica do modelo de Telles e Massarani (1992) foi feita pela função ode23, que usa o método de Runge-Kutta explícito. A estruturação do programa foi feita tal que a altura do leito espesso foi dividida em várias camadas finas. Dessa forma, o problema foi discretizado na componente axial e integrado no tempo. Isso simplifica o esforço numérico para se obter o modelo, e portanto, simplifica o script computacional.

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. ALUMINA

Na simulação, foram utilizadas pequenas esferas de alumina com diâmetros médios de  $3,2 \pm 0,2$  mm. Teor inicial de umidade de 0,45 e suas demais propriedades podem ser encontradas no quadro 2 a seguir.

**Quadro 2:** Propriedades físicas e térmicas da alumina.

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

Fonte: Genaro (2021).

A umidade média do leito fixo ( $W$ ) em função do tempo é observada segundo a Equação 13 a seguir:

$$W(t) = \frac{\overline{X(t)} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (13)$$

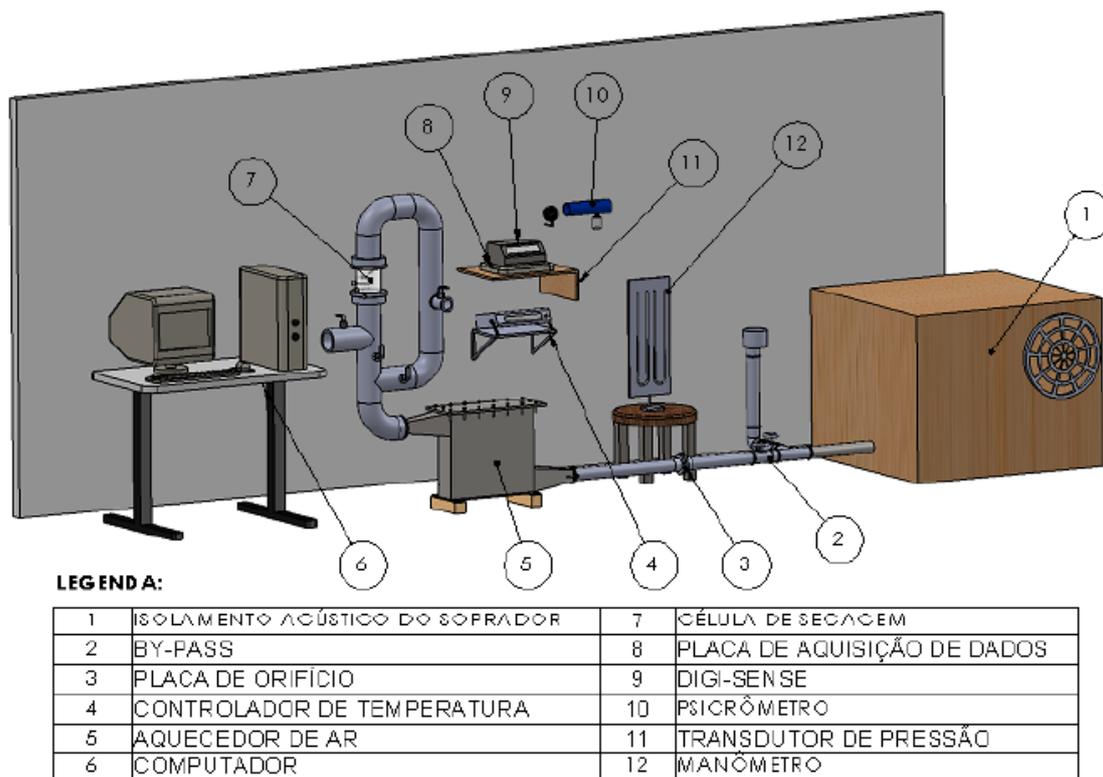
Onde  $\overline{X(t)}$  é a umidade média para um dado tempo,  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio dinâmico e  $X_0$  é a umidade inicial.

### **3.1.2. UNIDADE EXPERIMENTAL**

Para a modelagem matemática e simulação deste trabalho, foi utilizado como base o equipamento utilizado por Genaro (2021), em seus experimentos de secagem, cuja ilustração pode ser observada na Figura 6. O esquema experimental é descrito aqui para validar o modelo e o programa computacional.

O ar do ambiente é captado pelo soprador e, escoando pelo equipamento, é aquecido pelas resistências, passa então pela câmara de secagem onde está situado o leito fixo de partículas.

**Figura 6:** Módulo experimental utilizado nos experimentos de secagem (fora de escala).



Fonte: Genaro (2021).

Para os experimentos térmicos, na câmara de secagem móvel com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, feita de acrílico e de formato cilíndrico, foram colocados termopares distribuídos helicoidalmente ao longo do eixo para mensurar temperatura com a menor interferência possível no escoamento do ar e na leitura dos próprios termopares.

Para os experimentos mássicos (medida da umidade na fase sólida), uma câmara de secagem, também móvel, e com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura, feita de acrílico e de formato cilíndrico, foi seccionada em 10 camadas de 1 cm cada uma. A medição de umidade de cada camada era então realizada pelo método da estufa a cada instante definido do processo de secagem.

### 3.2. SECAGEM EM CAMADA ESPESSA

Nas simulações de secagem foram estimadas as variações de temperatura do leito em relação à posição e o tempo, além da média da umidade a cada 1 cm do leito. Este processo foi simulado com a temperatura do ar ascendente ajustada em 100°C,

vazão mássica nominal de 0,390 kg/min (simulações para o dobro e metade da vazão mássica nominal também foram feitas) e umidade inicial de 0,016.

### 3.3. MODELO DE DUAS FASES PARA SECAGEM EM LEITO FIXO ESPESSE

A descrição matemática foi feita através do modelo proposto por Massarani e Telles (1992). Os gradientes radiais foram desprezados. As principais simplificações assumidas foram:

- Sem encolhimento das partículas;
- Transferência de calor convectiva entre fases;
- Fluxo unidirecional do ar aquecido;
- Perda de calor para o ambiente desprezível;
- Fase fluida considerada como gás ideal;
- Transporte de calor unidirecional (Eixo z);
- Transporte de massa unidirecional (Eixo z);
- Sem transferência de quantidade de movimento entre sólido e fluido.

O modelo é então descrito por quatro equações diferenciais parciais (EDPs) não lineares juntamente com as equações algébricas de contorno e as condições iniciais em adição às relações de equilíbrio entre as equações de fases.

Balanco de Massa da Fase Sólida

$$\frac{\partial X(z,t)}{\partial t} = \frac{-f}{(1-\varepsilon)\rho_s} \quad (14)$$

Balanco de massa na fase fluida

$$\frac{\partial Y(z,t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon\rho_f} \left( f - G_f \frac{\partial Y(z,t)}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Balanco de energia da fase Sólida

$$\frac{\partial T_s(z,t)}{\partial t} = \frac{ha [T_f(z,t) - T_s(z,t)] - \lambda f}{(1-\varepsilon) \rho_s C p_s} \quad (16)$$

Balço de energia na fase fluida

$$\varepsilon \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial t} + \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial z} = -ha [T_f(z,t) - T_s(z,t)] - f C p_f [T_f(z,t) - T_s(z,t)] \quad (17)$$

Como as temperaturas do fluido e do s31ido ao longo do eixo s31o dificeis de mensurar separadamente, para simplificar essas mediç31es foi utilizado o conceito de temperatura de mistura. Assim sendo, assume-se que:  $T_f(z,t) = T_s(z,t) = T_{mix}(z,t)$ . Experimentalmente as temperaturas s31o obtidas por termopares posicionados helicoidalmente no leito.

