



SECAGEM EM UM LEITO FIXO ESPESSO DE GRÃOS DE SORGO COM REVERSÃO DO ESCOAMENTO DE AR

LUAN DA SILVA BARBOSA¹, FLAVIO BENTES FREIRE², JOSÉ TEIXEIRA FREIRE¹,
FÁBIO BENTES FREIRE^{1*}

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química

²Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil

*e-mail: bentes@ufscar.br

RESUMO - O leito fixo é muito estudado em engenharia química. A secagem em camada delgada tipo leito fixo ainda é amplamente feita de forma rústica no agronegócio. Um exemplo é a secagem ambiente de grãos de café em grandes terrenos. Quanto mais espesso for o leito, mais acentuados são os gradientes de temperatura e de umidade das partículas. Em equipamentos de leito fixo com ar aquecido soprado, é possível reduzir esses gradientes revertendo alternadamente o escoamento do ar. O objetivo deste trabalho foi usar a técnica de reversão para diminuir os gradientes durante a secagem em leito fixo espesso de grãos de sorgo. Foram feitas as medidas de temperaturas e umidades ao longo do tempo em posições axiais. Essas medidas foram feitas a cada 1 cm para um leito de 10 cm no processo de secagem com e sem reversão do sentido do escoamento. As temperaturas do ar de operação foram de 50 e 60°C respectivamente e velocidade do ar de 2,1 m·s⁻¹. O tempo inicial de aplicação da reversão foi 10 minutos com intervalos de duração de 30 minutos. Apesar de aumentar o tempo de secagem, a técnica da reversão mostrou-se efetiva na redução dos gradientes de temperatura e umidade do leito fixo de sorgo.

INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores produtores e exportadores de grãos do mercado mundial, e prevê um futuro promissor neste setor. O Ministério da Agricultura estimou um crescimento de 27% na produção de grãos do Brasil para a década atual. No relatório “Projeções do Agronegócio, Brasil 2019/2020 a 2029/2030” (MAPA, 2020), o ministério estimou que será alcançada uma produção de 318,3 milhões de toneladas de grãos, frente ao recorde atual 2019/2020 de 250 milhões de toneladas. Ainda nesse mesmo relatório, prevê-se um aumento significativo dos estoques em 2021 como resultado da covid-19. Neste cenário, é necessária especial atenção às tecnologias de colheita, armazenagem, transporte e processamento de grãos para os próximos anos.

Nas fazendas, o armazenamento dos grãos colhidos tem importância fundamental,

tanto como complemento das estruturas de armazenagem estabelecidas na zona urbana, como para diminuir danos e perdas a que os grãos estão sujeitos (Jasper *et al.*, 2006). Segundo dados da Embrapa (2020), o armazenamento inadequado da produção de grãos tem acarretado 15% de perdas devido a ataques de roedores, insetos, fungos e micotoxinas, chegando a alcançar, em pequenas propriedades familiares, mais de 40% na produção de milho em espiga.

Na armazenagem de grãos, a secagem por convecção forçada se destaca como uma das operações mais importantes numa sequência de outros cuidados associados ao beneficiamento, visando uniformizar a umidade e impedir a proliferação de microrganismos e o ataque de insetos e roedores. Segundo Defendi (2013), o que determina a qualidade do produto armazenado é a sua umidade, pois baixas quantidades de água reduzem reações de escurecimento

enzimático e taxas de respiração relacionadas ao metabolismo do grão que leva ao apodrecimento. Além disso, a secagem diminui o peso e, conseqüentemente, os custos de transporte e minimiza os requisitos de embalagem (Ruiz-López *et al.*, 2008).

Grãos como os de soja, amendoim, feijão, arroz, milho, café, lentilha, sorgo, entre outros, provenientes do cultivo agrícola, têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, sendo considerados materiais higroscópicos. Suas estruturas físicas podem sofrer mudanças durante a secagem, como, por exemplo, alteração de volume dos poros por encolhimento, modificando a dinâmica da transferência de calor e de massa. Na secagem em leito fixo, em que o leito de partículas permanece estático enquanto o ar percola o sólido cedendo calor e absorvendo umidade, o fato de não haver impacto mecânico do produto pode ser uma vantagem interessante, por exemplo, na secagem de sementes (Prado e Sartori, 2011). É um tipo de configuração indicada para processos em batelada e pequena escala, de materiais sensíveis ao impacto mecânico ou para estudos dos fenômenos de transferência associados à secagem (Genaro, 2021).

