

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A OPERAÇÃO CONVENCIONAL
E A COM REVERSÃO DE ESCOAMENTO DURANTE A SECAGEM DE
ALUMINA EM LEITO FIXO**

Hugo Mendes Böing

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Coorientador: MSc. Luan da Silva Barbosa

SÃO CARLOS – SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire (UFSCar)

Convidado: MSc. Luiz Daniel da Silva Neto (UFSCar)

Professor da Disciplina: Prof. Dr. José Maria Corrêa Bueno (UFSCar)

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu orientador, Prof. Fábio Bentes Freire, por toda a disponibilidade, atenção, carinho e paciência ao longo desse trabalho. Seu esforço e capacidade são exemplos nos quais quero me espelhar.

Ao MSc. Luan da Silva Barbosa, pelas verdadeiras aulas que foram suas orientações. Transformou minhas dúvidas em direcionamentos, sendo fundamental para a realização do trabalho

Ao ilustre Prof. José Teixeira Freire, por suas pontuações precisas e esclarecedoras.

Às minhas duas famílias, a de sangue e a de convivência, por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem durante toda essa jornada.

Agradeço a minha mãe, Rosângela, por desde cedo me ensinar o valor da seriedade e dedicação e sobretudo por ser uma pessoa exemplar.

Agradeço ao meu pai, Arnildo, por sempre me ensinar o valor do trabalho além sempre me incentivar com seu apoio e confiança.

Aos meus avós, por serem exemplos de vida para mim, tenho certeza que essa conquista os encherá de alegrias.

Ao grupo de amigos, ou melhor, Família Elite, por esse caminho traçado comigo, todo o apoio e companheirismo além de todos os momentos que sempre levarei comigo no peito.

Obrigado a Deus, por me fazer perseverar durante as tribulações neste caminho que não foram poucas.

E, em especial, agradeço ao meu amor, Maria Cecília, por sempre estar ao meu lado e por ser a minha fortaleza nos momentos em que mais precisei. Todo o amor, carinho e cumplicidade foram e seguirão fundamentais para eu superar os desafios em minha jornada.

RESUMO

Em um país como o Brasil onde a produção de grãos tem elevado destaque na economia, há o desafio da armazenagem desse produto. Para tal, a operação de secagem é de suma importância, no entanto, processos simples de o de secagem em leito fixo, pode promover heterogeneidade no produto, implicando em uma queda de qualidade dos grãos secos. Nesse contexto, o objetivo do Trabalho de Graduação aqui resumido foi analisar a diminuição dos gradientes internos durante a secagem de alumina em leito fixo espesso com a técnica da reversão, comparando os resultados com os que seriam obtidos na operação convencional. Foram feitos ensaios numéricos usando um programa em MatLab® desenvolvido na área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar. Os resultados das simulações devem revelaram a eficácia da técnica de reversão de escoamento mostrando a redução dos gradientes de umidade e temperatura da alumina.

Palavras-chave: Secagem. Leito Fixo. Alumina. Reversão.

ABSTRACT

In a country such as Brazil, where grain production has high economic importance, there is a storage challenge for this product. For that, the drying operation is extremely relevant, however, simpler processes such as fixed bed drying promote nonuniformity on the product, implying in a drop in the dried grain's quality. In this context, the objective of this work was to analyze the reduction of internal gradients during thick fixed bed alumina drying with the reversal technic, when compared to results that would be attained in the conventional operation. Numerical assays were carried out in MatLab® with a script developed by Particulate Systems Research Group of DEQ/UFSCar. The simulation results showed the effectiveness of the airflow reversal technique that allowed the reduction of moisture and temperature gradients of alumina.

Keywords: Drying. Fixed Bed. Alumina. Reversal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens da superfície de esferas de alumina com diâmetros de 4,00 mm (a) e 3,35 mm (b) obtidas através de microscopia eletrônica de varredura e (c) imagens de esferas de alumina de 3,2 mm	12
Figura 2 – Ilustração simplificada de uma unidade de secagem em leito fixo	14
Figura 3 – Esquema simplificado de um secador de leito fixo com reversão do escoamento de secagem	16
Figura 4 – Esquema simplificado de uma curva de secagem	18
Figura 5 – Ilustração simplificada das fases sólida e fluida para secagem em leito fixo proposta pelo modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles	21
Figura 6 – Ilustração simplificada fora de escala do aparato experimental simulado	28
Figura 7 – Ilustração simplificada da operação do secador de leito fixo (fora de escala): a) Escoamento ascendente. b) Escoamento descendente	29
Figura 8 – Variáveis de operação com e sem reversão a 1 e 10 cm: (a) Umidade da alumina contra o tempo; (b) Temperatura de mistura da alumina contra o tempo	32
Figura 9 – Variáveis de operação com e sem reversão a 5 cm: (a) Umidade da alumina contra o tempo; (b) Temperatura de mistura da alumina contra o tempo	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores nominais de operação para a simulação do processo de secagem	31
--	----

QUADROS

Quadro 1 - Alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam alumina para estudos de secagem em leito fixo	13
Quadro 2 - Propriedades físicas e térmicas da alumina	27

NOMENCLARUTRA

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
T	Temperatura	[θ]
T _s	Temperatura da fase sólida	[θ]
T _f	Temperatura da fase fluida	[θ]
T _{mix}	Temperatura da mistura entre fases sólida e fluida	[θ]
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]
Δt	Intervalo de reversão de secagem	[t]
a	Área superficial do sólido por unidade de volume	[L ² L ⁻³]
A _t	Área de seção transversal da célula de secagem	[L ²]
G	Fluxo mássico	[M L ⁻² t ⁻¹]
C _{pf}	Calor específico do ar seco	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
C _{ps}	Calor específico da fase sólida	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
C _{pv}	Calor específico do vapor d'água	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
C _{pl}	Calor específico da água líquida	[L ² t ⁻² θ^{-1}]
P	Pressão absoluta	[M L ⁻¹ t ⁻²]
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 θ^{-1}]
f	Taxa de Secagem	[M M ⁻¹ t ⁻¹]

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Massa específica	$[M L^{-3}]$
λ	Calor específico de vaporização	$[L^2 t^{-2}]$
ε	Porosidade do leito	$[-]$
Subscrito	Descrição	
f	Fase fluida	
s	Fase sólida	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Alumina	12
2.2 Secagem em Leito Fixo	14
2.3 Secagem em Leito Fixo com reversão do sentido com reversão do sentido de escoamento de ar	15
2.4 Secagem em leito fixo em camada fina	17
2.5 Modelo de Lewis para secagem em camada fina	19
2.6 Modelo de duas fases de Massarani e Telles	20
2.7 Informações sobre o script do MatLab®	26
3 Métodos e Modelagem	27
3.1 Materiais	27
3.1.1 Alumina	27
3.1.2 Equipamento experimental	28
3.2 Secagem em camada espessa	30
3.3 Modelo de duas fases para secagem em leito fixo espesso	30
3.4 Valores dos inputs no script do MatLab®	30
4 Resultados e Discussões	33
5 Conclusão e Sugestões	35
Referências	36

1 INTRODUÇÃO

Seja seu medicamento preferido para dor de cabeça ou o cafezinho no final da tarde, é vasta a gama de produtos que possuem a operação de secagem em sua produção. Graças à infundável busca do mercado por sempre inovar seus processos em busca de mais qualidade e eficiência, é natural que os equipamentos e seus modos de operação precisem evoluir ao longo do tempo.