A partir desta suposiç31o, foi poss31vel unir as equaç31es de balço de energia do fluido e do s31ido, chegando-se ent31o em uma equaç31o diferencial parcial que representa uma mistura entre o s31ido e o flu31ido de secagem, descrita na equaç31o 18 abaixo:

$$\frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial t} = \frac{-\lambda f - G_f [C p_f + Y(z,t) C p_v] \frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial z}}{(1-\varepsilon) \rho_s [C p_s + X(z,t) C p_l] + \varepsilon \rho_f [C p_f + Y(z,t) C p_v]} \quad (18)$$

Atrav31s das seguintes condiç31es de contorno e iniciais, podemos resolver o sistema de equaç31es:

$$X(z, 0) = X_0 \quad (19)$$

$$Y(z, 0) = Y_0 \quad (20)$$

$$T_{mix}(z, 0) = T_{m0} \quad (21)$$

$$T_{mix}(z, t > 0) = T_0 \quad (22)$$

Em que  $X_0$  é a umidade inicial da fase sólida em base seca,  $Y_0$  é a umidade mássica absoluta do ar de secagem,  $T_{m0}$  é a temperatura inicial do leito (mistura de fases fluida e sólida) e  $T_0$  é a temperatura inicial do ar de secagem (fase fluida).

A taxa de secagem em camada fina foi aqui descrita pela equação de Lewis. Este foi o modelo escolhido devido a simplicidade em descrevê-lo quando comparado com o modelo difusivo-convectivo para camada fina. A Equação 23 pode ser vista abaixo:

$$\frac{\partial X(z,t)}{\partial t} = -k (X - X_{eq}) \quad (23)$$

Em que  $k$  é a constante de secagem e  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio, que foi obtida através da equação descrita a seguir:

$$X_{eq} = \frac{0,240588 UR}{(1-0,149827 UR)(1-0,149827 UR+0,209454 UR)} \quad (24)$$

Os parâmetros  $k_0$  e  $E_a/R$  foram calculados através de uma linearização da Equação 25 com os dados do experimento de secagem de alumina em um leito fixo de camada fina.

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R} \frac{1}{(T_{mix}(z,t)+273,15)}\right) \quad (25)$$

### 3.3.1. CONDIÇÕES DO AR DE SECAGEM

Através da seguinte equação psicrométrica, foi calculada a umidade relativa para as simulações do modelo de duas fases:

$$UR = \frac{P_{ab}}{P_{sat}} \quad (26)$$

Em que  $P_{\text{sat}}$  é a pressão de vapor saturado obtida através da equação de Antoine e  $P_{\text{ab}}$  é a pressão do vapor da água na temperatura do ar ambiente, dadas pelas Equações 27 e 28:

$$P_{\text{sat}} = \exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{T+273,15-46,13}\right) \quad (27)$$

$$P_{\text{ab}} = \exp\left(\frac{1,6055 Y}{1+1,6055 Y}\right) \quad (28)$$

A solução numérica para o sistema de equações foi obtida pelo método das linhas. O sistema de equações diferenciais ordinárias foi resolvido pelo programa MatLab® R2015a através da função ode23. Para simular a secagem das esferas de alumina, foi utilizado um  $\Delta z$  de 1,0 cm.

A umidade média do leito de secagem utilizada no modelo foi calculada pela integral numérica da umidade discretizada para cada ponto  $i$  no espaço, como podemos ver na seguinte equação:

$$\overline{X}(t) = \frac{\int_0^L X_i(t) A_t dz}{\int_0^L A_t dz} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i(t) \Delta z}{L} \quad (29)$$

O script MatLab resolve numericamente o sistema de EDPs juntamente com as equações constitutivas (Eqs. 14-29).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitas simulações numéricas do comportamento das variáveis de temperatura e de umidade das fases sólida e fluida. As análises foram feitas a partir dos resultados simulados para diferentes diâmetros e alturas do leito fixo, como também diferentes vazões e temperatura de entrada do ar ascendente. As condições operacionais estão resumidas na Tabela 1. Quando um parâmetro e sua influência foi analisado todos os demais foram fixados e iguais às condições nominais.

**Tabela 1** - Dados de operação para a simulação do processo de secagem

Variável	Valores
Temperatura do ar aquecido ascendente	80 °C, 100 °C e 120 °C
Diâmetro do Leito Fixo	5 cm e 10 cm
Altura do Leito Fixo	10 cm e 20 cm
Vazão mássica do ar de secagem	0,195 kg min <sup>-1</sup> , 0,390 kg min <sup>-1</sup> e 0,780 kg min <sup>-1</sup>
Umidade inicial do ar	0,016
Umidade inicial da alumina	0,45
Temperatura inicial do leito	20,8 °C

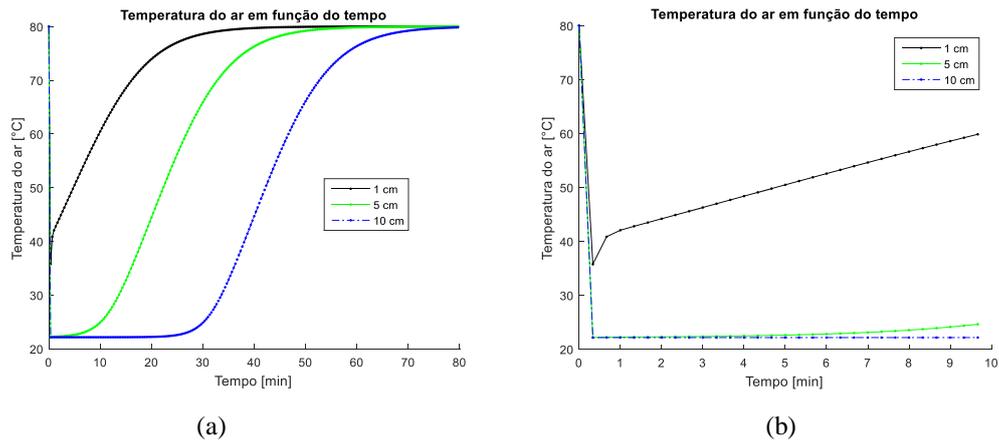
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados nominais (de referência) usados nas simulações foram:

- Temperatura de ar ascendente de 100 °C;
- Diâmetro do Leito fixo de 10 cm;
- Altura do Leito fixo de 10 cm;
- Vazão mássica do ar de secagem de 0,390 kg min<sup>-1</sup>

Alterando-se as temperaturas de entrada do ar de secagem, chegamos aos resultados ilustrados nas figuras a seguir. Na Figura 7, temos o comportamento da temperatura do ar em diferentes posições no leito, sendo 80°C na entrada. Da mesma forma na Figura 8, sendo o ar de entrada 100 °C e 120 °C.