Diferentemente da secagem com movimentação do leito, a de leito fixo acentua os gradientes de temperatura e de umidade das partículas, e essa não uniformidade é indesejada para a qualidade dos grãos. Uma alternativa para melhorar a homogeneidade é usar agitação mecânica no secador, correndo, porém, o risco de danificar os grãos. Além disso, aumentam-se os custos fixos e de operação do secador (Berbert *et al.*, 1994). Para manter os grãos fixos no leito e ainda assim promover algum grau de uniformidade na temperatura e na umidade, uma opção é a inversão periódica do sentido de escoamento do ar aquecido, ou seja, ora ascendente, ora descendente (Albini, 2019; Berbert *et al.*, 1994; Genaro, 2021; Ratti; Mujumdar, 1995; Ruiz-López *et al.*, 2008).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver um estudo experimental da secagem de grãos de sorgo em um leito fixo de 10 cm de altura, com e sem a reversão do sentido do escoamento do ar aquecido, considerando

aspectos específicos e particulares do sorgo granífero. A reversão foi aplicada após 10 minutos de secagem e repetida periodicamente a cada 30 minutos. As medidas de temperatura e de umidade ao longo do tempo na secagem com e sem reversão foram feitas a cada 1 cm de altura de leito à 50 e 60°C e velocidade de escoamento do ar de 2,1 m·s⁻¹.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existe um grande número de diferentes tipos e configurações de secadores. Segundo Mujumdar (2006), a secagem é talvez a operação unitária mais antiga, mais comum e mais diversificada da engenharia química, tendo sido registrados até a época mais de 400 tipos de secadores industriais, sendo mais de 100 tipos comumente encontrados nos setores produtivos. Além disso, a secagem compete com a destilação em ser a operação unitária de maior dispêndio energético devido ao alto calor latente de vaporização, e à ineficiência inerente ao uso de ar quente como o meio mais comum de secagem. Esses fatores estimulam o uso otimizado do processo.

Na indústria de produção de grãos, desde a colheita até o processamento, a armazenagem é estrategicamente importante para manter a qualidade do produto, e é nessa etapa que a secagem tem seu papel principal. A umidade máxima tolerada para o armazenamento de cereais, evitando o crescimento de microrganismos danosos, é em torno de 12 a 14% em base úmida (Navarro e Noyes, 2001). A secagem por convecção, através de uma corrente de ar quente abaixo da velocidade mínima de fluidização, geralmente nos próprios silos de armazenagem, é uma forma de secagem em leito fixo.

Frente aos secadores que envolvem movimentação do leito, como os de leito de jorro, leito fluidizado, leito rotativo, de escoamentos concorrentes, cruzados ou contracorrentes, os secadores de leito fixo se apresentam como ideais para a secagem de grãos em batelada, que necessitam manter suas propriedades físico-químicas, o que a movimentação do leito poderia prejudicar por meio de danos mecânicos (Souza *et al.*, 2015). A secagem de partículas em leito fixo é também uma operação de baixo custo de

investimento e de manutenção (Wang e Chen, 1999). Vale ressaltar que o secador tipo esteira rolante comporta-se como um leito fixo, só que opera em contínuo.

O leito fixo delgado é usado em estudos de cinética de secagem de materiais dos quais se tem pouca informação sobre as propriedades de transferência de calor e massa. Sendo o leito espesso uma sequência de camadas finas, umas sobre as outras, é possível estender esses estudos para leitos de várias alturas (Albini, 2019). Uma característica indesejável dos secadores tipo leito fixo espesso é a existência de significantes gradientes de temperatura e de umidade durante o processo. Essa não uniformidade do leito leva a um produto muitas vezes fora do padrão de qualidade, como é o caso dos grãos de café que, ao passarem pela torrefação, os grãos com umidade alta podem não pirolisar e aqueles com umidade muito baixa podem ficar chamuscados (Berbert *et al.*, 1994).