O papel do engenheiro nessa evolução é adaptar e refinar os processos existentes através da utilização de novas tecnologias e otimizações de suas condições de operação. Em poucas palavras, a secagem é a remoção da umidade de um material através de uma transferência simultânea de calor e de massa (MCCABE et al., 1993) e é amplamente utilizada em toda a indústria, como, por exemplo, na farmacêutica (ZIAEE et al., 2019), na alimentícia (IGUAZ et al., 2003), na química, na têxtil (JOHANN et al., 2014) e no beneficiamento de grãos (SILVA et al., 2012). No agronegócio existem várias aplicações em que a matéria prima passa por uma etapa de secagem para depois ser armazenada e comercializada. Além da preservação do produto, por reduzir o teor de umidade interna que permite a atividade microbiológica de degradação, a secagem torna o produto mais leve, facilitando o transporte.

Uma característica notável da secagem é o elevado consumo de energia, sendo responsável por, em média, 12% de todo o dispêndio energético de um processo de manufatura (STRUMILLO et al., 2014), mas podendo atingir percentuais ainda maiores dependendo do segmento em que é utilizada, como por exemplo 27% na indústria de papel, 50% na têxtil e até 70% na de madeira (KUDRA, 2004). Essa alta demanda de energia se deve ao fornecimento de calor necessário para o aquecimento do ar e a evaporação da fase líquida. Ademais, quando o principal mecanismo de secagem é o de convecção, também é necessário despendar energia para que o fluido, normalmente o próprio ar atmosférico aquecido, escoe dentro do secador.

A utilização de leitos fixos é comum em processos de secagem de sementes pois essa configuração de secador proporciona menos impacto mecânico se comparado às secagens em leitos fluidizados ou de jorro, por exemplo (PRADO e SARTORI, 2011). Ela consiste no empacotamento de partículas úmidas em uma coluna, normalmente de geometria cilíndrica. No secador de leito fixo, portanto, o material permanece estático enquanto o ar aquecido atravessa o meio poroso. Mecanismos de transferência de calor e de massa regem o processo acoplado no qual o fluido aquecido transfere calor ao sólido úmido que, por sua vez, transfere o excesso

de umidade para o fluido. Apesar de somente operar em batelada, o leito fixo é de fácil ampliação de escala, além disso, pode ser usado como célula de estudo para os mecanismos de transferência que também ocorrem em outros equipamentos, como o secador tipo esteira rolante. A principal desvantagem do secador tipo leito fixo é que, por não promover a mistura do meio, ele acentua os gradientes de temperatura e de umidade. (GENARO e FREIRE, 2022)

Para atender as demandas de qualidade do produto comercializado é fundamental haver homogeneidade de suas propriedades, mantendo dentro de limites as variações nas características físico-químicas. Uma alternativa para reduzir os gradientes no processo de secagem em leito fixo é a técnica de reversão do escoamento do ar. Através dessa técnica, a cada intervalo de tempo, que pode ser ajustado para otimizar a secagem, o sentido de escoamento do fluido é alternado entre ascendente e descendente (RATTI e MUJUMDAR, 1995; ALBINI, 2019 e GENARO, 2021).

Apesar de não haver motivação prática para a secagem de alumina em leito fixo, ela serve como uma partícula ideal a partir do qual são obtidos modelos matemáticos simplificados e mais facilmente verificados experimentalmente. Fazendo uma analogia, a partícula de alumina seria tão ideal em secagem quanto um Ciclo de Carnot em termodinâmica. Devido à sua estrutura interna que retém, principalmente, água livre, a secagem da alumina estabelece alguns máximos dentro do processo, tanto em taxas de transferência quanto em quantidades absolutas. Além disso, a alumina não se altera durante a secagem, diferentemente de sólidos orgânicos. A modelagem, simulação e verificação da secagem de alumina em leito fixo com e sem reversão do ar de secagem foi tema da dissertação de mestrado de Genaro (2021) e originou outras propostas, como a aqui apresentada, abordando os efeitos de secagem em uma faixa de temperatura mais alta do que a do trabalho original.

Com isto em mente, este trabalho teve como principal objetivo comparar as operações com e sem reversão de sentido do escoamento do ar de secagem e seus efeitos sobre o processo de secagem, bem como o produto. Dentro desse objetivo principal, destaque-se os seguintes objetivos específicos:

- Entender as etapas de desenvolvimento e verificação do modelo matemático de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992), até ele ser discretizado no espaço.
- Realizar simulações de secagem de esferas de alumina em leito fixo e camada espessa com e sem reversão do escoamento do ar, comparando os resultados.
- Contextualizar as análises feitas com a secagem de grãos e sementes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os fundamentos teóricos utilizados para o desenvolvimento da simulação e análise dos resultados. Informações sobre secagem em leito fixo com e sem reversão de fluxo, características da alumina e o modelo matemático de duas fases de Massarani e Telles são apresentadas por meio de uma breve revisão bibliográfica.

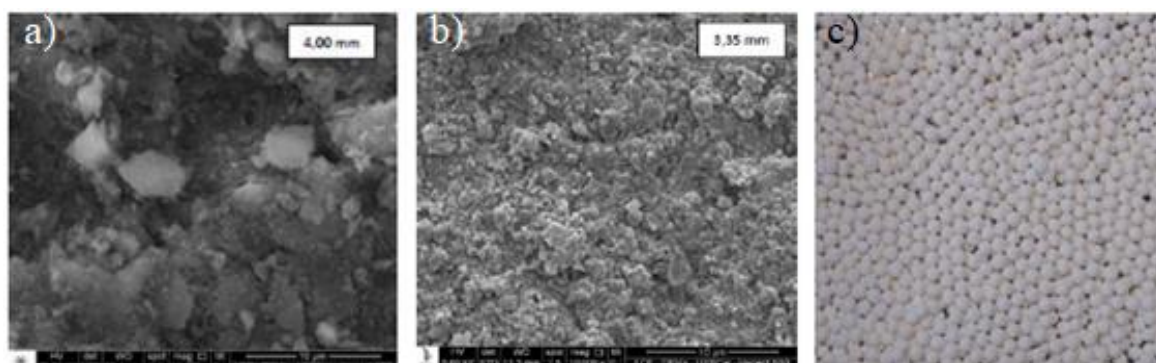
2.1 ALUMINA

De ocorrência natural, a bauxita é um minério de cor avermelhada caracterizada pela presença de óxido de alumínio (Al_2O_3), também conhecido como alumina. Esse óxido é a matéria prima base para a produção do alumínio (HIND et al., 1999), e sua extração é economicamente viável quando o seu teor na bauxita estiver entre 50 a 55% (SAMPAIO et al., 2005).

Em sua forma ativada a alumina possui valores elevados para várias propriedades tais como: estabilidade térmica, porosidade e área superficial, podendo ser utilizada como suporte de catalisadores (ALVARENGA, 2013) e adsorvente de fluoretos para tratamento de água (ALVARINHO et al., 2000).

Por se tratar um material cujas características se mantêm constantes a temperaturas comumente utilizadas em secadores, a alumina tem sido usada em diversos estudos de transferência de energia, de massa e de quantidade de movimento. Partículas esféricas de alumina possuem superfície rugosa e heterogênea, conforme mostrado na Figuras 1.

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



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

Se comparada a grãos e sementes, a estrutura interna da alumina, além de imutável, é simples, facilitando a análise de mecanismos internos e externos envolvidos na secagem (SOUSA, 2017). Pode ser um ponto de partida interessante para o desenvolvimento de modelos matemáticos de processos de secagem. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que as propriedades físico-químicas da alumina não dependem da umidade e são constantes ao longo da secagem. Além disso, a alumina úmida é composta por água livre na matriz porosa, ao contrário de grãos orgânicos que têm muita água ligada ao sólido. Isso simplifica a modelagem. Mesmo idealizado, ainda assim, o modelo de secagem da alumina pode ser estendido para grãos orgânicos, desde que se analise a distância estrutural entre os sólidos.