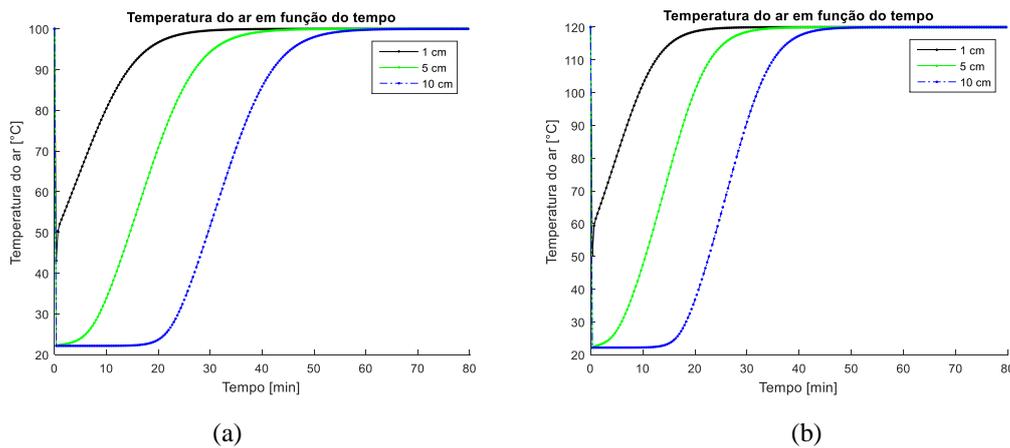
**Figura 7:** Temperatura do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Na Figura 7 (a), observamos a transferência de calor ocorrendo a partir do momento que o ar aquecido entra em contato com a fase sólida. Já na Figura 7 (b), destacam-se os minutos iniciais onde é possível ver que a taxa de transferência é maior na camada de fluido próxima à entrada de ar.

**Figura 8:** Temperatura do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a)  $T_f(z=0) = 100^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_f(z=0) = 120^\circ\text{C}$

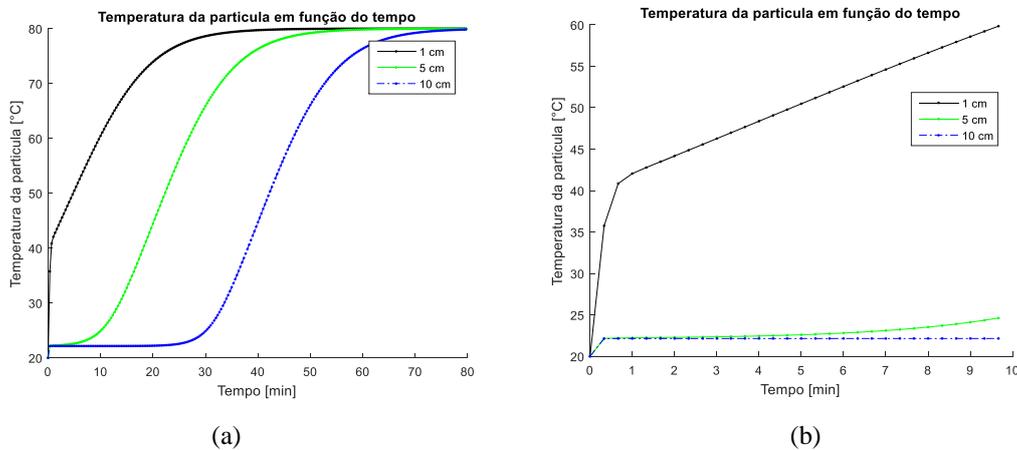


**Fonte:** Elaborado pelo autor

Como esperado, o aumento da temperatura do ar de secagem fez com que as taxas de transferência de calor também aumentassem e que os gradientes de temperatura do ar aquecido dentro do secador fossem reduzidos.

Agora, atentando para o comportamento da fase sólida, temos a Figura 9 demonstrando a variação de temperatura na alumina para o mesmo caso ilustrado na Figura 7 ( $T_f = 80^\circ\text{C}$ ).

**Figura 9:** Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem

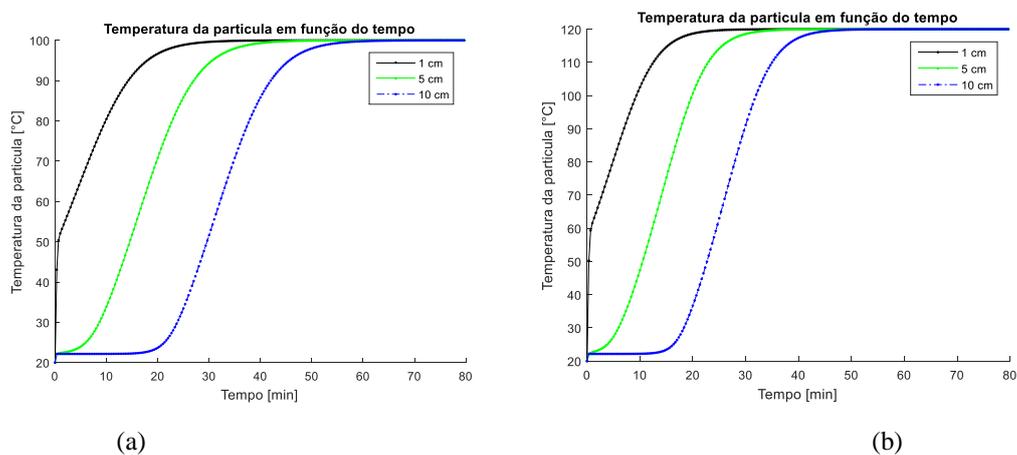


Fonte: Elaborado pelo autor

Quando se olha para as Figuras 7 e 9, é possível perceber que elas se sobrepõem, com exceção dos minutos iniciais, demonstrando como a fase fluida cede calor para a fase sólida.

Ainda em relação à alumina (fase sólida), na Figura 10, temos os comportamentos das temperaturas em diferentes posições para  $T_f = 100^\circ\text{C}$  (a) e  $T_f = 120^\circ\text{C}$  (b).

**Figura 10:** Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a)  $T_f = 100^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_f = 120^\circ\text{C}$

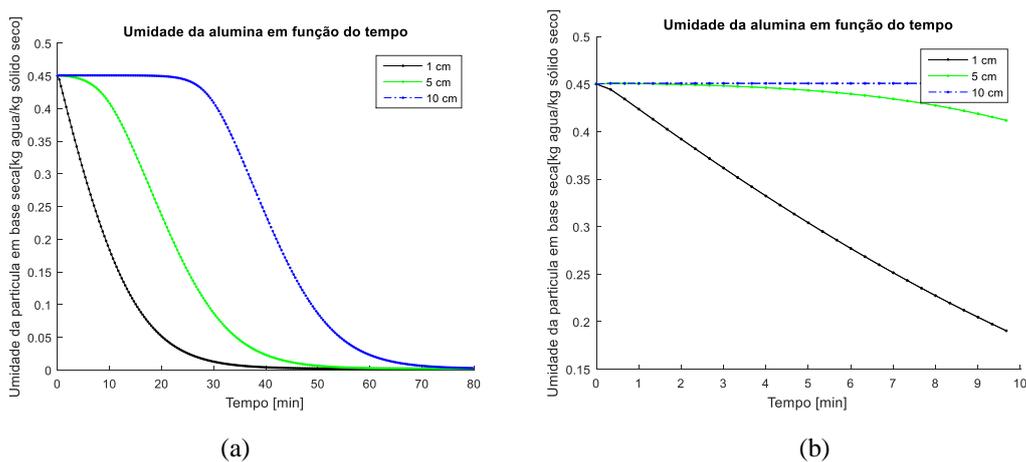


Fonte: Elaborado pelo autor

A maior temperatura do ar de secagem na entrada é responsável por maiores taxas de transferência de calor assim como ocorreu para o fluido, o que reflete num menor tempo de aquecimento e gradientes reduzidos.

