

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

**INFLUÊNCIA DA ALTURA DE UM SECADOR TIPO
LEITO FIXO DE ALUMINA COM REVERSÃO DE
ESCOAMENTO DO AR**

Davi Chaparro Rosa de Oliveira

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos, SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

Convidado: MSc. Thalyne Rocha

Co-orientador: MSc. Luan da Silva Barbosa

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família. Sem o apoio indispensável dela eu não teria conseguido chegar até aqui. Em especial ao meu irmão Samuel, com quem compartilho o mesmo sangue, que muitas vezes acreditou em mim mais do que eu mesmo e em todos os momentos esteve ao meu lado. Ao meu pai José, por ter um coração enorme e ter me ensinado a olhar o próximo muitas vezes antes de mim mesmo. A minha vó Marisete, por sempre ter me dado todo o apoio necessário para que eu pudesse chegar até onde cheguei e sempre ter me colocado em suas orações diárias. A minha bisavó Nadyr, que não se faz mais presente neste plano, mas tenho certeza de que nunca deixou de olhar por mim.

A todas as pessoas que na faculdade, de alguma forma, marcaram minha vida e me ajudaram a ser quem eu sou, em especial a todos os amigos que fiz nestes anos e com quem compartilhei os melhores e mais incríveis momentos da minha vida. Sem essas pessoas isso também não teria sido possível. Em especial aos amigos da família Elite, hoje Peble, a quem devo muito.

E por último e mais importante, agradeço a minha mãe Valéria, que sempre foi meu porto seguro, farol, rocha e escudo. Nunca e em nenhum segundo duvidou de mim e em todos os momentos da minha vida me apoiou, me deu forças, ânimo, alegria e amor infinitos para eu chegar até aqui. Obrigado, mãe.

“O senhor... mire, veja:
o mais importante e bonito do mundo é isto:
que as pessoas não estão sempre iguais,
ainda não foram terminadas,
mas que elas vão sempre mudando.”

Guimarães Rosa

RESUMO

A secagem em larga escala é uma operação unitária que demanda grandes quantidades de energia térmica, sendo assim, ela deve ser feita de forma otimizada. Um tipo de secagem comumente encontrado na indústria química é na forma de colunas de recheio, havendo uma vasta gama de aplicações práticas. A secagem em leito fixo pode ser feita em batelada e em pequena escala, mas conhecer os mecanismos envolvidos no processo serve de base para entender e estender esse conhecimento para a secagem de sólidos em esteiras rolantes e, até mesmo, prever o comportamento dinâmico em silos de armazenamento. Se por um lado os leitos fixos espessos previnem choques mecânicos, uma vez que o material particulado não se move, por outro, geram gradientes de umidade e temperatura significativos durante o processamento. No caso da secagem, os sólidos mais próximos da entrada de ar quente secam mais rápido do que os do topo, dependendo da aplicação, essa desuniformidade pode ser um problema. Uma alternativa para contornar essa dificuldade é inverter o sentido de escoamento do ar aquecido de tempos em tempos, ora ascendente, ora descendente. A presente proposta de TG aqui resumida teve por objetivo mostrar a influência da altura do leito no processo de homogeneização da secagem de alumina usando a técnica de reversão de escoamento. Foram feitas simulações numéricas usando um programa em MatLab desenvolvido na área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar. Analisando os resultados das simulações, foi possível verificar que dobrando a altura do leito, o tempo de secagem total dobrou também. Além disso, foi verificado que o fenômeno de reumidificação também foi intensificado.

Palavras-chave: Secagem em leito fixo. Alumina. Escoamento reverso. Ar.

ABSTRACT

The drying process in industrial scale is a unit operation that demands large amounts of thermal energy. This process always needs to be done in an optimized way. Fixed beds are commonly found in the chemical industry as packed columns and have lots of practical applications. Even though the fixed bed drying process is used only in minor scales, knowing the mechanisms of this process could be useful to understand and extend the knowledge in other applications, such as solid drying in treadmill and prevent the dynamic behavior in storage silos, for example. In a way, thick fixed beds prevent mechanic shocks, because the particulate material don't move, but can cause significative temperature and moisture gradients during the process. In the drying process, the products that are closer of the hot air entrance dry faster than the products that are on the top. This kind of unevenness can be a problem, depending on the application. An alternative to overcome this situation is to reverse the hot air flow in time to time, sometimes ascending, sometimes descending. The objective of this work was to show de influence of the dimensions of the fixed bed in the homogenous drying process of alumina using the air flow reversal technique. Numerical tests were made using a program in Matlab software, developed in the Particulate Systems area of the Chemical Engineering Department of UFSCar. By the analysis of the results of the simulations, this study intends to analyze what happens with the fixed bed when it gains or loses volume, changing the bed height.

Keywords: Fixed bed drying. Alumina. Air flow reversal.

SUMÁRIO

Banca examinadora.....	2
Agradecimentos.....	3
Resumo.....	5
Abstract.....	6
Lista de figuras.....	8
1 - INTRODUÇÃO.....	9
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 – Secagem.....	11
2.2 – Curvas de secagem.....	12
2.3 – Cinética de secagem.....	15
2.4 – Encolhimento.....	16
2.5 – Secador de leito fixo.....	17
2.6 – Alumina.....	18
2.7 – Modelagem matemática.....	18
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 – Propriedades do material de secagem.....	21
3.2 – Equipamentos.....	22
3.3 – Aspectos gerais sobre o programa.....	24
3.4 – Aspectos gerais sobre os experimentos.....	24
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5 – CONCLUSÃO.....	32

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lista de figuras

Fig.1	Representação esquemática de um processo de secagem	11
Fig.2	Representação esquemática de curvas típicas de secagem	13
Fig.3	Representação esquemática do sistema de secagem	23
Fig.4	Representação esquemática do fluxo ascendente de ar de secagem	23
Fig.5	Representação esquemática do fluxo descendente de ar de secagem	23
Fig.6	Umidade da alumina em função do tempo	25
Fig.7	Temperatura da mistura em função do tempo	25
Fig.8	Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos	26
Fig.9	Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 15 minutos	27
Fig.10	Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 20 minutos	27
Fig.11	Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos	29
Fig.12	Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 15 minutos	30
Fig.13	Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 20 minutos	30

1 – INTRODUÇÃO

A secagem é um dos processos de conservação de alimentos mais antigos utilizados pelo homem. Datando de até 20.000 anos A.C., frutos, grãos e carnes eram expostos ao vento e calor para que essas ações da natureza retirassem a umidade dos alimentos, realizando um processo rústico de secagem, e aumentassem a vida útil destes (HAYASHI, 1989).

A desvantagem da utilização desses métodos naturais de secagem é que não havia uma uniformidade no processo, que dependia do clima no qual estava inserido, além de que o tempo utilizado para realização era muito grande. Historiadores indicam que métodos rudimentares utilizando essas ações da natureza foram utilizados até 1440 no Peru e México, por exemplo, para secagem de folhas e frutos do cacau (HAYASHI, 1989).