No Quadro 1, são apresentados alguns estudos disponíveis na literatura sobre secagem de alumina em leito fixo.

Quadro 1: Alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam alumina para estudos de secagem em leito fixo

Referência	Descrição
Genaro (2021)	Realizou um estudo experimental e numérico da secagem de alumina em leito fixo com reversão do ar de secagem
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
Reis (2015)	Estudou a secagem da alumina em leito vibrofluidizado, também contemplando secagem em estufa e em camada fina de leito fixo
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.
Calçada (1994)	Modelou e simulou a secagem de esferas de alumina em leito fixo com escoamento ascendente de ar e camada espessa.

Fonte: Elaborado pelo autor

Em comum, todos os trabalhos mostrados no Quadro 1 usam a alumina em substituição ao grão orgânico. Apesar de encontrar aplicação, por exemplo, na área de catálise, em sistemas particulados, a alumina é uma etapa intermediária no desenvolvimento, controle e otimização de secadores de grãos e sementes. Todo o incentivo para os estudos desenvolvidos no leito fixo

Neste secador, o ar aquecido é alimentado em sentido ascendente, sendo forçado a percolar os espaços vazios entre as partículas do leito fixo. No sentido do escoamento, a temperatura diminui e a umidade aumenta, em ambas as fases. A partir desse contato sólido/fluido acontece a secagem do material próximo a região de alimentação do ar, formando as frentes de secagem mostradas por Barrozo et al. (2014). Essas diferentes regiões geram gradientes de umidade e temperatura no sistema, como observado nos trabalhos de Perazzini (2014), Souza (2013) e Ratti e Mujumdar (1995). Tais características são indesejadas pois distribuem a energia térmica de forma heterogênea, além de alterarem as características do produto, promovendo fissuras e diminuindo o potencial de germinação de sementes (RATTI e MUJUMDAR, 1995). O arroz, por exemplo, é um grão que requer uma temperatura tal que ele não fique quebradiço, quanto mais houver gradientes de temperatura dentro do leito, mais difícil fica para atender esse critério.

2.3 SECAGEM EM LEITO FIXO COM REVERSÃO DO SENTIDO DE ESCOAMENTO DE AR

Visando reduzir os gradientes de temperatura e de umidade e a resultante heterogeneidade dos produtos da secagem em leito fixo convencional, propõe-se uma alteração no processo onde o escoamento do ar aquecido é invertido intermitentemente (ALBINI, 2019; RATTI e MUJUMDAR, 1995; GENARO, 2021). Essa técnica é conhecida como secagem com reversão.

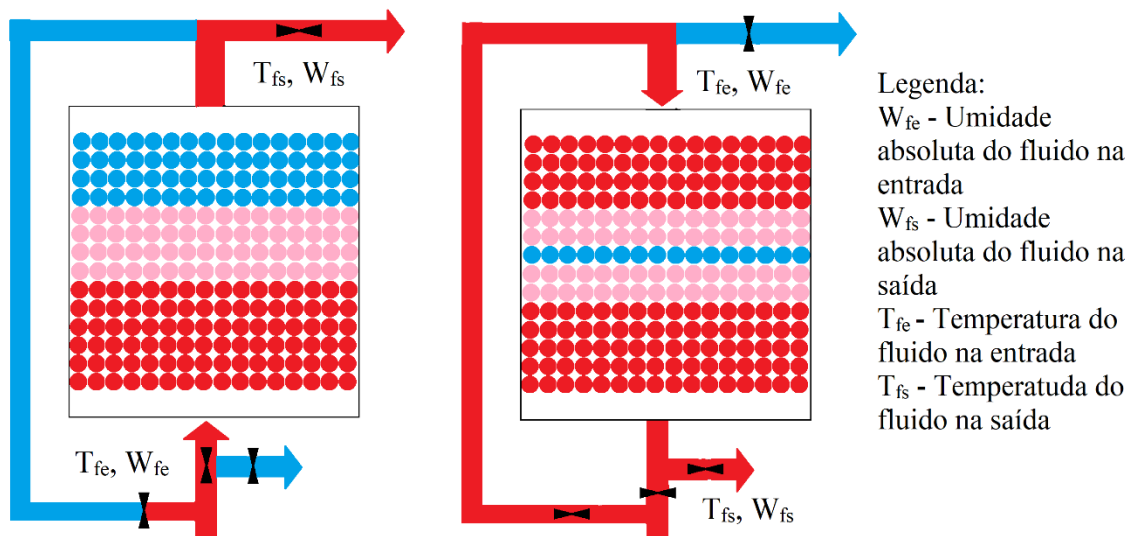
Dentre as vantagens da aplicação de reversão do escoamento do ar de secagem, pode-se destacar:

- a possibilidade de adaptação de secadores convencionais;
- a manutenção das características do leito fixo, evitando a desgaste mecânico das partículas
- economiza a energia que seria necessária para operar sistemas de agitação ou com fluidização do material sólido particulado.

A principal desvantagem, em contrapartida, é que a secagem leva mais tempo para ocorrer e consome mais energia de aquecimento. Um estudo completo sobre o assunto deve incluir uma análise criteriosa dessa questão, deixando claro que a técnica não visa otimizar a secagem do ponto de vista energético, mas sim, uniformizar as propriedades do produto.

Para essa configuração de reversão, a cada intervalo de tempo definido (Δt), o sentido de escoamento do ar de secagem é invertido. A Figura 3 apresenta uma comparação entre as configurações convencionais e com reversão de escoamento. Nesta figura fica visível que na operação com sentido revertido há a formação de frentes de secagem em ambas extremidades do secador, e a região de maior umidade acaba se concentrando na região central do secador.

Figura 3: Esquema simplificado de um secador de leito fixo com reversão do fluxo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a reversão, as frações de sólidos das camadas próximas da base e do topo do leito passam a ter variáveis de estado mais próximas. Esse comportamento incentivou diversos estudos sobre secagem em leito fixo utilizando reversão de escoamento, visando entender melhor os fenômenos de transferência envolvidos, a otimização e projetos de secadores. Por exemplo, no previamente citado trabalho de Ratti e Mujumdar (1995), simulou-se a secagem em camada espessa com e sem reversão, levando em consideração o encolhimento do sólido. Através da comparação dos resultados da simulação com os dados experimentais, medidos durante a secagem de cilindros de cenoura, fatias de maçã e de batata, avaliou-se a validade do modelo matemático que contempla a variação de tamanho do material. Neste estudo, as condições de reversão pouco influenciaram na umidade média do leito ao longo do tempo de secagem. Contudo, também ficou evidenciado que os perfis de umidade e temperatura do leito foram suavizados, implicando em um produto mais homogêneo.

Segundo Albin (2019), a técnica de reversão também reduziu os gradientes de temperatura e de umidade em um leito fixo cilíndrico de cevada de 10x10 cm. O modelo de Massarani e Telles (1992) foi proposto para descrever a secagem, porém, dificuldades surgiram tanto pelas características estruturais do grão de cevada quanto pelo inevitável encolhimento. Desprezar o encolhimento e o uso de parâmetros físico-químicos constantes comprometeram as estimativas do modelo, desviando significativamente as simulações dos valores medidos. Uma alternativa para contornar essa dificuldade seria o uso de modelos adaptativos em malha fechada (Freire et al., 2016), com atualização de parâmetros ao longo do tempo. Modelos adaptativos requerem redundância de informação tal que a diferença entre uma variável estimada e, ao mesmo tempo, medida, gere um sinal de correção. Para isso, seria necessário fazer modificações significativas no sistema de aquisição de dados usado nos experimentos. Foram justamente as dificuldades encontradas na modelagem da secagem de cevada com reversão (ALBIN, 2019) que deram origem ao trabalho de Genaro (2021).