Uma alternativa para contornar esse problema é a reversão periódica do sentido do escoamento do ar de secagem, conforme trabalhos de desenvolvimento realizados por Berbert *et al.* (1994), Ratti e Mujumdar (1995), Ruiz-López *et al.* (2008), Albini (Albini, 2019) e Genaro (2021). Berbert *et al.* (1994) secaram grãos de café em leito fixo com e sem a inversão do escoamento do ar de secagem a duas diferentes temperaturas, 50 e 70°C. Foi visto que a técnica de reversão fez aumentar em uma hora o tempo total de secagem, se comparada à operação convencional, entretanto, houve diminuição de 65% (50°C) e 50% (70°C) na diferença entre a maior e a menor umidade ao final da secagem. Barbosa (2022) estudou a transferência de calor e de massa em um leito fixo espesso de grãos de sorgo com reversão de sentido do escoamento de ar, comparando os resultados com a secagem, no mesmo equipamento e usando a mesma técnica, de cevada (Albini, 2019) e alumina (Genaro, 2021). Segundo Barbosa (2022), devido à estrutura do grão, a secagem de sorgo apresentou um comportamento intermediário entre a alumina e a cevada. Ressaltando que nos três casos houve redução expressiva dos gradientes de temperatura e de umidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta uma descrição resumida sobre o aparato experimental e sobre os experimentos de secagem em camada espessa com reversão.

Aparato Experimental

Os experimentos de secagem foram feitos no aparato esquematizado mostrado na Figura 1:

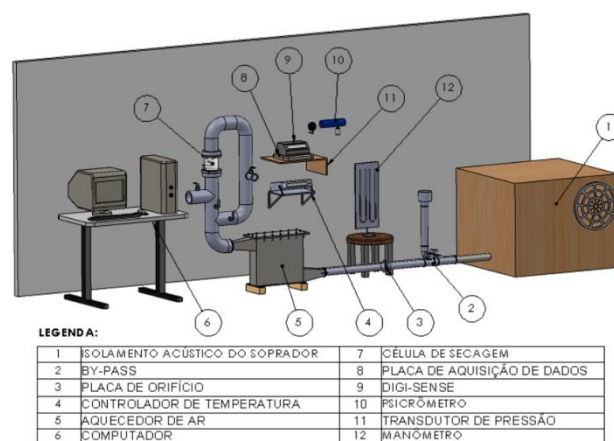


Figura 1: módulo experimental instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

Fonte: Genaro (2021).

Os equipamentos e dispositivos periféricos que compõem o aparato são especificados na legenda da Figura 1. A célula de secagem (7) é uma coluna cilíndrica de acrílico de 10 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento, e pode ser removida ou colocada no aparato. Para os experimentos térmicos, foi utilizada como célula de secagem uma coluna em acrílico não seccionada. Para os experimentos de umidade, foi utilizada como célula de secagem uma coluna seccionada em 10 camadas de 1 cm cada. No aparato, o ar aquecido foi utilizado como o fluido de secagem, que é soprado para dentro do sistema por meio de um soprador radial IBRAM de 3,5 HP de potência (1). O ar é aquecido por um aquecedor (5) constituído de duas resistências elétricas ligadas em série de 1000 W de potência cada uma. Há, ainda, um controlador de temperatura *Flyever FE50S* (4) ligado às resistências que modula a

potência do aquecedor para manter a temperatura desejada. O ajuste da vazão de ar é feito por um sistema de válvulas com purga (2). Uma placa de orifício instalada (3) fornece a queda de pressão que é lida por um transdutor de pressão da marca *Auto Tran Incorporated* que opera na faixa de 0 a 10 inH₂O e 1 a 5 V.

Uma placa de aquisição *Lynx ADS0500* (8) e um microcomputador (6) foram utilizados para a aquisição e armazenamento das variáveis de temperatura e de pressão medidas pelos termopares e transdutores de pressão. A leitura e o armazenamento dos dados foram feitos por meio de uma interface computacional em ambiente *LabVIEW*. Para determinar as umidades relativa e absoluta do ar de secagem, foram obtidas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente por meio um psicrômetro (10).

A reversão da direção do escoamento do ar aquecido entre sentido ascendente e sentido descendente é realizada por um sistema de válvulas. As regiões de alimentação de ar ascendente e descendente possuem uma seção de 3 cm de altura e 10 cm de diâmetro com recheio de esferas de vidro com Dp de 2,80 mm. A tubulação do equipamento possui isolamento térmico composto de silicato de cálcio e alumínio.

Por fim, foram usados também sensores de umidade relativa, temperatura e pressão absoluta *Bosch® BME280*, instalados nas extremidades de cada célula de secagem. As medidas realizadas pelos sensores nas extremidades da célula de secagem foram processadas por dois microcontroladores *Arduino® UNO* e armazenadas em um microcomputador por meio da interface *Processing 3*.