Nas figuras a seguir, explicita-se o comportamento dinâmico da umidade da alumina. Na Figura 11, temos  $T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$  e na Figura 14,  $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$  (a) e  $T_f = 120\text{ }^\circ\text{C}$  (b).

**Figura 11:** Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) Tempo total de secagem; (b) 10 minutos de secagem

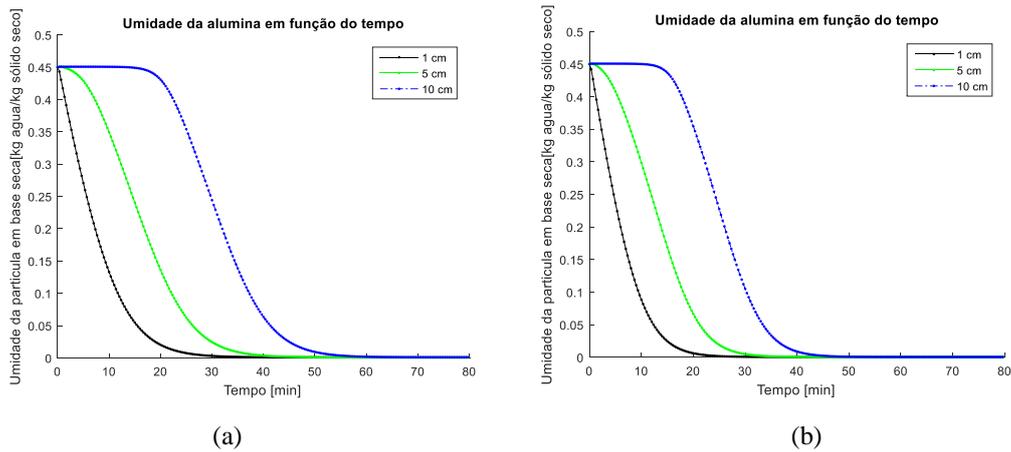


Fonte: Elaborado pelo autor

A temperaturas mais altas, a secagem foi mais rápida, o que nos demonstra a necessidade de otimização em relação à temperatura de secagem, pois, se por um lado, quanto mais alta a temperatura de secagem, mais calor deve ser fornecido, por outro, menor vai ser o tempo despendido para se secar. Importante frisar que a alumina não é termossensível como os grãos e sementes, podendo, portanto, secar em uma ampla faixa de temperatura.

Das Figuras 11 e 12, podemos destacar que a secagem de alumina é predominantemente difusiva nas regiões próximas à entrada do leito. Nas regiões mais afastadas, temos um período predominantemente convectivo e depois um período predominantemente difusivo.

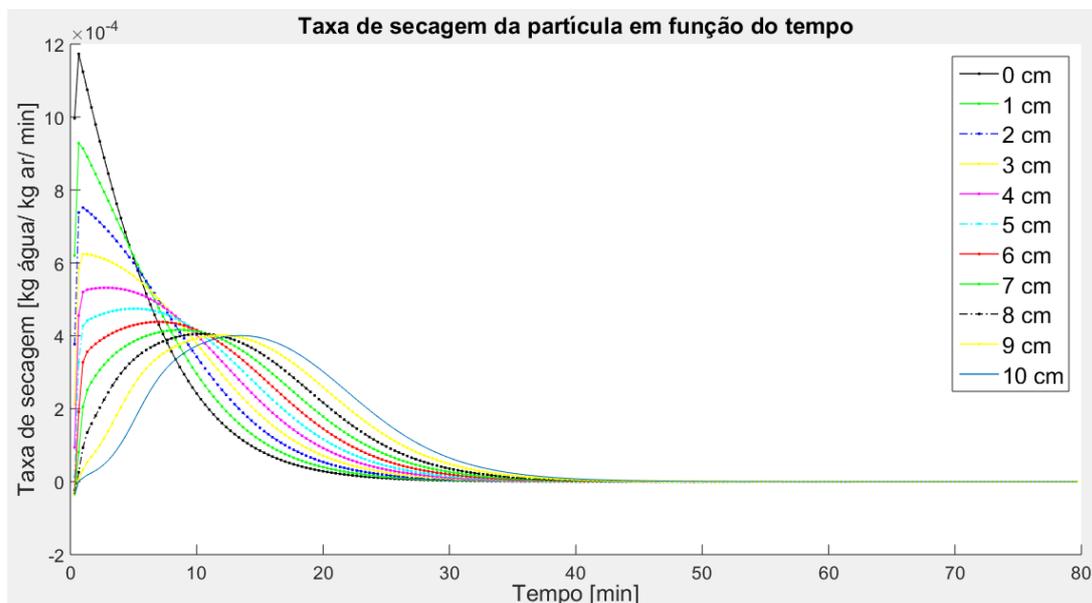
**Figura 12:** Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a)  $T_f = 100^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_f = 120^\circ\text{C}$



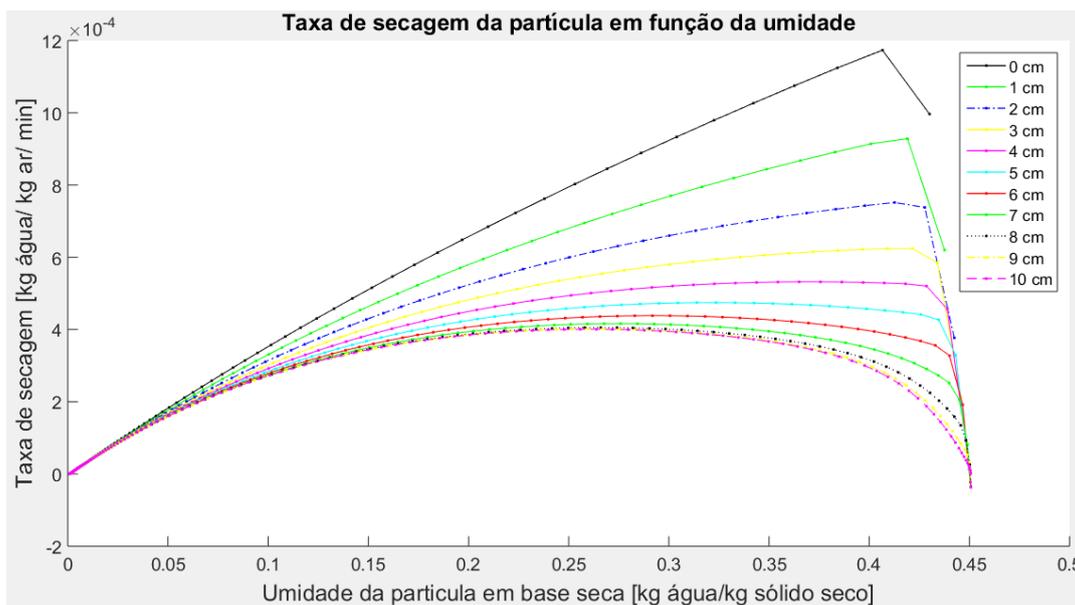
Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados da simulação, e levando-se em consideração que se tratava de um modelo de secagem em leito fixo espesso baseado na abordagem de duas fases, foi possível plotar gráficos das diferentes alturas em que se relaciona diretamente a taxa de secagem das partículas com o tempo e gráficos em que se relaciona diretamente a taxa de secagem das partículas com a sua umidade nas diferentes alturas, representados a seguir pelas Figuras 13 e 14, respectivamente. Nas figuras, as curvas representam as diferentes alturas dentro do leito.