2.4 SECAGEM EM LEITO FIXO EM CAMADA FINA

Para se analisar o efeito das variáveis de operação, bem como entender o comportamento do material, geralmente utiliza-se o método da secagem em camada fina. A partir dela é possível se compreender a cinética da secagem para esse sólido e se determinar a temperatura ótima para a manutenção de suas propriedades (BALA, 2017).

Segundo Kucuk *et al.* (2014), modelos de secagem em camada fina são adequados quando:

- Produto único ou uma monocamada do mesmo apresenta condições de secagem tais como temperatura, umidade e velocidade do ar homogêneas
- Uma multicamada caso para qualquer instante do processo as condições de umidade e temperatura do ar de secagem permaneçam no mesmo estado termodinâmico

Em uma camada fina, o leito fixo não apresenta gradientes significativos no sentido axial, conforme descrito em trabalhos como os de Vieira (2012) e Perazzini (2014).

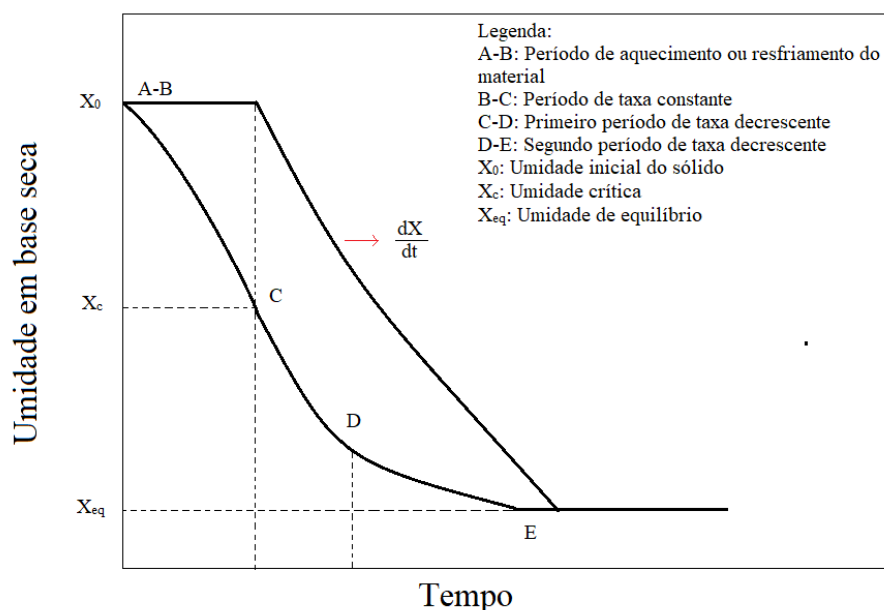
A cinética da secagem em camada fina fornece informações relevantes a respeito dos mecanismos de transferência predominantes na secagem de um sólido. Sherwood (1929a) e Lewis (1921) realizaram estudos nos quais apresentam-se teorias acerca das relações entre a cinética de secagem e os principais mecanismos envolvidos.

Segundo Sherwood, a remoção da água do interior de um sólido para a sua superfície e subsequente transferência para o ar de secagem ocorre graças a três mecanismos gerais:

- i. Evaporação do líquido na superfície do sólido: a resistência a remoção de vapor da superfície é grande em relação a resistência difusiva no interior do sólido
- ii. Evaporação na superfície do sólido: o interior do sólido apresenta maior resistência a difusão do líquido em relação a resistência superficial para a remoção de vapor
- iii. 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.

Vale ressaltar que uma secagem pode apresentar diferentes mecanismos de transferência, dependendo das condições iniciais do material e do ar de secagem, conforme Sherwood (1929b). Um sólido com água presente em sua superfície, por exemplo, passa primeiramente por um período de secagem constante, onde o mecanismo predominante é o do item i (evaporação do líquido na superfície do sólido). Após a remoção da água de sua superfície, o material passa por períodos de secagem decrescente, onde o mecanismo predominante é como apresentado nos itens ii (evaporação na superfície do sólido) ou iii (evaporação no interior do sólido). O comportamento desse processo é melhor ilustrado na Figura 4 abaixo:

Figura 4 – Esquema simplificado de uma curva de secagem



Fonte: Adaptado de Bala (2017)

O período de taxa de secagem decrescente pode ser dividido em duas partes:

- Primeiro período de secagem decrescente, ocorrido devido a redução de umidade presente na superfície do sólido
- Segundo período de secagem decrescente, onde basicamente não há mais umidade presente na superfície do sólido e a difusão que ocorre em seu interior rege o processo.

Podem ser encontrados na literatura alguns modelos empíricos e semi-empíricos que descrevem a cinética da secagem em camada fina, tais como o modelo de Lewis descrito no item seguinte.

2.5 MODELO DE LEWIS PARA SECAGEM EM CAMADA FINA

Também conhecido como modelo de Newton, esse modelo foi proposto por Lewis (1921) e apresenta uma analogia entre a Lei de Resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção e a transferência de massa. Segundo esse modelo, a taxa de secagem é proporcional à diferença entre a umidade do material para qualquer instante e a umidade de equilíbrio, conforme a Equação 1:

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

Assim, o modelo de Lewis (1921), exposto na Equação 2 abaixo, é obtido através da integração da Equação 1 seguido da aplicação da função exponencial de ambos os lados. Obtendo-se:

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

Esse foi o modelo de cinética de secagem usado nas simulações. Existem outras opções de modelos cinéticos para outros tipos de sólidos, além do modelo difusivo que, apesar de complexo, costuma se ajustar bem em vários casos.

2.6 MODELO DE DUAS FASES DE MASSARANI E SILVA TELLES

Mencionado anteriormente, o modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), foi utilizado nas simulações de diversos estudos envolvendo secagem (ALBINI, 2019; CALÇADA et al., 1994 e GENARO, 2021).

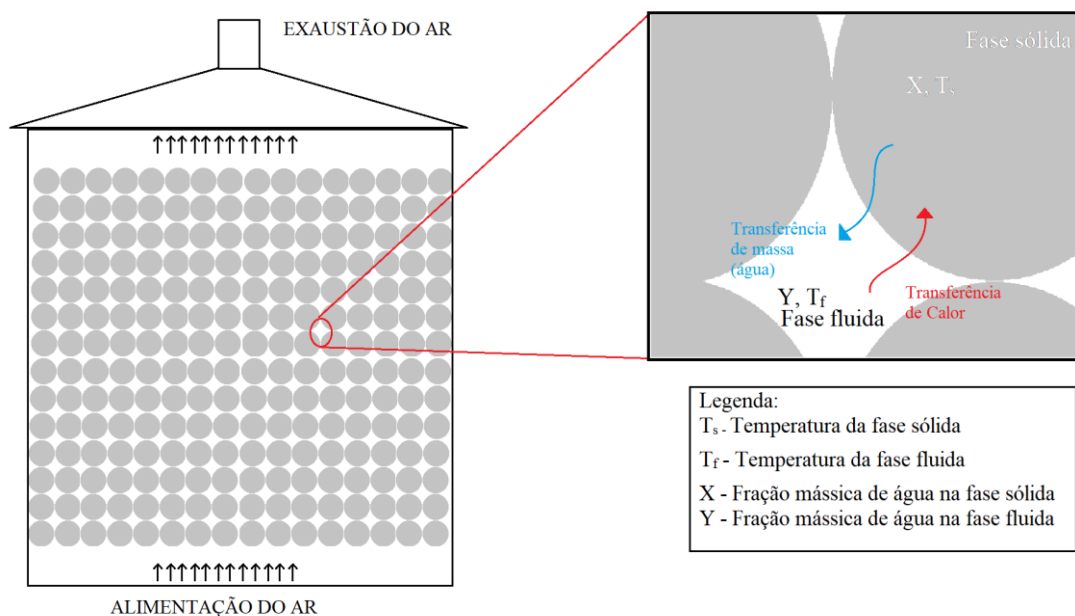
Esse modelo tem como base a Teoria de Misturas de Truesdell (1957) e na proposição de Gurtin e Vargas (1971), ele divide cada posição dos materiais envolvidos na secagem em uma fase fluida e uma fase sólida, supondo que ambas sejam contínuas. Considera-se as duas fases como:

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

O modelo original utiliza equações de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, além de equações constitutivas e isotermas de secagem. A Figura 5 ilustra as duas fases descritas no modelo de Massarani e Silva Telles e contém as principais informações obtidas através dele

- Fração mássica de água na fase sólida (X);
- Fração mássica de água na fase fluida (Y);
- Temperatura da fase sólida (T_s);
- Temperatura da fase fluida (T_f)

Figura 5: Ilustração simplificada das fases sólida e fluida para secagem em leito fixo proposta pelo modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles



Fonte: Elaborado pelo autor

Para sua aplicação, o modelo de duas fases de Massarani e Telles assume as seguintes simplificações:

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

Dessa forma, o modelo é descrito por duas equações diferenciais parciais referentes ao balanço de energia e duas equações diferenciais parciais referentes ao balanço de massa, conforme exibido nas Equações a seguir:

Balço de Massa da Fase Sólida

$$\frac{\partial X(z,t)}{\partial t} = \frac{-f}{(1-\varepsilon)\rho_s} \quad (3)$$

Balço de massa na fase fluida

$$\frac{\partial Y(z,t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon\rho_f} \left(f - G_f \frac{\partial Y(z,t)}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Balço de energia da fase Sólida

$$\frac{\partial T_s(z,t)}{\partial t} = \frac{ha [T_f(z,t) - T_s(z,t)] - \lambda f}{(1-\varepsilon)\rho_s c p_s} \quad (5)$$

Balço de energia na fase fluida

$$\varepsilon \rho_f c p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial t} + \rho_f c p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial z} = -ha [T_f(z,t) - T_s(z,t)] - f c p_f [T_f(z,t) - T_s(z,t)] \quad (6)$$

A fim de simplificar medições temperatura, dada a dificuldade de se mensurar separadamente as temperaturas do sólido e do fluido ao longo do eixo, utilizou-se o conceito de temperatura de mistura. Desta forma assume-se que $T_f(z,t) = T_s(z,t) = T_{mix}(z,t)$. Essa é teoricamente a temperatura medida pela ponta de um termopar ao estar em contato parcial com sólido e fluido.

Desta maneira foi possível se agrupar as equações de balanço de energia de fluido e sólido, dando origem a uma equação diferencial parcial que representasse a mistura entre o fluido de secagem e o sólido, conforme descrito na Equação 7:

$$\frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial t} = \frac{-\lambda f - G_f [c p_f + Y(z,t) c p_v] \frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial z}}{(1-\varepsilon)\rho_s [c p_s + X(z,t) c p_l] + \varepsilon \rho_f [c p_f + Y(z,t) c p_v]} \quad (7)$$

Além da simplificação evidente, na Equação 7 não aparece o coeficiente convectivo, que é difícil de obter na prática. Para a resolução do sistema de equações são dadas as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$X(z, 0) = X_0 \quad (8)$$

$$Y(z, 0) = Y_0 \quad (9)$$

$$T_{mix}(z, 0) = T_{m0} \quad (10)$$

$$T_{mix}(z, t > 0) = T_0 \quad (11)$$

Sendo, X_0 a umidade inicial da fase sólido em base sólida, Y_0 a umidade mássica absoluta do ar de secagem, T_{m0} a temperatura inicial da mistura sólido e fluido no leito de secagem e T_0 a temperatura inicial do ar de secagem.

Outro conceito importante é o de velocidade de secagem, aqui descrita pelo modelo de Lewis, escolhido por descrever de maneira simples e efetiva a velocidade de secagem em camada fina. Esse modelo é descrito pela Equação 12:

$$f = \frac{\partial X(z,t)}{\partial t} = -k (X - X_{eq}) \quad (12)$$

Sendo k a constante de secagem que pode ser obtida através de uma equação do tipo de Arrhenius, conforme exposto abaixo:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R} \frac{1}{(T_{mix}(z,t)+273,15)}\right) \quad (13)$$

Onde determinou-se os parâmetros k_0 e E_a/R foram determinados a partir da linearização da Equação 13 a partir de dados coletados a partir da secagem de alumina em camada fina, obtendo-se k_0 e E_a/R $1,124 \text{ s}^{-1}$ e $2129,529 \text{ K}$ respectivamente.

Já os valores da umidade de equilíbrio (X_{eq}) são obtidos a partir de isotermas de GAB, tais como a Equação 14 que apresenta a isoterma para a temperatura de 40 °C

$$X_{eq} = \frac{0,240588 UR}{(1-0,149827 UR)(1-0,149827 UR+0,209454 UR)} \quad (14)$$

A Equação 12 mostra que quando $(X - X_{eq}) > 0$, então a umidade dentro do sólido num dado instante é maior do que a de equilíbrio, portanto, X diminui e o sólido seca. A todo instante, X busca se aproximar de X_{eq} , quando atinge esse valor de equilíbrio, não há mais secagem. Seguindo essa mesma linha de raciocínio, quando $(X - X_{eq}) < 0$, isso significa que a umidade X dentro do sólido está menor do que a de equilíbrio, portanto, o sólido recebe umidade do ar. Esse processo de perder ou de ganhar umidade só cessa quando $X = X_{eq}$. O valor de X_{eq} é sempre mais baixo na entrada do ar, ou seja, em $z = 0$ (base) quando o escoamento está para cima, ou em $z = 10$ cm (topo) quando o escoamento está para baixo. X_{eq} (Equação 15) depende da umidade relativa do ar aquecido, que por sua vez foi calculada, nesse trabalho, usando-se a temperatura de mistura, que varia a cada camada axial do leito.

- **CONDIÇÕES DO AR DE SECAGEM**

Para o modelo de duas fases utilizado, a umidade relativa é dada através da seguinte equação psicrométrica:

$$UR = \frac{P_{ab}}{P_{sat}} \quad (15)$$

Onde P_{sat} é a pressão de vapor saturado obtida através da equação de Antoine:

$$P_{sat} = \exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{T+273,15-46,13}\right) \quad (16)$$

E P_{ab} é a pressão do vapor de água na temperatura do ar ambiente, dada por:

$$P_{ab} = \exp\left(\frac{1,6055 Y}{1+1,6055 Y}\right) \quad (17)$$

Essas equações compõe um sistema de equações diferenciais ordinárias cuja solução foi obtida através do programa MatLab® R2016a através da função ode23s. O modelo utilizado estimou a umidade média do leito de secagem através da integral numérica da umidade discretizada para cada ponto i no espaço. Conforme descrito a seguir:

$$\overline{X(t)} = \frac{\int_0^L X_i(t) A_t dz}{\int_0^L A_t dz} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i(t) \Delta z}{L} \quad (18)$$

Calçada et al. (1994) utilizaram o modelo para analisar a secagem de esferas de alumina em camadas fina e espessa. Nos experimentos de secagem em camada delgada, foi possível analisar os efeitos que a variação na temperatura e na vazão do gás de secagem tiveram na cinética do processo. A conclusão dos autores foi que a vazão do ar de secagem teve maior influência na cinética de secagem em camada fina do que a temperatura de entrada do ar.