Secagem em Camada Espessa

Os experimentos de secagem de grãos de sorgo consistiram na obtenção da temperatura em função da posição e do tempo, assim como a umidade média em cada camada de 1,0 cm, para a secagem em camada espessa com reversão do sentido do escoamento do ar. A descrição dos experimentos térmicos e mássicos feitos durante a secagem é mostrada de forma esquemática na Figura 2:

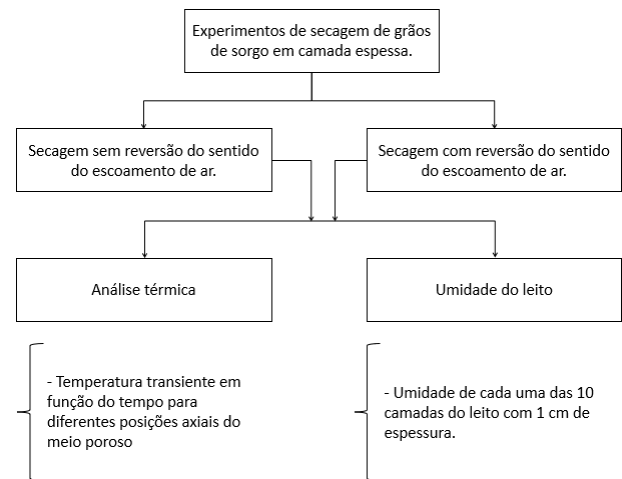


Figura 2: Experimentos de secagem de grãos de sorgo em camada espessa

Na Tabela 1 são apresentadas as condições de secagem utilizadas nos experimentos.

Tabela 1: Condição de operação dos experimentos de secagem dos grãos de sorgo em camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento do ar.

Condição de operação	Valores utilizados
Temperatura de secagem – T [°C]	50 e 60
Velocidade do ar – U [m·s ⁻¹]	2,1
t ₀ [min]	10
Δt [min]	30
Umidade inicial dos grãos de sorgo - X ₀ [kg água · kg sólido seco ⁻¹]	0,43
Umidade relativa do ar de secagem - UR (%)	18 a 72%
Altura de leito estático [cm]	10,5 cm

As medidas de temperatura ao longo das posições axiais foram feitas em uma célula de secagem com parede de acrílico não seccionada esquematizada na Figura 3. Foram utilizados termopares do tipo J (ferro-constantan).

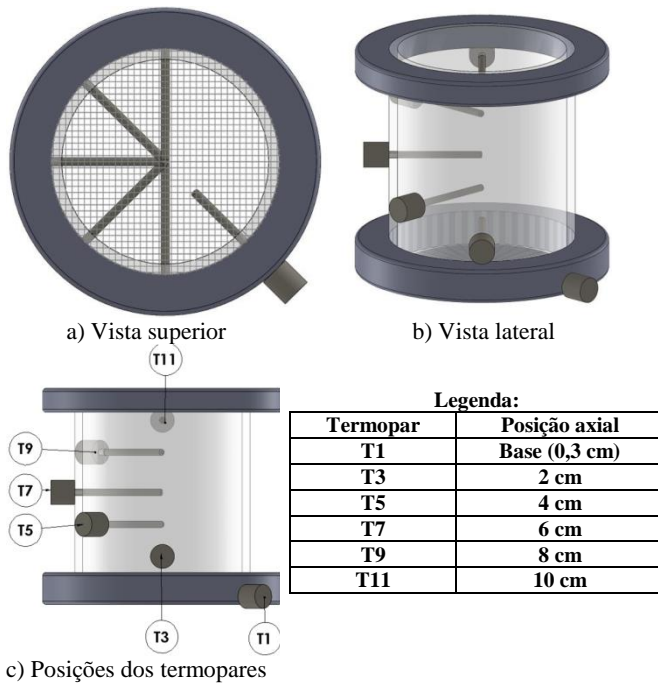


Figura 3: Detalhes da célula de secagem para os experimentos térmicos

Fonte: Genaro (2021).

As temperaturas das posições axiais foram feitas por 6 termopares inseridos na célula de secagem, conforme ilustra a Figura 3.c. A distribuição helicoidal dos termopares inseridos nos orifícios da célula de secagem minimizam possíveis interferências no escoamento do ar e na medição dos termopares.

O valor da umidade média ao longo das posições axiais foi determinado através de uma célula de secagem seccionada esquematizada na Figura 4.