No século 18, foi registrada a primeira patente de um processo de secagem de vegetais, nos Estados Unidos. Por ser um processo ainda muito primário, a qualidade dos vegetais secos era muito baixa. No final do século 19, alguns métodos mais avançados de secagem de alimentos começaram a aparecer, como secagem de frutos por meio de salas de aquecimento e a criação da secagem por aspersão (*spray dryer*). Já no século 20, outros secadores foram sendo desenvolvidos, como a secagem por flash e por fluidização e assim como diversos outros processos, principalmente após a Segunda Guerra, os métodos mecânicos de secagem tiveram um desenvolvimento muito grande (HAYASHI, 1989).

Ainda hoje, os grandes entraves do processo de secagem consistem em achar um método que seja eficiente energeticamente, com tempo de processo reduzido e que mantenha a qualidade final do produto. É estimado que processos térmicos de desidratação contribuam com 9% a 25% do consumo energético de uma indústria, visto que é necessário uma alta demanda energética para realizar a evaporação da água, além do que, secadores industriais normalmente apresentam baixas eficiências energéticas (PASSOS, MUJUMDAR, 1998).

Graças ao desenvolvimento tecnológico e científico, houve uma melhoria nos processos de secagem. Com esses avanços foi possível conhecer mais sobre as variáveis e parâmetros que influenciam o processo, contribuindo para o surgimento de novos

métodos, sejam em escala menor ou maior (escala industrial), otimizando o processo como um todo. Diversos são os tipos de secadores industriais encontrados atualmente, tais como secadores rotativos, de leito rolante ou fluidizado, secadores de condução ou convecção e os secadores de leito fixo.

Os secadores de leito fixo também são conhecidos como estacionários ou em camada fixa. São semelhantes a tubos ou silos cilíndricos cujo leito de secagem possui o fundo composto por chapas perfuradas, de forma que o ar utilizado na secagem passe por entre as aberturas, onde o produto esteja exposto sobre essas chapas, e realize a retirada da umidade destes componentes em repouso, realizando a secagem deles (MARTINS, 2015).

É possível ainda encontrar configurações do leito fixo que incluem a reversão do escoamento de ar. A diferença do processo comum de secagem em leito fixo para o de reversão do escoamento de ar é que existe a mudança periódica do sentido desse escoamento. Essa técnica visa diminuir os gradientes de temperatura e umidade do sólido, melhorando a homogeneização das propriedades do produto (ALBINI, 2019). Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar o efeito da mudança de altura de um leito fixo de alumina na operação do secador. Para isso, a partir de resultados simulados, foram estudadas duas alturas de leito e três conjuntos de parâmetros de reversão, utilizando intervalos de tempo para mudança do sentido do escoamento de 10, 15 e 20 minutos.

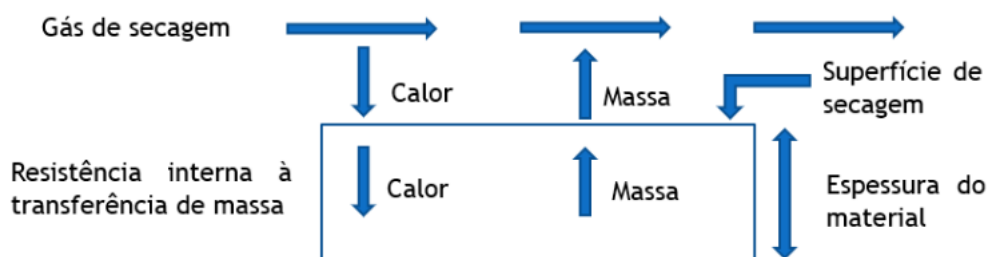
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são abordados os fundamentos teóricos relacionados ao processo de secagem, caracterização física da alumina e dos modelos físicos e matemáticos utilizados na simulação da secagem.

2.1 – Secagem

Pode-se compreender a secagem como sendo uma operação unitária que consiste em retirar um líquido volátil de um material, ocasionando uma redução de massa dele, através do fornecimento de calor. A secagem de produtos pode ocorrer de forma natural ou artificial, sendo que no primeiro método, a retirada de líquido dos componentes ocorre através da incidência solar. Já no segundo, é feita a utilização de algum equipamento de secagem. A Figura 1 a seguir representa esquematicamente o processo de secagem (Martins, 2020).

Figura 1: Representação esquemática de um processo de secagem



Fonte: (GEANKOPLIS,1993)

Tem-se ainda que a secagem engloba dois tipos diferentes fenômenos de transporte que ocorrem simultaneamente: a transferência de calor e a transferência de massa. A transferência de massa do processo de secagem está relacionada com a difusão do líquido volátil do interior do sólido para a superfície do material, de onde é removido por convecção. Já a transferência de calor ocorre na superfície do sólido, onde líquido volátil que ali se encontra vaporiza (MARTINS, 2020).

O fornecimento da fonte calorífica que age na secagem do material pode advir de mecanismos de transferência de calor tais como condução, convecção e radiação. Mesmo que possam atuar separadamente, em grande parte dos casos ocorre a atuação simultânea destes mecanismos. Ainda assim, há um mecanismo principal, que se sobressai (ALBINI, 2019).

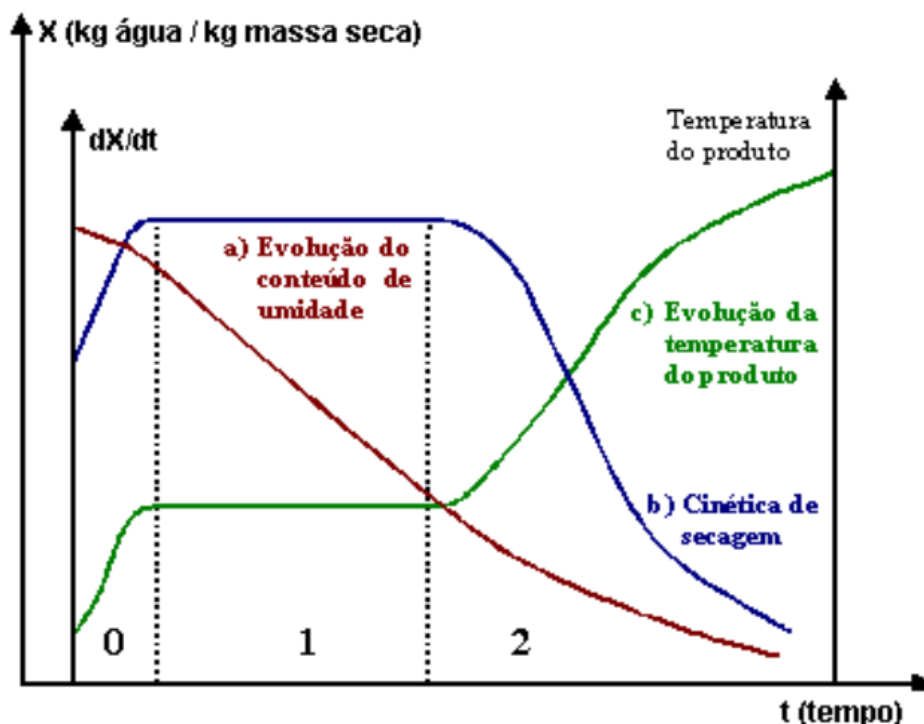
Reforçando, então, esse aspecto, no decorrer do processo de secagem, a água ou líquido volátil deve sair de dentro do material para a superfície deste, onde irá ocorrer a vaporização, representando a transferência de calor. Os principais mecanismos internos relacionados a transferência de massa num processo de secagem são as difusões líquida e de vapor, o escoamento líquido e de vapor. As difusões ocorrem simultaneamente devido aos gradientes de difusão de concentração e de pressão de vapor (intrinsecamente ligado ao gradiente de temperatura). Já os escoamentos ocorrem graças a diversos fatores, como capilaridade, alta temperatura e diferenças de pressão externa e concentração (PARK et al., 2014).