**Figura 13:** Taxa de secagem da partícula em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 14:** Taxa de secagem da partícula em função da umidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

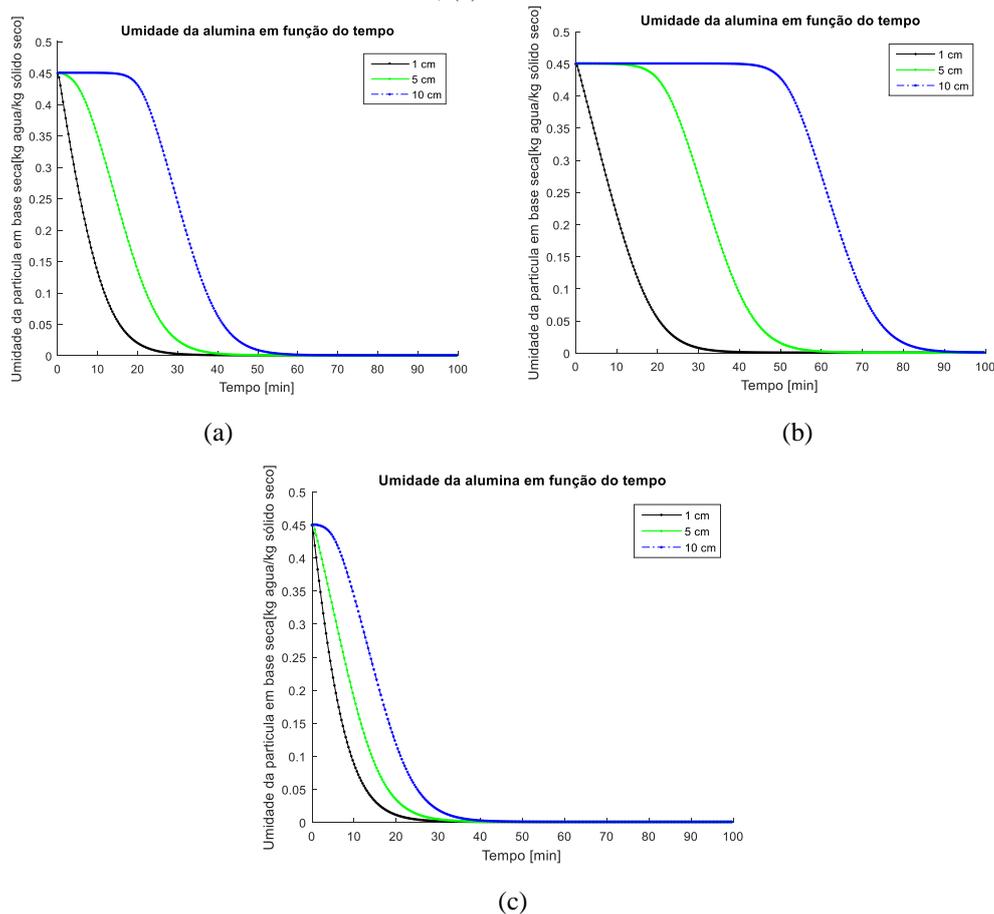
Através dos gráficos, foi possível ver que a taxa de secagem tem períodos crescentes, períodos constantes e períodos decrescentes. Quando a alumina está encharcada, há água disponível na superfície e a secagem é predominantemente convectiva, promovida pela diferença entre a umidade atual na superfície e a de equilíbrio com o ar. Quando deixa de estar encharcada, deixa também de ter água disponível na superfície. O processo interno da difusão ocorre com a água se movimentando de dentro para fora por gradiente de umidade. Portanto, existem dois mecanismos de transferência de massa, o convectivo e o difusivo. No tempo total de secagem, predominou a secagem difusiva para as regiões mais próximas da entrada do leito, o que é indicado na Figura 7 pela queda na taxa de secagem. É importante apontar que, quanto mais distante da entrada de ar mais perceptível é o aparecimento dos períodos com a taxa crescente e constante, o que comprova períodos com predominância da secagem convectiva. As posições superiores possuem período com taxa de secagem crescente no início, isto indica que, num primeiro momento, a secagem não está ocorrendo ou é muito lenta nestas posições, pois o ar terá absorvido muita umidade das posições inferiores no início da secagem, o que faz com que fique mais saturado, com menor capacidade de secagem para as posições seguintes.

Tendo isso em vista, é notável que a capacidade de secagem do ar que chega às regiões de topo do leito fixo é menor, assim sendo, quanto mais próximo da exaustão do ar, mais tempo o sólido permanece com água disponível na superfície. Em

compensação, na região de entrada do ar de secagem (na posição 0 cm), o período de taxa constante é muito curto ou praticamente inexistente. A secagem ideal é aquela em que o ar sai do secador o mais próximo possível da temperatura ambiente estando totalmente saturado de umidade.

Por hipótese do modelo assumido, temos que a transferência entre as fases é exclusivamente convectiva, tendo assim, efeitos diretos na dinâmica da secagem.

**Figura 15:** Umidade da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a) vazão nominal; (b) metade da vazão nominal; (c) dobro da vazão nominal