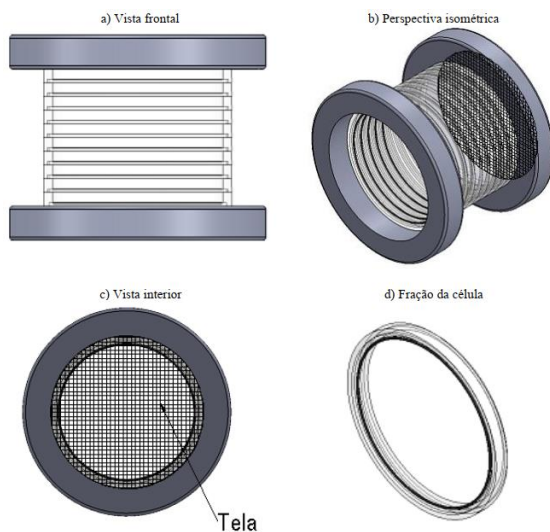


Figura 4: Ilustração da célula de secagem fracionada

Fonte: Genaro (2021).

Assim como a célula mostrada na Figura 3, essa célula também é feita em acrílico, porém, é seccionada em 10 seções com 1 cm de altura e 10 cm de diâmetro cada. Para cada instante de tempo, novos grãos de sorgo umidificados foram utilizados. Em linhas gerais, a célula foi empacotada com os grãos, secava-se até um determinado instante de tempo e avaliava-se as umidades de cada seção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas dos grãos de sorgo.

Tabela 2: Dados de caracterização dos grãos de sorgo.

Propriedades físicas	Dados	
	X2 = 0,15 kg·kg ⁻¹	X3 = 0,43 kg·kg ⁻¹
Comprimento <i>L</i> (mm)	4,04 ± 0,26	4,23 ± 0,28
Largura <i>W</i> (mm)	3,92 ± 0,27	4,21 ± 0,28
Espessura <i>E</i> (mm)	2,67 ± 0,23	2,81 ± 0,24
Diâmetro da parte esférica <i>D</i> (mm)	3,23 ± 0,24	3,41 ± 0,24
Área superficial <i>S</i> (mm ²)	34,27 ± 4,78	38,29 ± 5,12
Volume <i>V</i> (mm ³)	18,62 ± 3,90	21,97 ± 4,29
Esfericidade ϕ (-)	0,86 ± 0,02	0,86 ± 0,02
Massa específica aparente ρ_p (g·cm ⁻³)	1,48	1,77
Massa específica do leito ρ_b (g·cm ⁻³)	0,84	0,74
Porosidade do leito ϵ_b (-)	0,44	0,37

São mostrados os valores para duas umidades diferentes, sendo a umidade $X_{b,s} = 0,15 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X1) correspondente aos grãos no estado em que foram adquiridos com a empresa Di Solo Sementes e $X_{b,s} = 0,43 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (X2) correspondente aos grãos umidificados, equivalendo a 30% em base úmida. Nota-se, pelos valores das dimensões características que houve aumento com a umidade, apesar de pouco significativo pois encontra-se dentro da faixa de desvio padrão das medidas. A esfericidade se manteve constante, não havendo, portanto, alteração relevante no formato das partículas com a variação de umidade. Conforme esperado, a massa específica aparente aumentou com o aumento da umidade. Pode-se dizer que o aumento da quantidade de água no interior das partículas leva a um aumento da massa mais significativo do que possíveis efeitos de entumescimento dos grãos. Já no caso da massa específica real, houve diminuição com o aumento da umidade. A massa específica do leito (densidade bulk) diminuiu com o aumento da umidade, levando a um aumento de massa das partículas mais significativo do que o aumento do volume ocupado no leito. Os espaços vazios entre as partículas podem aumentar devido a um ligeiro aumento no tamanho delas.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os valores de temperatura dos grãos de sorgo no leito em diferentes posições axiais para velocidade de escoamento do ar de $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, com reversão iniciada em $t_0 = 10$ minutos, revertida periodicamente a cada $\Delta t = 30$ minutos e temperaturas de operação de 50 e 60°C , respectivamente. Pode-se notar, pelos resultados das Figuras 5 e 6, que há uma rápida elevação da temperatura média ao longo das posições axiais, sendo mais rápida a elevação da temperatura da base, que é por onde entra o ar aquecido no início do experimento. Vale ressaltar, observando as Figuras 5b e 6b, que, a partir dos 20 minutos de experimento, no caso da secagem a 50°C (Figura 5b), como a partir dos 10 minutos (Figura 6b), no caso da secagem a 60°C , as medidas de temperaturas das posições acima de 8 cm foram descontinuadas, pois ocorreu o fenômeno de encolhimento do leito, ou seja, já não se estaria medindo a temperatura de mistura, mas somente, do ar de secagem.