2.2 – Curvas de secagem

Diversos podem ser os efeitos da secagem advindos das diferentes condições e características do produto e ar utilizado no processo. É sabido que a transferência de calor e massa ocorre de forma simultânea, onde a primeira ocorre a troca de calor entre o ar e o produto, graças a diferença de temperatura entre eles, e a segunda ocorre graças a diferença da pressão parcial do vapor d'água que se existe entre a superfície do produto e o ar de secagem (PARK et al., 2014).

O processo de secagem pode ser descrito através das curvas de secagem. Na Figura 2 a seguir são mostradas, de forma exemplificada, a evolução do teor de água X , a temperatura T deste produto e a velocidade de secagem deste produto, representada pela taxa de secagem ao longo de um tempo t . Cada uma das três curvas descritas na Figura 2 representa uma característica do processo (PARK et al., 2014).

Figura 2: Representação esquemática de curvas típicas de secagem



Fonte: (GROFF, 2015)

A quantificação de água no processo, e sua eventual diminuição ao longo do tempo t , é representada pela curva (a). Esse teor de água do produto no processo é medido em base seca.

A velocidade, que também pode ser entendida como taxa, de secagem do produto, é representada pela curva (b). Diz-se taxa, pois é a variação do teor de umidade dividida pela variação de tempo conforme ocorre o processo, taxa essa que pode ser obtida derivando a curva (a).

A terceira e última curva (c) representa a variação da temperatura T do produto em função do tempo de secagem t , sendo obtida medindo a temperatura do produto da secagem no decorrer do tempo.

As curvas de secagem descritas anteriormente auxiliam na compreensão dos processos de transferência de calor e massa que ocorrem ao longo da secagem. Dito isso, é possível dividir o processo em três períodos (0, 1 e 2) que são descritos subsequentemente.

O Período 0 representa o início do processo de secagem e pode ser descrito como período de indução. Ocorre rapidamente e seu tempo de duração frente ao tempo de duração do processo é irrisório. Nesse período, o ar utilizado para a secagem normalmente está com temperatura superior a temperatura do produto. Isso faz com que a velocidade de secagem e, conseqüentemente, a transferência de massa seja inicialmente lenta. Com o aumento do fornecimento de calor no processo através do ar de secagem, ocorre também um aumento da temperatura do produto, da pressão de vapor e da velocidade de secagem. Esse processo de aquecimento vai acontecendo até que toda transferência de calor se torne transferência de massa, de forma que toda energia em forma de calor seja utilizada apenas para retirar umidade da superfície do material (PARK et al., 2014).

O Período 1 é caracterizado pela velocidade ou taxa de secagem constante. A água presente na superfície do produto, ainda em grande quantidade, vaporiza como água livre, visto que as pressões de vapor da água na superfície e da água na temperatura do produto são iguais e constantes. Como explicado no período anterior, toda a transferência de calor é transformada em transferência de massa, o que ocasiona que a temperatura do produto também seja constante e igual a temperatura de bulbo úmido. Sendo constantes a temperatura do produto, conseqüentemente sua pressão de vapor, a taxa ou velocidade de secagem também é constante neste período. Este período acontece durante o tempo que a água que difunde do interior para a superfície do produto continue compensando a perda de água pela evaporação na superfície (PARK et al., 2014).

O Período 2 é caracterizado pela diminuição ou decréscimo da velocidade de secagem. À medida que a temperatura do produto se iguala a temperatura do ar de secagem, há diminuição da taxa ou velocidade de secagem. Ocorre que neste período não há mais a compensação entre as transferências de calor e massa, fazendo com que a temperatura do produto se iguale a temperatura do ar de secagem. Em todo este período, a difusão da água do interior do produto para a superfície é considerada o fator limitante. Ainda se considera que o teor de umidade no ponto de transição entre os Períodos 1 e 2 seja o teor crítico, caracterizado como X_c , visto que é nesse ponto que ocorre a transição da taxa ou velocidade constante de secagem para a taxa decrescente (PARK et al., 2014).

2.3 – Cinética de secagem

O estudo da cinética de secagem é de suma importância para o dimensionamento e otimização de secadores, visto que através desses dados é possível obter outros, como os coeficientes de difusão e de transferência de massa, além de se obter uma previsão da velocidade de secagem mais próxima do valor real (ALBINI, 2019; PARK et al., 2014).

Dos três períodos apresentados anteriormente na Seção 2.2 que compõem o processo de secagem, a cinética do processo será estudada nos períodos 1 e 2. Nesses dois períodos temos que a taxa ou velocidade de secagem do produto se mostra constante no 1 e decrescente no 2 e, por isso, o método para se calcular cada uma delas se mostra diferente, visto que o comportamento da velocidade em cada um dos períodos difere entre si (PARK et al., 2014).

No Período 1, em que a velocidade de secagem é constante, tem-se que todo o processo ocorre na superfície do produto. Neste período em que as transferências de calor e massa se compensam, o processo de secagem é regulado pela interface superfície do produto – ar de secagem. Ainda nesta etapa, visto que toda a energia em forma de calor é utilizada para evaporar a água na superfície, a velocidade de secagem do período constante pode ser calculada pela razão entre o fluxo de calor pelo calor latente de vaporização (PARK et al., 2014).