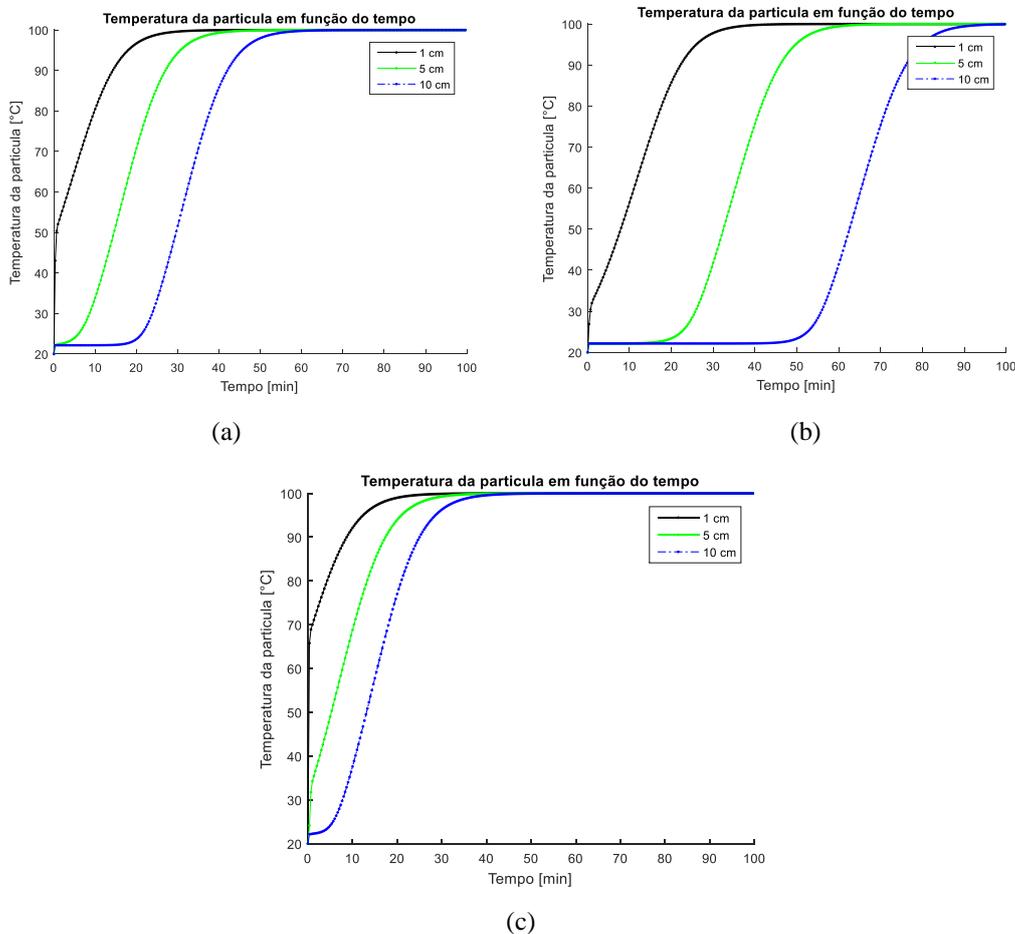


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto maior a vazão, mais rápida é a secagem, e menores são os gradientes de umidade. Quando temos uma vazão mássica elevada, o leito é varrido de uma forma mais vigorosa, onde o ar de secagem satura menos e, portanto, tem um potencial de secagem mais uniforme ao longo do leito. Para algumas aplicações, quanto mais homogêneo é o leito melhor o produto. Como existe um acoplamento entre as fases, e os mecanismos de transferência ocorrem simultaneamente, o comportamento dinâmico aqui observado se repete também para as temperaturas de fase fluida e sólida.

Importante destacar que, para o modelo, são consideradas apenas transferências axiais, desprezando-se as componentes radiais. Neste caso, mesmo sem dados experimentais disponíveis, o aumento da vazão favorece a hipótese e espera-se que as estimativas para essa condição estejam mais próximas da realidade.

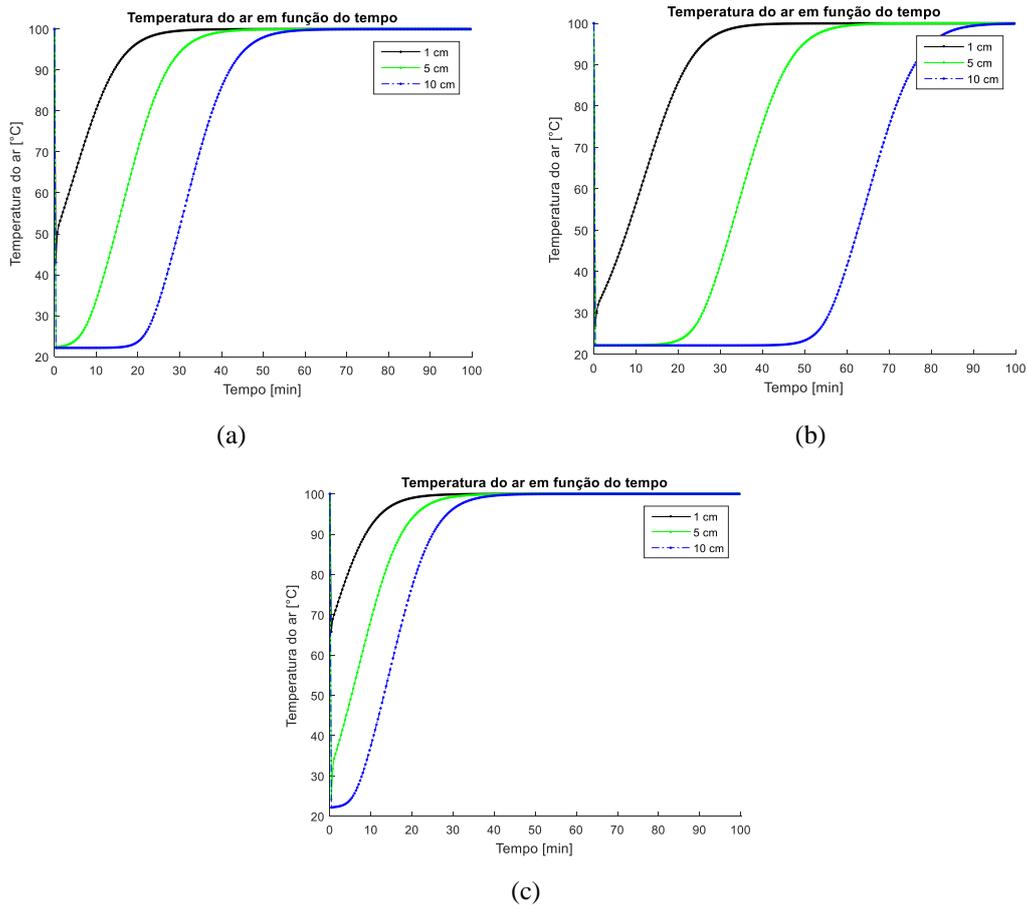
**Figura 16:** Temperatura da alumina em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a)  $0,390 \text{ kg min}^{-1}$ ; (b)  $0,195 \text{ kg min}^{-1}$ ; (c)  $0,780 \text{ kg min}^{-1}$



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Não é possível o aumento desenfreado da vazão mássica do leito sem que este esteja ancorado no topo, caso contrário ocorrerá a fluidização. Para o caso de sementes e grãos existe um limite para o aumento da vazão mássica, uma vez que existe o encolhimento das partículas, o que não ocorre para a alumina. Ainda em relação ao aumento da vazão mássica é importante ressaltar que aumenta também a perda de carga, que pode ser calculada por Darcy ou pela equação de Forchheimer. Sempre que possível, é desejável operar o leito abaixo da capacidade máxima do soprador.