No trabalho de Albini (2019) foi simulada a transferência de calor e de massa no processo de secagem de cevada em leito fixo com escoamento ascendente através do modelo de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles levando em consideração o encolhimento através de uma regressão linear simples. Outra substituição no modelo foi a temperatura de mistura ao invés da temperatura de cada fase. Essa substituição foi feita para a verificação experimental, uma vez que é essa a temperatura que o termopar mede (cuja ponta está em contato tanto com ar quanto com a partícula). Ao transformar as temperaturas das duas fases em temperatura de mistura, elimina-se do modelo o coeficiente de transferência de calor (h), simplificando a simulação. Os resultados obtidos apresentaram erros médios relativos entre 1,0% e 13,6% em relação aos dados experimentais, evidenciando o potencial do modelo para simular processos desse tipo.

Por fim o estudo experimental e numérico de secagem realizado por Genaro (2021) avaliou a aplicação do modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles para a secagem de alumina com e sem reversão de escoamento. Obtendo erros absolutos médios de 2,38% a 11,87% e de 1,70% a 6,59% para as temperaturas experimentais, com e sem reversão do escoamento. Já para a umidade média em posições axiais para os processos com e sem reversão de fluxo os erros foram de 7,66% a 33,18% e 11,33% a 28,94%, respectivamente.

2.7 INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE O SCRIPT MATLAB®

Uma das características mais importantes de um programa de computador é a sua estruturação, além da lógica de programação, deve haver também otimização das linhas de comando. Na prática, essa divisão do leito em camadas delgadas possibilitou que as equações do modelo (Eqs 3-18) fossem facilmente discretizadas na componente axial e integradas numericamente através de funções pré-programadas.

Mesmo sendo somente um usuário do programa, foi necessário entender as linhas gerais da programação para evitar a simulação tipo “caixa preta”, sem uma noção mínima sobre o processamento feito. Em matemática, uma equação diferencial rígida (stiff) pode gerar instabilidades numéricas quando se usa métodos numéricos convencionais, a menos que o tamanho do passo de integração seja muito menor do que o default do MatLab. Via de regra, deixando de lado o rigor matemático, uma equação diferencial rígida inclui alguns termos que podem levar a uma rápida variação na solução. Nas simulações com reversão, a rápida mudança no sentido do escoamento altera bruscamente as condições nos contornos (base e topo). O MatLab possui as funções numéricas ode23s e ode45s (sendo “s” de stiff) justamente para contemplar esse tipo de comportamento dinâmico.

Nas simulações foi usada a função ode23s que resolve numericamente as equações do modelo através do método de Runge-Kutta, para funções de rigidez (“stiffness”) moderada. Essa função MatLab divide o tempo em intervalos desiguais, menores quando a resposta varia muito, maiores quando a resposta varia pouco (mais suave). Mesmo usando a ode23s, foi preciso reparametrizar a função especificando no “options” uma tolerância de erro relativo diferente do default.

3 MÉTODOS E MODELAGEM

Nesta seção são descritos a unidade experimental simulada, as características do material secado, bem como as condições de operação do processo de secagem da alumina em leito fixo, com e sem reversão do fluido de secagem. A secagem em camada fina e a metodologia para análise energética desse processo também é apresentada e utilizada para o desenvolvimento do modelo matemático. A partir do equacionamento obtido, são descritos o modelo matemático e os métodos numéricos utilizados para obter os resultados da simulação.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 ALUMINA

O material cuja secagem foi simulada trata-se de pequenas esferas de alumina de diâmetro médio de $3,2 \pm 0,2$ mm e teor de umidade inicial 0,45, suas propriedades físicas e térmicas estão disponíveis na literatura e descritas 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 [kg m ⁻³]: $\rho_s=1690$
Perazzini (2014)	Área específica [m ² g ⁻¹]: 294,81
Perazzini (2014)	Volume específico dos poros da partícula [cm ³ g ⁻¹]: 0,40
Perazzini (2014)	Diâmetro médio dos poros da partícula [nm]: 5,43
Perazzini (2014)	Condutividade térmica efetiva na estagnação [W m ⁻¹ K ⁻¹]: $k_{ef}=4,6 \pm 0,14$
Calçada <i>et al.</i> (2006)	Calor específico da partícula em função da temperatura (Ts): $C_{ps}=41,04 (22,08+8,97 \cdot 10^{-3} T_s-5,23 \cdot 10^{-5} T_s^2)$

Fonte: Elaborado pelo autor

A umidade média do leito fixo (W) em função do tempo pode ser descrita através da Equação 19:

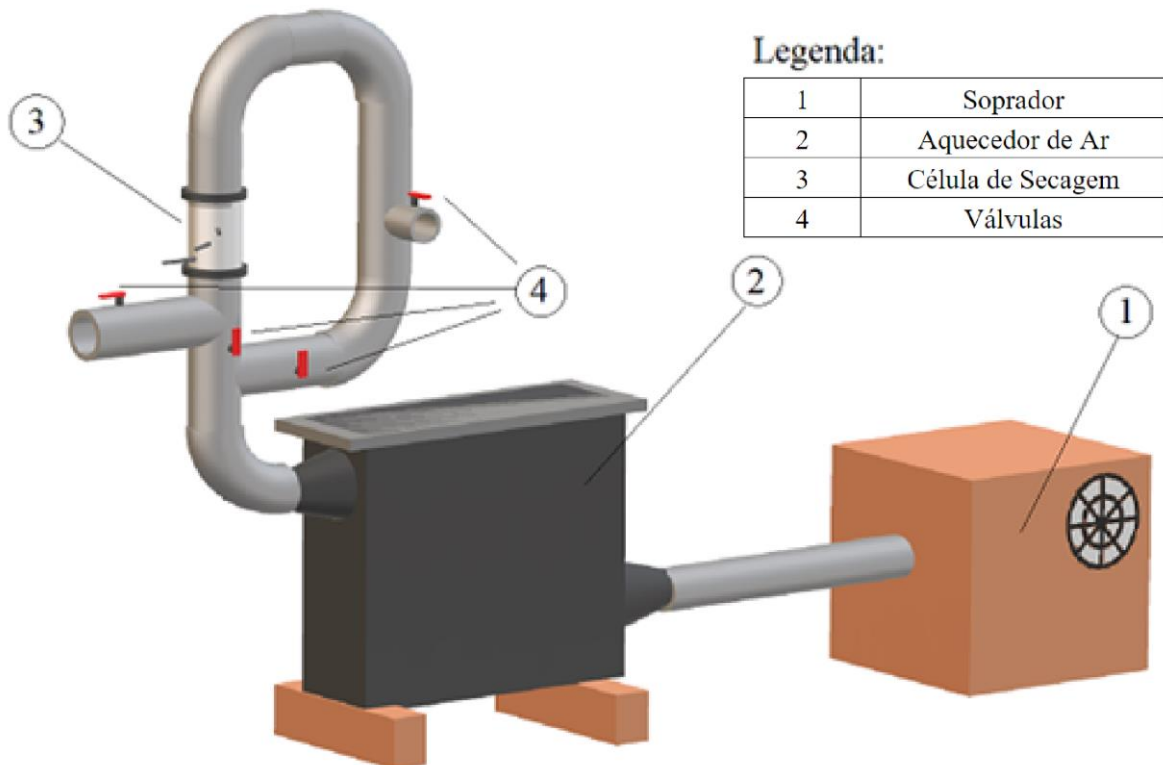
$$W(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (19)$$

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

3.1.2 UNIDADE EXPERIMENTAL

O programa que simula a secagem da alumina com e sem reversão foi obtido e verificando experimentalmente no secador descrito nessa seção. Um esquema simplificado do equipamento é mostrado na Figura 6. Nesse esquema, o soprador coleta ar ambiente, que passa por um banco de resistências elétricas onde ele é aquecido e depois esse ar aquecido é alimentado ao secador. O ar ambiente é captado, aquecido e bombeado através do secador, onde conforme descrito nas Figuras 7a e 7b válvulas são utilizadas para que o fluxo do fluido possa ser alternado entre ascendente e descendente.