O Período 2, onde a velocidade de secagem é decrescente, apresenta maior complexidade para o cálculo da taxa de secagem. Este período é regulado não mais na superfície, mas sim pela difusão interna da água para a superfície do produto. A fim de que se encontrar a melhor forma de se representar a cinética de secagem neste período, faz-se o uso dos modelos empíricos e semiempíricos, visto que esses relacionam diretamente a umidade e o tempo de secagem. Os modelos apresentados a seguir pelas Equações 1 e 2 são os modelos de Lewis e o de Page, respectivamente (ALBINI, 2019).

$$MR = \exp(-k_L t) \quad (1)$$

$$MR = \exp(-k_p t^{n_p}) \quad (2)$$

Em que MR representa a umidade adimensional do meio homogêneo, que pode ser representada pela Equação 3 a seguir.

$$MR = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3)$$

Dessa forma, os dois modelos apresentados nas Equações 1 e 2 mostram como a umidade do produto se relaciona com o tempo de secagem dele. Os parâmetros k_L e k_P representam, respectivamente, a constante de secagem dos modelos de Lewis e Page, sendo este parâmetro de relevância por caracterizar a evaporação da umidade. Na Equação 3, $\bar{X}(t)$ representa a concentração média de umidade no produto em um dado tempo t , X_{eq} a concentração de umidade no equilíbrio e a X_0 a concentração inicial de umidade (ALBINI, 2019). O modelo de Lewis foi o utilizado no presente trabalho, ajustando-se adequadamente ao comportamento dinâmico da secagem de alumina. As equações constitutivas para o cálculo de X_{eq} podem ser encontradas em Genaro (2021).

2.4 – Encolhimento

Além de analisar as os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem na secagem, estudar o fenômeno de encolhimento é importante para compreender melhor o processo de secagem. Este fenômeno é caracterizado pela mudança de propriedades do produto de secagem, afetando suas dimensões físicas, ocorrendo devido a retirada da umidade do componente a ser seco (ALBINI, 2019; SUAREZ, VIOLLA, 1990).

Considerar o fenômeno de encolhimento no estudo do processo de secagem pode ser dificultoso, visto que há pouca informação acerca da relação entre a difusividade da umidade no produto e os coeficientes de encolhimento. Para tanto, diversos são os métodos que podem ajudar no entendimento do processo de encolhimento, como os estudos de Sokhansanj e Lang (1996) que utilizaram leis de mistura para a fim de explicar o encolhimento volumétrico ou ainda o estudo de Viollaz e Suarez (1984), que obtiveram uma expressão matemática da Segunda Lei de Fick para secagem, assumindo um encolhimento unidirecional do produto de secagem (ALBINI, 2019; SUAREZ, VIOLLA, 1990).

É necessário reconhecer que o encolhimento é um fenômeno que pode ocorrer durante o processo de secagem. Levá-lo em consideração junto aos modelos utilizados para descrever o processo de secagem é importante para identificar se o leito de secagem continua empacotado ou não, o que pode ocasionar a fluidização do leito e atrapalhar no controle da vazão de ar de secagem e no processo como um todo. Além disso, levar em consideração o fenômeno de encolhimento auxilia na obtenção de melhores representações na modelagem de secagem de materiais.

A escolha da alumina, um composto inorgânico, como produto de secagem neste trabalho faz com que os efeitos de encolhimento apresentados anteriormente não sejam levados em consideração. Entretanto, é importante mencioná-lo com uma breve descrição para que a secagem da alumina esteja no contexto da secagem de grãos e de sementes, cuja demanda por estudos mais aprofundados vem principalmente do agronegócio (GENARO, 2021).

2.5 – Secador de leito fixo

Por terem configurações simples e um custo reduzido para sua implementação, os secadores de leito fixo se apresentam como opções versáteis em processos de secagem de diferentes produtos, como alimentos, produtos agrícolas e materiais particulados. Estes secadores se apresentam como uma câmara cilíndrica com as extremidades perfuradas por onde o ar de secagem atravessa o produto que se encontra em repouso dentro desta câmara (MOURA, 2001).

Além de realizar a secagem, o secador em leito fixo é capaz de armazenar os produtos do processo e, diferente de outros métodos artificiais de secagem, pode utilizar ar não aquecido para retirada de umidade. Este equipamento também permite o compreender melhor as transferências de calor e massa que ocorrem de forma simultânea no processo, fornecendo informações valiosas para estes estudos

De forma negativa, os secadores em leito fixo podem apresentar gradientes significativos de temperatura e de umidade no processo. As dimensões do secador têm relação intrínseca com estes gradientes. Uma forma de minimizar esses efeitos é realizando um tipo de configuração nesses secadores em que o sentido do escoamento do ar de secagem é revertido. Assim, em intervalos periódicos de tempo, o sentido do ar de

secagem é invertido, sendo que a cada momento pré-estabelecido uma das extremidades do secador seja abastecida pelo ar de secagem. (ALBINI, 2019).

2.6 – Alumina

O óxido de alumínio, popularmente conhecido como alumina, é um sólido inorgânico utilizado na indústria mineira, cerâmica e de ciência dos materiais. É uma das matérias primas na produção de alumínio e no meio das cerâmicas avançadas, a alumina é a mais utilizada, visto que oferece um desempenho superior em termos de resistência ao uso, à corrosão e devido a sua alta dureza. Além disso, a alumina apresenta alto poder catalítico, sendo utilizada em reações de isomerização, alquilação e craqueamento catalítico em refinarias de petróleo, por exemplo (ENCIMAT, 2022; PINES, HAAG, 1960).

2.7 – Modelagem matemática

De forma a compreender o comportamento dos produtos que se encontram no processo de secagem, é possível utilizar como ferramenta a modelagem físico-matemática a fim de simular as características deste processo. Diversos são os modelos matemáticos que podem ser utilizados para descrever o processo de secagem. Modelos mais simples, como os exponenciais e logarítmicos, são vantajosos por não dependerem de ferramentas computacionais robustas, mas são limitados a menores faixas de temperatura e velocidade do ar de secagem. Modelos empíricos podem apresentar pouca precisão devido às simplificações feitas na construção do método (ALBINI, 2019).

Um modelo possível para descrever a secagem em camada espessa é o modelo de duas fases (MASSARANI, TELLES, 1992). Neste modelo, os fenômenos de transporte de calor e massa do processo de secagem de um sólido se encontram presentes em duas fases, uma líquida e uma sólida, onde apenas a água se transfere entre elas. Cada uma das fases apresenta valores de temperatura e umidade e a partir de uma parcela de volume do leite a ser examinada, os fenômenos de transporte podem ser equacionados a partir de balanços de massa e energia.

A fim de que o sistema de equações que constituem o modelo de duas fases proposto por Massari e Silva Telles (1992) possa ser resolvido, algumas considerações são feitas para este modelo:

- O encolhimento das partículas de alumina é desprezível e pode ser desconsiderado;
- Os transportes de calor e massa são unidirecionais e são realizados através do mecanismo de transferência convectivo;
- A perda de calor pelas paredes do secador é desprezível e pode ser desconsiderada;
- O escoamento do ar de secagem é unidirecional;
- A fase fluida tem comportamento ideal;

Feitas as considerações para o modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992), as equações oriundas dos balanços de massa e energia são apresentadas a seguir.