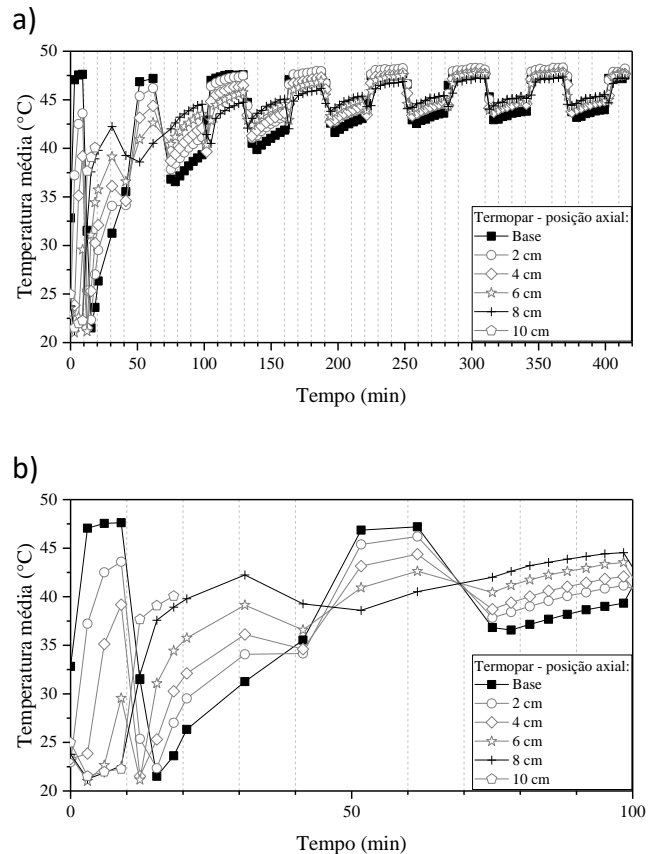


Figura 5: a) Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^\circ\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$). b) Ampliação dos 100 primeiros minutos.

A partir do momento em que ocorre a primeira reversão, a temperatura do topo do leito passa a se elevar além das demais temperaturas, ocorrendo uma inversão no gradiente, tal que as posições mais próximas do topo sejam as de maiores temperaturas, e as mais próximas da base, as posições de menores temperaturas. Passados 30 minutos da primeira reversão, ocorre a reversão seguinte, com o ar escoando mais uma vez no sentido ascendente, da base para o topo, invertendo, mais uma vez, o gradiente de temperaturas, e assim seguem as reversões a cada $\Delta t = 30$ minutos. Com isso, desloca-se a frente de secagem cada vez mais para o centro, diminuindo os gradientes dentro do leito. Nestes experimentos, é interessante notar que permanece uma tendência de elevação gradual das temperaturas de todas as posições axiais, mesmo com as reversões. Isto ocorre porque o ar que está passando em sentidos alternados ainda não entrou em

equilíbrio higroscópico com os grãos úmidos. Este equilíbrio, que é dinâmico, só é alcançado a partir dos 310 minutos, para o experimento a 50°C, e a partir dos 250 minutos para o experimento a 60°C.