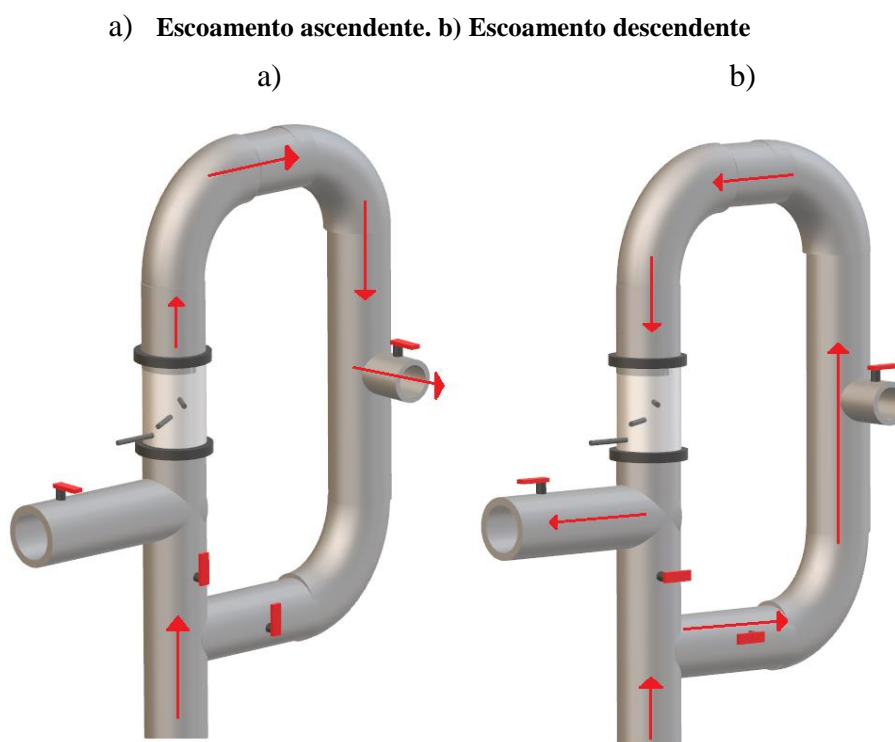
Figura 6: Ilustração simplificada fora de escala do aparato experimental simulado



Fonte: Elaborado pelo autor

A câmara de secagem tem 10 cm de diâmetro de 10 cm de altura, é feita de acrílico e pode ser removida e acoplada ao equipamento. Nessa câmara também são acoplados termopares e transdutores de pressão a fim de medir temperatura e pressão ao longo do leito fixo. A Figura 7 mostra o jogo de válvulas responsável pela inversão no sentido do escoamento de ar. Uma característica singular do esquema experimental é que o percurso que o fluido faz no sentido reverso do leito (de cima para baixo) é consideravelmente mais longo. Existem configurações que diminuem essa diferença, mas no equipamento usado por Genaro (2021), a assimetria entre o percurso do ar em cada sentido de escoamento fez com que houvesse também diferenças significativas nas temperaturas de entrada pela base e pelo topo. Isso ocorre porque houve maior troca de calor para o ambiente no percurso mais longo. Uma forma de manter a temperatura do ar descendente igual à do ar ascendente seria usando sistemas de controle, automáticos ou manuais.

Figura 7: Ilustração simplificada da operação do secador de leito fixo (fora de escala):



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale dizer que, apesar de inevitável, a diferença de temperatura entre as correntes de ar ascendente e descendente não compromete a análise pois foi levada em conta nas simulações.

Uma informação prática sobre a construção desse secador é que ele foi feito em módulos, começando por uma célula de 1 cm de espessura para estudos fundamentais do

modelo de Fick. A partir dessa célula, aproveitando o espaço físico e materiais disponíveis no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, ao longo de pouco mais de seis anos, foi construído o leito fixo com reversão na versão usada por Genaro (2021). A etapa de desenvolvimento posterior ao trabalho de Genaro (2021) atualizou e melhorou o sistema de aquisição de dados e, principalmente, a instrumentação analógico-digital. Esforços vem sendo feitos para que modelos adaptativos sejam desenvolvidos e verificados experimentalmente.

3.2 SECAGEM EM CAMADA ESPESSA

Na área de sistemas particulados, camada espessa é uma altura de leito em que os gradientes de temperatura e de umidade são significativos. As simulações de secagem de alumina fornecem a temperatura do leito como função da posição e do tempo, bem como as umidades médias do leito e de cada fração de 1 cm do mesmo. O processo foi simulado para a operação convencional e com reversão de escoamento, com temperatura de ar aquecido ascendente de 100°C, descendente de 90°C (devido a maior troca de calor com a tubulação), vazão mássica de 0,390 kg/min e umidade inicial de 0,016. Para a reversão, definiu-se o tempo até a primeira reversão (t_0) bem como o intervalo entre reversões (Δt) igual a 10 minutos.

3.3 MODELO DE DUAS FASES PARA SECAGEM EM LEITO FIXO ESPESSO

A simulação utiliza o modelo matemático de duas fases para secagem em leito fixo espesso descrito por Massarani e Telles. A partir do sistema de equações que rege o processo descrito anteriormente, foi utilizado o script do programa MatLab® 2015a criado por Genaro (2021) para obter os resultados a partir das condições definidas neste trabalho.

3.4 VALORES DOS INPUTS NO SCRIPT DO MATLAB

A partir do programa escrito em MatLab® 2015a por Genaro (2021), foram feitas simulações do modelo de duas fases juntamente com as equações constitutivas para as condições de contorno e iniciais pertinentes (Equações 3-18). As condições operacionais usadas nos experimentos numéricos estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores nominais de operação para a simulação do processo de secagem

Variável	Valor Nominal
Temperatura do ar aquecido ascendente	100 °C
Temperatura do ar aquecido descendente	90 °C
Vazão mássica do ar de secagem	0,390 kg min ⁻¹
Umidade inicial do ar	0,016
Teor de umidade inicial da alumina	0,45
Temperatura inicial do leito	20,8 °C

Fonte: Elaborado pelo autor

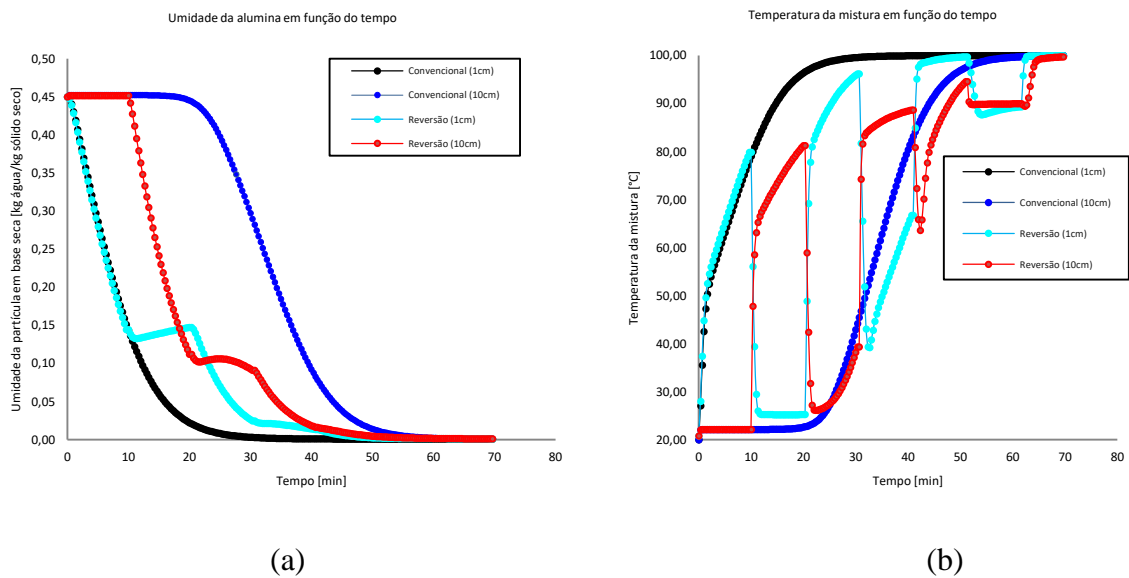
É importante ressaltar que, apesar de ser muito elevada para a secagem de grãos, a temperatura de 100 °C foi escolhida para a utilização nas simulações a fim de expandir as faixas de temperatura trabalhadas em estudos anteriores, tais como o de Genaro (2021), com intuito de validar o modelo para outras condições operacionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão expostos os resultados obtidos através da execução do script do software MatLab® descrito anteriormente bem como discussões acerca dos fenômenos envolvidos.