Balanço de Massa da Fase Sólida

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{-f}{(1 - \varepsilon)\rho_s} \quad (4)$$

Balanço de massa na fase fluida

$$\frac{\partial Y(z, t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon\rho_f} \left(f - G_f \frac{\partial Y(z, t)}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Balanço de energia da fase Sólida

$$\frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \frac{ha [T_f(z, t) - T_s(z, t)] - \lambda f}{(1 - \varepsilon)\rho_s c p_s} \quad (6)$$

Balço de energia na fase fluida

$$\varepsilon \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial t} + \rho_f C p_f \frac{\partial T_f(z,t)}{\partial z} = -h a [T_f(z,t) - T_s(z,t)] - f C p_f [T_f(z,t) - T_s(z,t)] \quad (7)$$

A temperatura medida dentro do leito pelo termopar é uma espécie de média entre a temperatura do sólido e do fluido. A ponta do termopar, responsável pela medida, entra em contato tanto com o ar aquecido quanto com a superfície de partículas de alumina. Dessa forma, na etapa de verificação experimental do modelo, ao invés de usar no equacionamento a temperatura de cada fase, foi utilizada a temperatura de mistura, conceituada em Albini (2019). Usando os princípios da teoria de mistura, chega-se à Equação 8:

$$\frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial t} = \frac{-\lambda f - G_f [C p_f + Y(z,t) C p_v] \frac{\partial T_{mix}(z,t)}{\partial z}}{(1 - \varepsilon) \rho_s [C p_s + X(z,t) C p_l] + \varepsilon \rho_f [C p_f + Y(z,t) C p_v]} \quad (8)$$

Com isso, foi definido que $T_f(z,t) = T_s(z,t) = T_{mix}(z,t)$. Um aspecto importante da Equação 8 é que nela não aparece explicitamente o coeficiente convectivo (h), que costuma ser difícil de determinar experimentalmente. Para a resolução do sistema de equações são dadas as seguintes condições iniciais e de contorno:

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

$$Y(t, 0) = Y_0 \quad (10)$$

$$T_{mix}(z, 0) = T_{m0} \quad (11)$$

$$T_{mix}(0, t > 0) = T_0 \quad (12)$$

Sendo, X_0 a umidade inicial da fase sólido em base seca, Y_0 a umidade absoluta do ar de secagem, T_{m0} a temperatura inicial da mistura sólido e fluido no leito de secagem e T_0 a temperatura de entrada do ar de secagem. Nas Equações 4 e 5, a cinética de secagem (f) é dada pela Equação 13:

$$f = \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = -k (X - X_{eq}) \quad (13)$$

em que k a constante de secagem dada pela equação do tipo de Arrhenius (Equação 14):

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R} \frac{1}{(T_{mix}(z, t) + 273,15)}\right) \quad (14)$$

com k_0 e E_a/R determinados a partir da linearização da Equação 14 usando medidas dos experimentos de secagem de alumina em camada fina, obtendo-se os valores k_0 e E_a/R $1,124 \text{ s}^{-1}$ e $2129,529 \text{ K}$, respectivamente.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico do trabalho, são descritas as linhas gerais do procedimento experimental, dos materiais e dos equipamentos que foram usados para verificar experimentalmente o modelo utilizado.

3.1 – Propriedades do material de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados utilizando partículas esféricas de alumina com diâmetro de $3,2 \pm 0,2 \text{ mm}$. Antes de cada experimento realizado, as partículas de alumina foram saturadas com água por um período de 48 horas. As propriedades térmicas e físicas da alumina estão dispostas na Tabela 1 a seguir (GENARO 2021).

Tabela1: Propriedades termo físicas da alumina

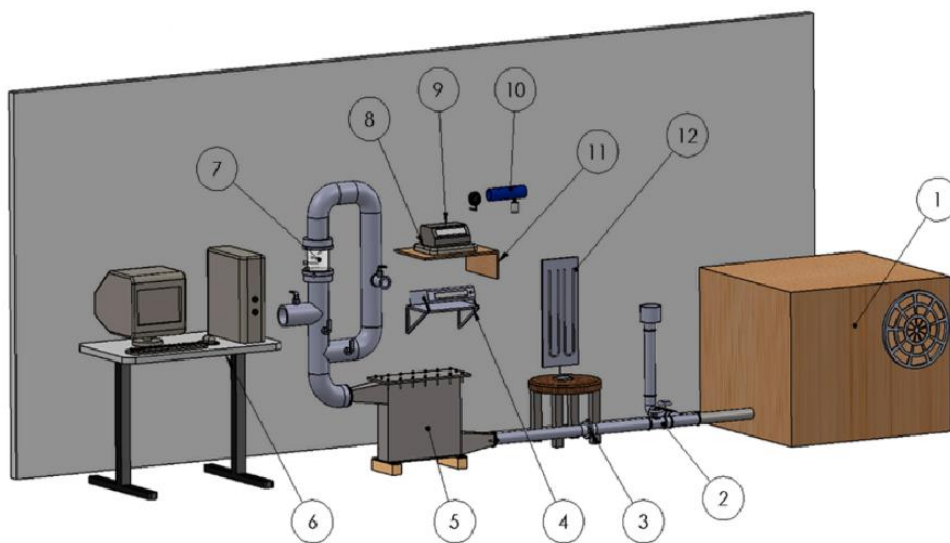
Propriedade	Referência
Massa específica: $\rho_s = 2160(1 + X)$ [Kgm ⁻³]	Calçada <i>et.al</i> (1994)
Área específica: $a = 294,81$ [m ² g ⁻¹]	Perazzini (2014)
Volume específico do poro da partícula: $V_p = 0,40$ [cm ³ g ⁻¹]	Perazzini (2014)
Diâmetro médio do poro da partícula: $D_p = 5,43$ [nm]	Perazzini (2014)
Condutividade térmica específica no ponto de estagnação: $k_{ef} = 4,6 \pm 0.14$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Perazzini (2014)

Fonte: (GENARO, 2021)

Os parâmetros da Tabela 1 são importantes para dar uma ideia da estrutura interna do material.

3.2 – Equipamentos

Um esboço do aparato experimental utilizado no processo de secagem da alumina com reversão de escoamento de ar (GENARO, 2021) é mostrado na Figura 3. Foi a partir dessa configuração que a modelagem e verificação experimental foram feitas. Esse sistema conta com uma câmara de secagem, um soprador de ar, um transdutor de pressão, um sistema de aquecimento de ar com controlador de temperatura, termopares e um psicrômetro. Os transdutores de pressão e os termopares são conectados a um sistema de aquisição de dados e um computador. Todos os equipamentos do sistema estão listados na Tabela 2.