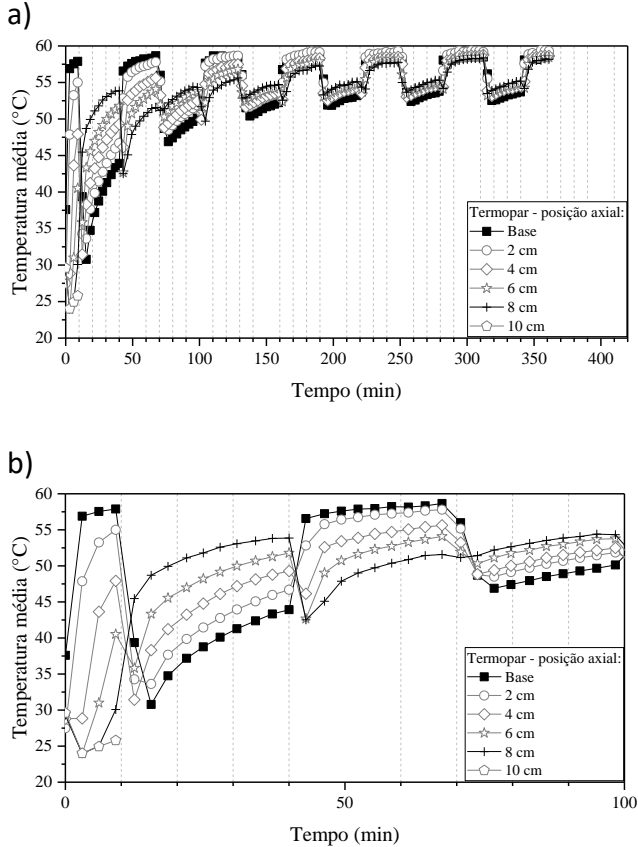


Figura 6: a) Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de grãos de sorgo com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 60^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$). b) Ampliação dos 100 primeiros minutos

Quando o escoamento de ar é no sentido descendente, como nos intervalos 10-40 min e 70-100 min, ocorre, além da inversão do gradiente de temperaturas, uma abrupta desaceleração da elevação global das temperaturas. Algumas posições sofrem uma queda de temperatura mais drástica antes de voltar à subida gradual, como é o caso da temperatura de base no instante de 70 minutos na Figura 6b, e outras posições pouco sofrem o efeito desta inversão para o sentido descendente, como é o caso da posição 8 cm no instante de 70 minutos, cuja temperatura

segue a sua tendência gradual de elevação. Isto se explica pelo fato de que, quando o escoamento é revertido para o sentido descendente, o ar aquecido faz um percurso 0,8 m mais longo na tubulação para atingir o meio poroso do que quando está escoando em sentido ascendente. Apesar de o equipamento estar termicamente isolado, há uma perda de calor considerável neste maior percurso, fazendo com que uma menor quantidade de calor seja transportada para o leito. A região do topo parece não sofrer alteração abrupta de temperatura porque anteriormente já estava recebendo menor quantidade de calor com o escoamento ascendente, e, no sentido descendente, é a região que primeiro entra em contato com o ar aquecido, porém com uma menor quantidade de calor devida ao maior percurso feito pelo ar. A região da base sofre uma queda drástica de temperatura porque, anteriormente, no escoamento ascendente, além de ser a primeira região do meio poroso a entrar em contato com o ar, o percurso do escoamento ascendente era menor, já no escoamento descendente, além do maior percurso do escoamento, o ar aquecido já terá cedido grande quantidade de calor para as regiões superiores. Em suma, pode-se perceber que a região inferior do leito passa por oscilações maiores de temperatura, e a região superior tem oscilações menos acentuadas.

A Figura 7 mostra os valores das umidades médias dos grãos de sorgo ao longo das posições axiais do leito fixo para a secagem com reversão do escoamento de ar a 50°C.

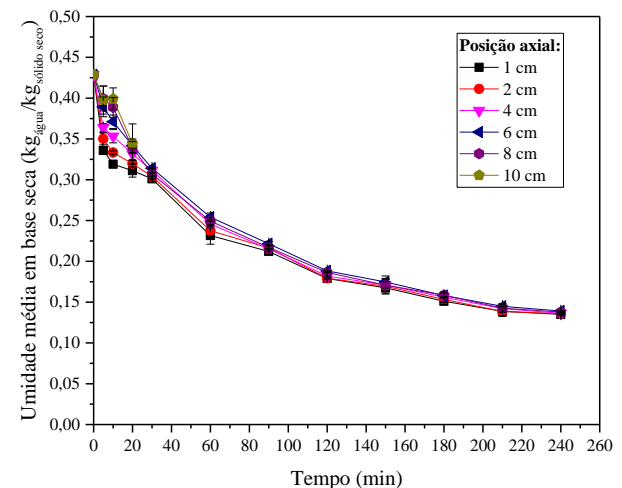


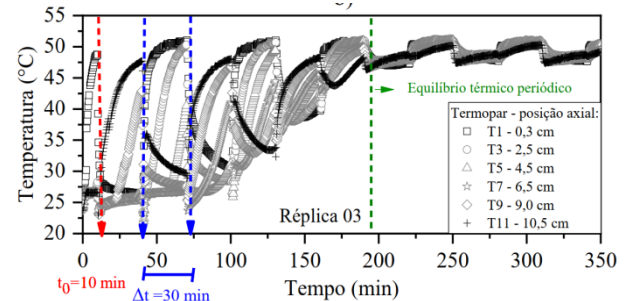
Figura 7: Umidade média em base seca em função do tempo para diferentes posições axiais ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).