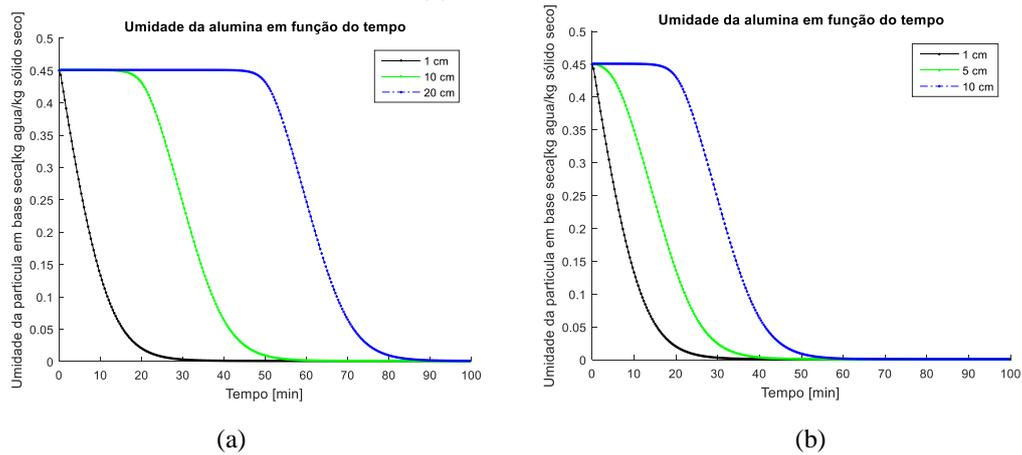
**Figura 17:** Umidade do ar de secagem em função do tempo a 1, 5 e 10 cm: (a)  $0,390 \text{ kg min}^{-1}$ ; (b)  $0,195 \text{ kg min}^{-1}$ ; (c)  $0,780 \text{ kg min}^{-1}$



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Outra análise possível é quanto ao aumento da altura do leito. Também era esperado que, com o aumento da altura, as camadas mais ao topo levassem mais tempo para ser aquecidas e então a secagem seria mais lenta. No leito com 10 cm de altura a secagem é mais rápida que no leito com 20 cm de altura como é evidenciado nas figuras a seguir.

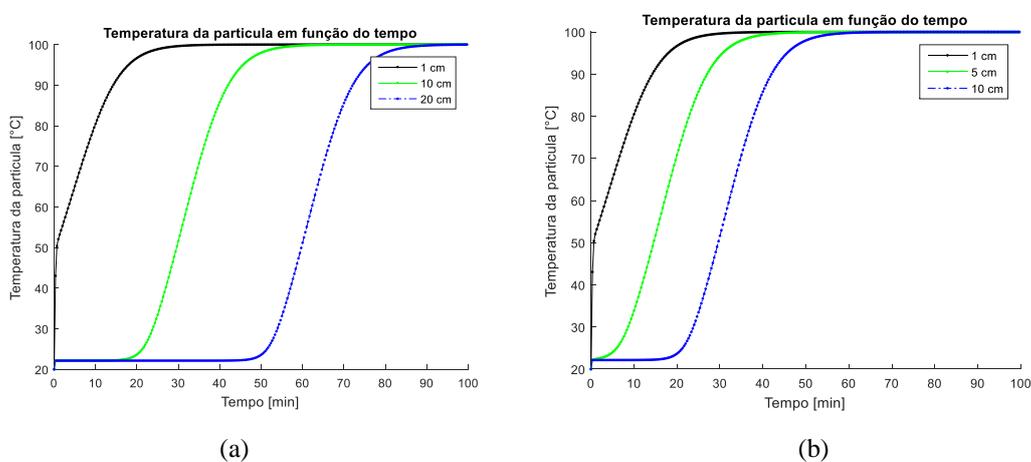
**Figura 18:** Umidade da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm



Fonte: Elaborado pelo autor

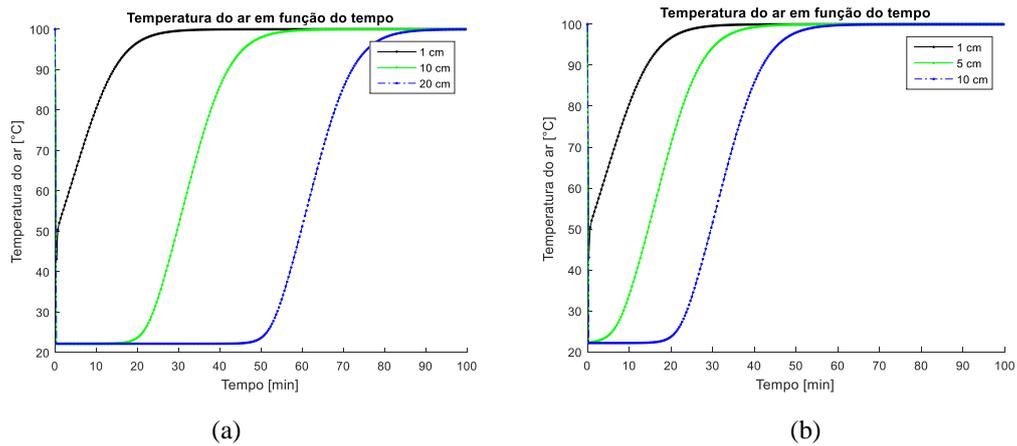
Devido à troca de calor que ocorre de baixo para cima do leito, fica evidente que a parte inferior e mais próxima da entrada de ar seca mais rápido que o topo do leito, e isso ocorre por conta do resfriamento progressivo que ocorre no leito. Aliado a isto, tem também a saturação do ar de secagem que chega ao topo mais úmido e mais frio que na entrada do leito. Este efeito fica muito claro quando se aumenta a altura do leito. Ao se analisar as curvas nas Figuras 19 (a) e 19 (b), foi possível perceber que para as posições próximas à entrada do ar de secagem não são afetadas, porém, há a sobreposição da curva azul da figura b e a curva verde da figura a, demonstrando uma secagem mais rápida no leito com menor altura.

**Figura 19:** Temperatura da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm



Fonte: Elaborado pelo autor

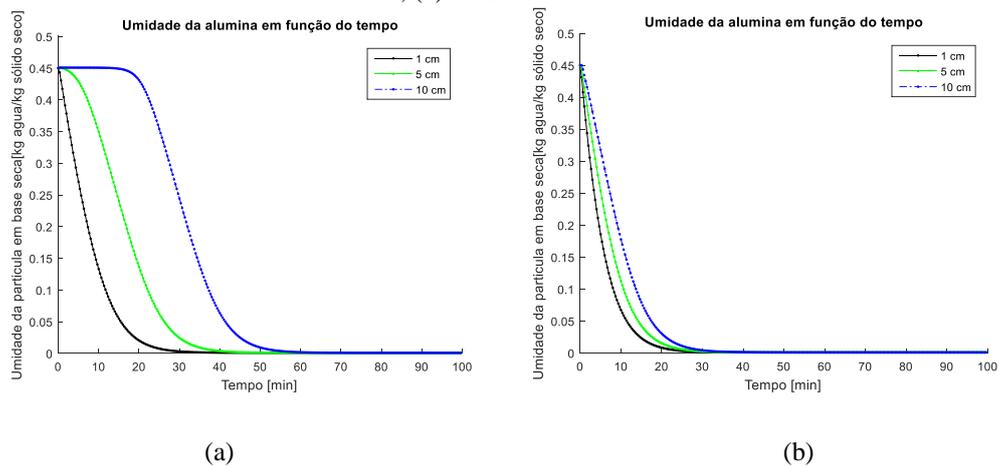
**Figura 20:** Temperatura do ar de secagem em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) altura do leito de 20cm; (b) altura do leito de 10cm