Figura 3: Representação esquemática do sistema de secagem

Fonte: (GENARO, 2021)

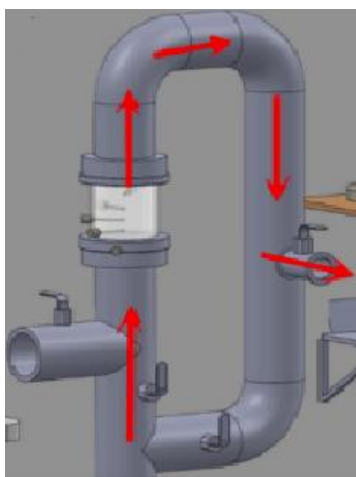
Tabela 2: equipamentos do sistema de secagem

(1)	Isolamento sonoro do soprador
(2)	Bypass
(3)	Medidor de vazão tipo placa de orifício
(4)	Controlador de temperatura
(5)	Aquecedor
(6)	Computador
(7)	Câmara de secagem
(8)	Sistema de aquisição de dados
(9)	Indicador de temperatura
(10)	Psicrômetro
(11)	Transdutor de pressão
(12)	Manômetro

Fonte: (GENARO, 2021)

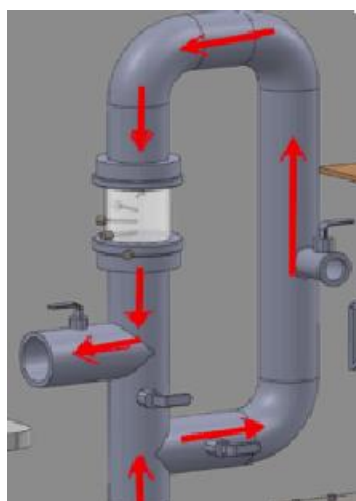
Juntamente com o equipamento (7) – Câmara de secagem, do sistema apresentado, é possível observar as tubulações por onde ocorre a circulação do ar de secagem. Juntamente delas, existe uma combinação de válvulas para regular o sentido do escoamento de ar de secagem, ora ascendente, como mostrado na Figura 4, ora descendente, como mostrado na Figura 5.

Figura 4: Representação esquemática do escoamento ascendente de ar de secagem



Fonte: (GENARO, 2021)

Figura 5: Representação esquemática do escoamento descendente de ar de secagem



Fonte: (GENARO, 2021)

Na Figura 4, é possível observar que esse sentido de escoamento do ar é o sentido inicial do processo e na Figura 5, é apresentado o sentido reverso de escoamento do ar de

secagem. Vale ressaltar que o percurso feito pelo ar no sentido inverso é maior do que no sentido ascendente, gerando uma diferença de temperatura entre essas duas correntes ao entrar no secador.

3.3 – Aspectos gerais sobre o programa

A fim de melhor estruturar o programa que foi utilizado neste Trabalho de Graduação, o modelo de leito fixo em camada espessa foi dividido em leitos fixos delgados ligados em série um em cima do outro. Em outras palavras, com isso, as equações do modelo (Eqs 4-14) foram discretizadas na componente axial e integradas numericamente através de funções pré-programadas. Por envolver a integração numérica de equações com grau de rigidez, foi usada uma função especial do MatLab para lidar com esse tipo de integração numérica. 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. Isso acontece há 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 superior e inferior. O MatLab possui as funções numéricas ode23s e ode45s (sendo “s” de stiff) 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 menor.

3.4 – Aspectos gerais sobre os experimentos

Neste estudo da secagem de alumina, tem-se que a temperatura, bem como a umidade, das partículas contidas nos leitos de camadas espessas foram obtidas em função do tempo de secagem e da posição no leito fixo onde foram retiradas as medições. Para este estudo, foram utilizados leitos fixos com comprimentos de 10 e 20 cm. As medições de umidade e temperatura foram retiradas nos pontos de 1, 5 e 10 cm, para o leito de 10

cm de comprimento, e nos pontos de 1, 10 e 20 cm, para o leito de 20 cm de comprimento. Além disso, foram escolhidas faixas de tempo para reversão do escoamento do ar de secagem com duração de 10, 15 e 20 minutos. Vale destacar também que esta análise é puramente numérica, visto que a alteração da altura da célula de secagem seria impraticável no aparato experimental.

É importante salientar que foram realizados diversos ensaios experimentais preliminares a fim de que pudessem ser escolhidos os parâmetros ideais para realizar a reversão do sentido de escoamento do ar de secagem. Nas simulações essa informação é usada diretamente, sem comentários ou discussões.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios numéricos apresentados e discutidos nesta seção foram feitos a partir do programa desenvolvido por Genaro (2021) e implementado em MatLab@ 2015a. As condições de operação nominais são mostradas na Tabela 3:

Tabela 3: Valores nominais de operação para a simulação do processo de secagem

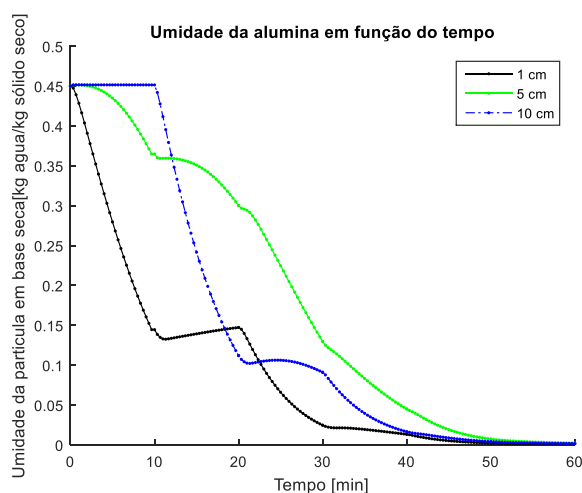
Variável	Valor Nominal
Temperatura do ar aquecido ascendente	100 °C
Temperatura do ar aquecido descendente	90 °C
Temperatura inicial do leito	20,8 °C
Vazão mássica do ar de secagem	0,390 kg min ⁻¹
Umidade inicial do ar	0,016
Teor de umidade inicial da alumina	0,45

Fonte: (GENARO, 2021)

O trabalho aqui apresentado previa experimentos numéricos variando também o diâmetro da coluna do secador, entretanto, simulações prévias feitas em outro estudo

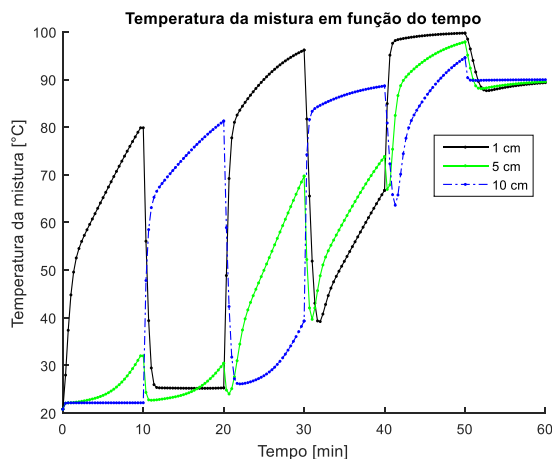
mostraram que a redução do diâmetro por si só já fez reduzir significativamente os gradientes internos, não havendo, assim, necessidade de reversão do escoamento de ar. Aumentar o diâmetro além de 10 cm poderia invalidar a hipótese de escoamento unidirecional. Mantendo as condições operacionais de secagem nominais, as Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, os comportamentos da umidade e temperatura para simulações feitas em um leito com 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro com reversão no sentido de escoamento de ar feita com duração de 10 minutos.