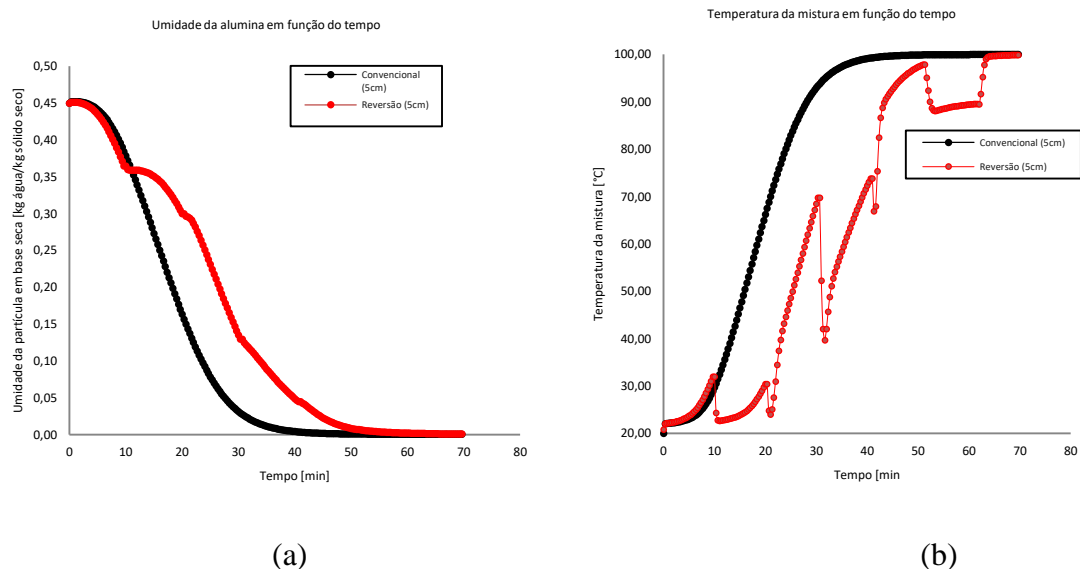
Para melhor visualizar os resultados, são apresentados somente os resultados para as camadas referentes às extremidades (1 cm e 10 cm) e ao centro (5 cm) da célula de secagem experimental simulada, como mostram as Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Variáveis de operação com e sem reversão a 1 e 10 cm: (a) Umidade da alumina contra o tempo; (b) Temperatura de mistura da alumina contra o tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Variáveis de operação com e sem reversão a 5 cm: (a) Umidade da alumina contra o tempo; (b) Temperatura de mistura da alumina contra o tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Para analisar os resultados da simulação exibidos nos gráficos acima, deve-se levar em conta três pontos principais relativos ao processo e o produto:

- Gasto de energia – Diretamente relacionado ao tempo total de secagem até o produto atingir o equilíbrio
- Características físico-químicas do produto – Relacionadas aos gradientes de temperatura e umidade obtidos ao longo da célula de secagem
- Taxa de secagem – taxa em que a umidade é removida dos sólidos

Olhando para as Figuras 8 e 9, as curvas não coincidem nos primeiros 10 minutos de simulação pois há diferenças nas especificações da ode23s para o caso com e sem reversão. A resposta da operação com reversão apresenta rigidez enquanto que a da operação sem reversão é suave. Portanto, os resultados não coincidentes são meramente uma questão numérica que pode ser desprezada. A Figura 8 mostra que há uma aproximação entre as variáveis de estado do topo e da base assim que a primeira reversão é feita. Ao longo da secagem com reversão, tanto a temperatura quanto a umidade do sólido permanecem dentro de um intervalo limitado pela operação sem reversão. Como previsto pela técnica, as variáveis se aproximam progressivamente a medida em que segue a secagem.

Contudo, a Figura 9 mostra que a camada intermediária no meio do leito leva mais tempo para aquecer e a secar quando há reversão no sentido do escoamento. Essa é uma desvantagem da reversão se comparada à operação convencional, ou seja, a reversão torna a secagem mais demorada e eventualmente menos eficiente do ponto de vista energético. Deve-se ter em mente que a cada reversão, perturba-se o equilíbrio térmico dentro do leito, portanto, se por um lado a técnica de fato reduz os gradientes, por outro, há ônus na questão energética. Não feita análise energética nesse trabalho, mas Genaro (2021) concluiu, a partir de experimentos de laboratório, que a secagem com reversão gasta mais energia térmica do que a sem reversão.

Outra desvantagem da técnica é causar reumidificação a cada reversão. Quanto mais distante da entrada do ar aquecido, mais a temperatura demora a ser elevada, pois o ar que passa por essas regiões já trocou calor e “resfriou” até chegar nas camadas mais internas do leito. Dessa forma, devido à quantidade de umidade fracamente ligada, o que implica também numa facilidade maior de adsorver umidade, as temperaturas da alumina oscilam significativamente durante os ciclos de reversão, como mostra a Figura 8b. Por ser um mecanismo de transferência acoplado, decorre disso a indesejada reumidificação. É preciso ter em mente que a cada reumidificação o processo se afasta da secagem, tornando-se menos eficiente e mais demorado. Esse é um incentivo para estudos futuros.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir da comparação entre os resultados de simulação de secagem da alumina em leito fixo espesso com e sem reversão do sentido do escoamento do ar, pôde-se concluir que a técnica de fato fez diminuir os gradientes de temperatura e de umidade dentro do secador. A contrapartida foi tornar a secagem mais demorada. O conhecimento alcançado ao estudar e entender as etapas de desenvolvimento e verificação do modelo matemático de duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) foi essencial para que a análise comparativa fosse feita em termos do que acontece na realidade, não só do que é simulado. As simulações permitiram que análises fisicamente consistentes fossem feitas com experimentos numéricos analogamente ao que seria feito partindo de experimentos de laboratório. Dentro dos limites de escopo do trabalho, foi possível contextualizar os resultados obtidos para a alumina no âmbito da secagem de grãos e de sementes.

Por fim, trabalhos futuros podem analisar os efeitos da temperatura do ar de secagem e de diferentes intervalos de reversão de escoamento no processo dentro do contexto da análise energética. Visando, assim, a redução do processo de reumidificação e consequente redução do consumo de energia dessa técnica, tornando mais interessante sua aplicação industrial.

REFERÊNCIAS

- 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, F. 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: 27 de Fevereiro 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. - Chapter 46 – Energy Aspects in Drying. p. 1075-1099 – em: **Handbook of Industrial Drying**., MUJUMDAR, 2014.

TRUESDELL, 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.