Fonte: Elaborado pelo autor

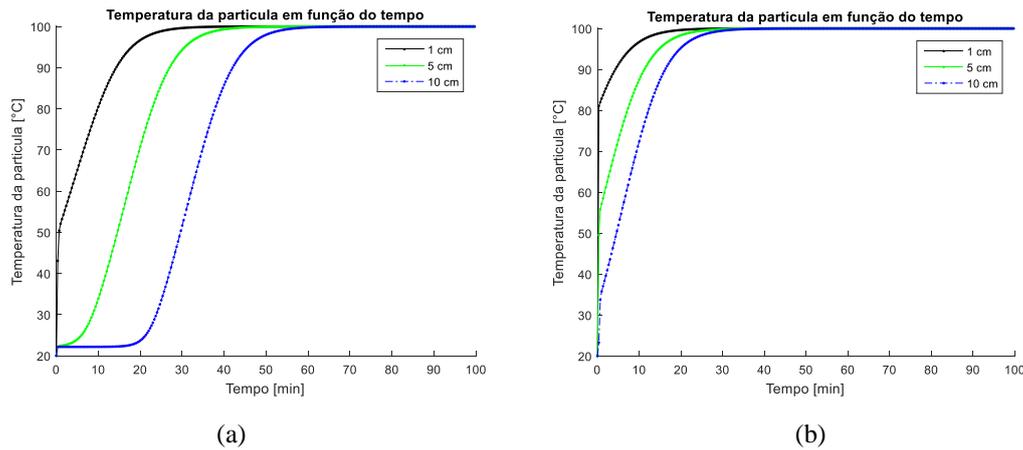
Por fim, a última alteração analisada foi o diâmetro do leito. Mantendo-se sua altura em 10 cm e diminuindo seu diâmetro para 5 cm, foram obtidos os resultados a seguir:

**Figura 21:** Umidade da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm



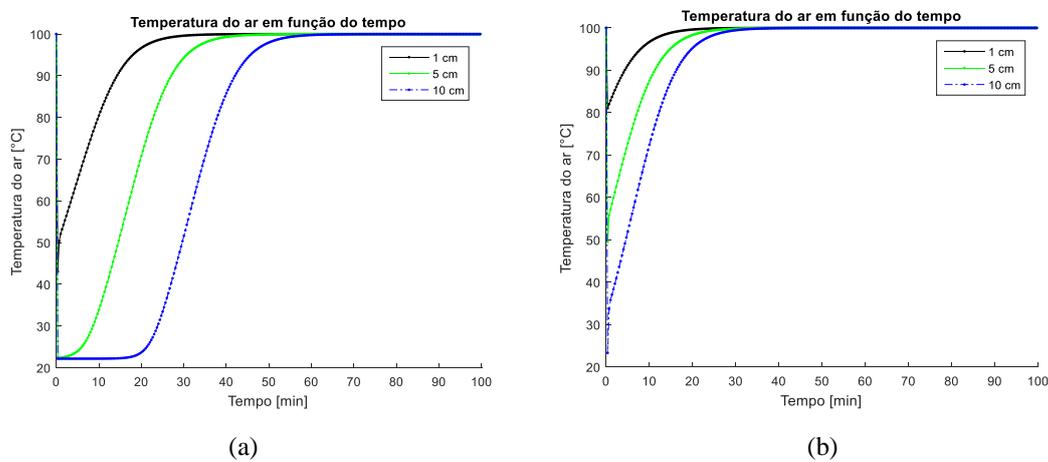
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 22:** Temperatura da alumina em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 23:** Temperatura do ar de secagem em função do tempo em diferentes posições axiais: (a) diâmetro do leito de 10cm; (b) diâmetro do leito de 5cm



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os gráficos, é notável a influência que o diâmetro do leito tem no sistema. Isso ocorre, pois altera a relação entre o diâmetro de partícula e o diâmetro do leito, e essa relação é de suma importância para os sistemas particulados e as operações dos leitos. Além disso, também há o aumento da velocidade no leito com a diminuição do diâmetro.

Com a diminuição do diâmetro diminui também o espaçamento entre as curvas, tornando a secagem mais homogênea. Ao diminuir o diâmetro do leito, diminui-se também o seu volume, o que faz com que menos massa seja armazenada no mesmo, com isso o ar de secagem chega ao topo menos úmido e mais quente acelerando o processo de secagem. Todas as hipóteses devem continuar válidas com essa mudança. A

dinâmica do leito 10x10cm foi bem diferente da do leito de 5x10cm, que possui 4 vezes menos volume.

## **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Com todos os resultados compilados para as diversas alterações, tanto operacionais, quanto estruturais, para o processo de secagem em leito fixo, foi possível concluir que estes fatores são de extrema importância para o bom funcionamento do sistema. O aumento da temperatura do ar de secagem aumenta as taxas de transferências de calor. O aumento da vazão mássica do ar de secagem também aumenta a velocidade da secagem, mas dependem da ancoragem do topo do leito, caso contrário haveria fluidização. O aumento da altura do leito diminui a velocidade de secagem pois altera a saturação do ar de secagem, uma vez que ele percorre um caminho maior e perde mais calor no trajeto. Por fim, a alteração do diâmetro do leito fixo influencia diretamente na dinâmica do sistema. Com essas informações e a análise da taxa de secagem que nos demonstrou que existem períodos com taxas de secagem crescente, constante e decrescente, especialmente em posições afastadas da alimentação de ar, bem como a predominância da secagem convectiva no processo, foi possível afirmar a validade da simulação baseada no trabalho de Luana Boger Genaro e das hipóteses presentes no modelo matemático proposto por Massarani e Telles (1992). Importante ressaltar a importância da simulação para a realização deste trabalho e dos possíveis trabalhos futuros.

Trabalhos futuros poderão analisar se a simulação seria válida para outros materiais que não fossem a alumina, testar se alguns tipos de grãos e sementes poderiam ser utilizados em diversas configurações do sistema de secagem. Realizar estudos de gasto energético do sistema e outros modelos matemáticos possíveis.

## 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.

ALTINO, H. O. N. **Secagem em leito fixo de materiais granulares com diferentes esfericidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, SP, 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.

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

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.

CALÇADA, L. A., **Modelagem e simulação da secagem em leito fixo**. D Dissertação – Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

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

FREIRE, F. B.; ATXUTEGUI, A.; FREIRE, Fl. B.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. **An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed**. Drying Technology, v. 34, p. 11, 2016.

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

GENARO, L.B.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T.; FREIRE, F.B. **Solid drying in a thick fixed bed with airflow reversal.** Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, v.170, 2022

GURTIN, M. E.; VARGAS, A. S. **On the Classical Theory of Reaction Fluid Mixtures,** 1971. Citado por 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, p. 3-39.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, 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.

KUDRA, T. **Energy aspects in drying.** Drying Technology, v. 22, n. 5, p. 917–932, 2004.

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

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agropecuária Brasileira em Números.** Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt->

br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-02-2022.pdf/view. Acesso em: 18 de Março de 2022.

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.

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

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

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.

REIS, T.G. **Análise da secagem de partículas de alumina em secador vibrofluidizado**. Dissertação – Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2015.

REIS, T.G.; PERAZZINI, H.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T. **Análise da secagem de partículas de alumina em secador de leito vibrofluidizado**. XXXVII Congresso brasileiro de sistemas particulados, 2015.

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

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.

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

SHERWOOD, T. K. **The Drying of solids—II**. Industrial & Engineering Chemistry, v. 21, n. 10, p. 976–980, 1929b.

STRUMILLO, C. S.; JONES, T.; ZYLLA, R. **Handbook of Industrial Drying**. Chapter 46 – Energy Aspects in Drying. p. 1075-1099, 2014.

TRUESDEL, C. **Sulle basi della Termodinamica**. 1957. Citado por 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, p. 3-39.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**, 2012. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

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.