Figura 6: Umidade em função do tempo para um leito de 10 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos



Fonte: Autor (2022)

Figura 7: Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 10 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos



Fonte: Autor (2022)

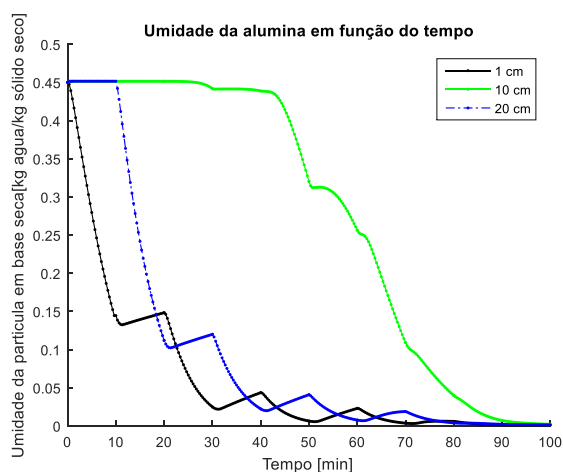
A partícula de alumina contém boa parte da umidade interna na forma de água livre, fracamente ligada à estrutura porosa do sólido. A Figura 6 mostra que nos instantes iniciais da secagem, em ambos os sentidos, há destaque para a transferência convectiva, com taxa constante. Isso ocorre porque o sólido está encharcado, com água disponível na superfície. Da mesma forma que a alumina transfere água com facilidade para o ar, ela também recebe a umidade de volta com a mesma facilidade, devido a saturação do ar que retorna entrando em contato com a alumina seca. O pico mostrado no gráfico da Figura 6 para a camada de 1 cm (curva preta) mostra que há um período de reumidificação após a primeira reversão. A reumidificação ocorre também, mas com menos intensidade, na camada do topo (azul), após 20 minutos quando o escoamento volta a ser ascendente. Sempre que há reumidificação, afasta-se da secagem, comprometendo a eficiência do processo. Vale ressaltar, porém, que o objetivo da reversão é simplesmente reduzir os gradientes de umidade e temperatura.

A Figura 7 mostra que há variações bruscas na temperatura de mistura, em grande parte, isso acontece porque o meio poroso formado por esferas de alumina tende a utilizar a energia térmica fornecida pelo ar quente num primeiro momento para remover a umidade fracamente ligada à estrutura do sólido, para só depois elevar a temperatura. Deve-se observar que quanto mais distante da entrada do ar, mais a temperatura demora para ser elevada, pois o ar que passa por essas regiões já trocou calor e “resfriou” até chegar nas camadas mais superiores do leito. Havendo reumidificação, as partículas passam a utilizar a energia térmica mais na forma calor latente do que na forma de calor sensível. Tanto na Figura 6 quanto na Figura 7, fica claro que o papel da reversão é aproximar os extremos do secador através de uma frente de secagem, promovendo o deslocamento da frente de secagem para o centro do leito (GENARO, 2021). A reversão deve levar em conta o tempo de resposta da secagem a partir dos experimentos de cinética. Se o tempo de reversão for pequeno demais, ele causa sucessivas perturbações que mexem com o equilíbrio, em compensação, se o tempo for grande demais, a secagem com reversão se aproxima da secagem convencional. As Figuras 6 e 7 mostram que a escolha de $t_0 = 10 \text{ min}$ e $\Delta t = 10 \text{ min}$ foi acertada.

A fim de mostrar com mais nitidez o fenômeno de reumidificação e a necessidade de reparametrizar a reversão, aumentou-se a altura da coluna do leito de 10 para 20 cm.

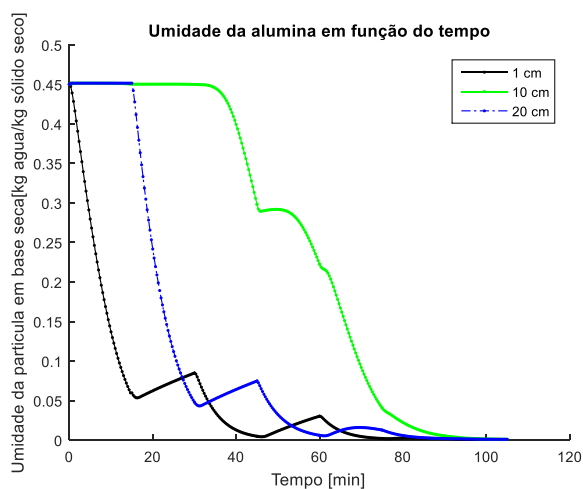
As Figuras 8, 9 e 10 mostram os valores de umidade para simulações feitas em um leito com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro com reversão no sentido de escoamento de ar feita com duração de 10, 15 e 20 minutos, respectivamente. Para o leito com 20 cm de altura, os valores de umidade mostrados passam a ser nos pontos de 1, 10 e 20 cm de leito.

Figura 8: Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos



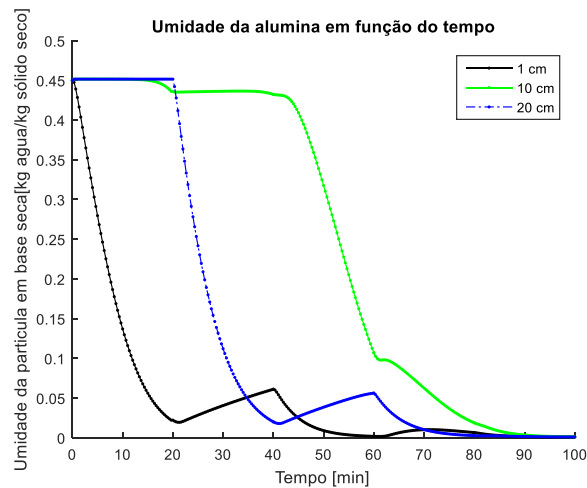
Fonte: Autor (2022)

Figura 9: Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 15 minutos



Fonte: Autor (2022)

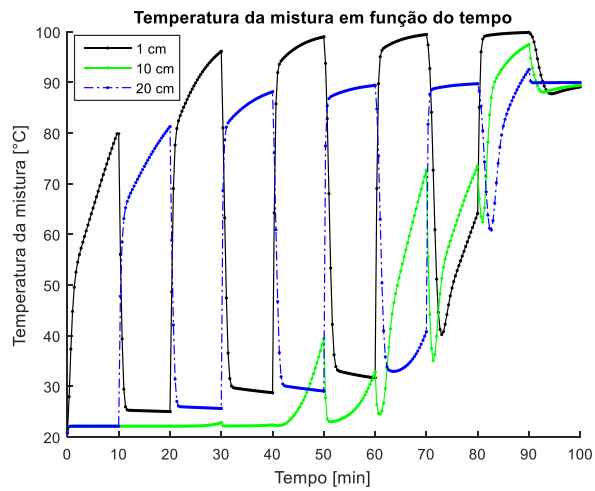
Figura 10: Umidade em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 20 minutos



Fonte: Autor (2022)

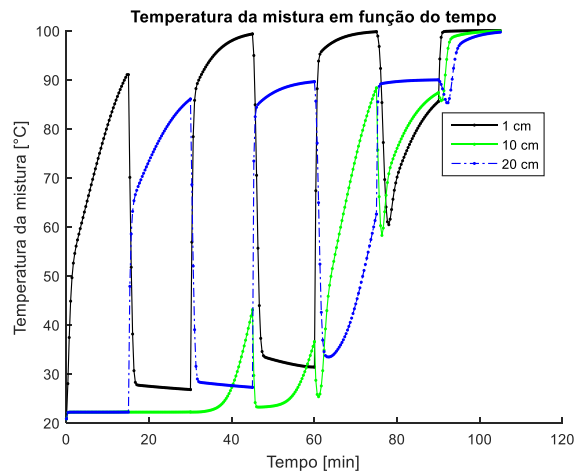
Dobrando a altura do leito para 20 cm, existe um aumento do volume de sólidos particulados dentro do secador e um aumento da umidade total do sistema em análise. Observando inicialmente a Figura 8, em que o intervalo da reversão do sentido do ar de escoamento foi o mesmo para o leito de 10 cm, o tempo total de secagem aumentou de aproximadamente 50 para aproximadamente 100 minutos. A reparametrização da reversão não alterou o tempo de secagem, mas mudou significativamente a operação do secador. Comparando as Figuras 8, 9 e 10, observa-se que os novos parâmetros fizeram a frente de secagem chegar mais rápido à camada de 10 cm, ou seja, metade da altura. Intervalos de 15 minutos de reversão deixam os extremos do secador mais próximos do que intervalos de 20 minutos. Comportamento análogo acontece com a temperatura, como mostram as Figuras 11, 12 e 13.

Figura 11: Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 10 minutos



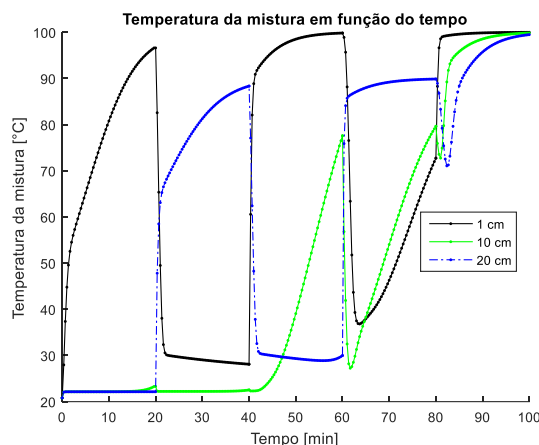
Fonte: Autor (2022)

Figura 12: Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 15 minutos



Fonte: Autor (2022)

Figura 13: Temperatura de mistura em função do tempo para um leito de 20 cm reversão do escoamento com duração de 20 minutos



Fonte: Autor (2022)

É importante finalizar essa seção ressaltando que o aumento de altura da coluna do leito não invalida as hipóteses usadas para obter o modelo simulado. Como já dito anteriormente, não foram mostrados os experimentos numéricos feitos para diâmetros menores do que 10 cm porque os resultados das simulações com e sem reversão tornam-se muito coincidentes, visto que essa variação em si já aumenta a uniformidade do leito.

5 – CONCLUSÃO

A partir das simulações feitas usando um programa em MatLab mostrou-se a influência da altura do leito no processo de homogeneização da secagem de alumina usando a técnica de reversão de escoamento. O maior impacto do aumento de altura foi no tempo de secagem, como esperado, mas houve também uma reumidificação mais prolongada. Os resultados mostraram que o aumento de altura levou à necessidade de reparametrizar a reversão, aumentando não só o tempo de aplicação como também o de duração da reversão. A consistência física dos resultados indica que o programa pode ser usado como um simulador cumprindo uma etapa prévia antes de cada experimento de laboratório, desde que não se extrapole a validade das hipóteses que foram utilizadas na modelagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINI, Geisa. Estudo da secagem de grãos em leito fixo, com e sem escoamento reverso do ar de secagem. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019

EMPRESA DE ENERGIA E ALUMÍNIO. Hydro. 2022. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/products/bauxita-e-alumina/alumina/>. Acesso em: 14 fev. 2022

ENCIMAT. Encontros Interdisciplinares de Materiais e Mostra de Materiais. 2022. Disponível em: <https://www.encimat.cefetmg.br/2018/06/21/alumina/>. Acesso em: 14 fev. 2022

GEANKOPLIS, C. J. Drying of Process Materials. Transport processes and unit operations. 3ed. New Jersey: Prentice-Hall, Cap. 9, p. 520-583, 1993.

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

GROFF, Juliano Katayama. Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

HAYASHI, Hiromichi. Drying Technologies of Foods -Their History and Future, Drying Technology: An International Journal, 7:2, 315-369, (1989).

MARTINS, E. A. S. Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para secagem de produtos agrícolas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

MARTINS, F. P. et al. Secagem: Uma revisão. The Journal of Engineering and Exact Sciences. Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil, v. 6, n. 4, 2020.

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.

MOURA, R. S. F. D. Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium occidentale* L.) em um secador de leito fixo. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

PARK, K. J. B et al. Secagem: Fundamentos e equações. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 16, n.1, p. 93-127, 2014.

PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S., (1998) "Drying: Innovative Technologies and Trends in Research and Development." In: Conferencias Plenarias do 80 VII Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor Y Materia (LATCYM 98). Salta, Argentina, 1998. Anais... Salta 1998, 20p.

PINES, Herman; HAAG, Werner O. Alumina: Catalyst and Support. I. Alumina, its Intrinsic Acidity and Catalytic Activity. Journal of the American Chemical Society, American Chemical Society, v. 82, n. 10, p. 2471-2483, 1960.

SOKHANSANJ, S., LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. Journal of Agriculture Engineering Research, 1996, Vol. 63, p. 129-136.

SUAREZ, Constantino; VIOLLA, Pascual E.. Shrinkage Effect on Drying Behavior of Potato Slabs . Journal of Food Engineering , Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Ciudad Universitaria, (1428) Buenos Aires, Argentina , v. 13, n. 1, p. 103-114, 1990.

Viollaz, P. E. & Suarez, C. (1984). An equation for diffusion in shrinking or swelling bodies. J. Polym. Sci. Polym. Phys. Edn, 22,875.