Como já dito, a reversão faz com que a frente de secagem se distribua de maneira mais uniforme ao longo do leito, com o ar escoando mais distante da saturação a cada reversão realizada. A Figura 7 mostra que há uma diminuição mais acentuada nos primeiros 60 minutos do que no restante do tempo de experimento. Após esse tempo, observa-se uma diminuição mais lenta da umidade média global e com tendências de aceleração e desaceleração, o que se nota pelas pequenas mudanças de concavidade das curvas nos minutos 60, 120 e 180. Isto se explica pela reversão do escoamento de ar, que passa a ficar em sentido descendente nos intervalos de 70 a 100 minutos e de 130 a 160 minutos, fazendo com que uma menor quantidade de energia seja transportada devido ao maior percurso do ar na tubulação. Finalmente, a secagem foi concluída aos 240 minutos, com uma umidade média global no estado de equilíbrio dinâmico com o ar de 0,13 em base seca.

Uma comparação entre os resultados obtidos nesse trabalho e os de Genaro (2021) revela aspectos interessantes da técnica de reversão. Por ser um particulado padrão, que mantém a estrutura física e as propriedades constantes durante a secagem, a alumina tem um papel de referência ao estabelecer limites para o processo. Mesmo não compartilhando exatamente as mesmas condições operacionais, existem tendências que distanciam ambas as secagens com reversão. Observando os resultados de temperatura da Figura 8 com os obtidos por Genaro (2021) e apresentados na Figura 8, com condições de operação próximas às do experimento com grãos de sorgo a 50°C, pode-se ver oscilações muito maiores do que no caso da secagem de sorgo.

O meio poroso formado por esferas de alumina tende a utilizar o calor fornecido pelo ar quente primeiramente para remover o conteúdo de umidade fracamente ligada à estrutura da alumina, para em seguida começar também a elevação de temperatura. Quanto mais distante da entrada do ar aquecido, mais a temperatura demora a ser elevada, pois o ar passa por essas regiões estando com a temperatura mais próxima da temperatura do

meio, ficando com menor motricidade para transferir calor para as partículas. Quando ocorre a reversão, o calor é cedido pelo ar em maior quantidade nas regiões superiores, invertendo o gradiente de temperatura nas posições axiais.



Fonte: Genaro (2021).

Figura 8: Temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais do meio poroso na secagem de esferas de alumina com reversão do sentido do escoamento do ar ($T = 50^{\circ}\text{C}$; $U = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_0 = 10 \text{ min}$; $\Delta t = 30 \text{ min}$).

É importante notar que, devido à presença de grande quantidade de umidade fracamente ligada (quando se compara com partículas orgânicas), - o que implica também numa facilidade de adsorver umidade - as temperaturas das partículas de alumina têm uma amplitude de oscilação muito maior, pois, com o eventual fenômeno de reumidificação das partículas que haviam sido secadas quando o escoamento estava no sentido contrário, elas passam a utilizar o calor mais na forma latente do que para manter a elevação de temperatura que havia sido alcançada antes. Na a secagem com grãos de sorgo, a reversão não chega a provocar esse efeito de maneira significativa, pois, uma vez que, por exemplo, os grãos localizados na região inferior do leito são aquecidos, eles tendem a recuperar mais facilmente a elevação do nível de temperatura quando ocorre a reversão. O fato de a secagem ser controlada pela difusão faz com que seja mais difícil os grãos serem reumidificados, permitindo que a maior parte do calor recebido seja utilizada na forma sensível.

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos na secagem de sorgo em camada espessa com reversão do sentido do escoamento de ar mostraram que houve oscilações de temperatura ao longo de todo o tempo do processo, destacando-se o efeito de diminuição das temperaturas nas posições axiais com o escoamento em sentido descendente devido ao menor fornecimento de calor provocado pelo percurso mais longo do ar escoando neste sentido. Nos experimentos mássicos, nos quais foi utilizada a célula de secagem fracionada, pôde-se verificar que a formação da frente de secagem se deu em todo o leito, não havendo regiões sem ocorrência de secagem. Pôde-se notar a frente de secagem se movendo logo no início da formação dos gradientes de umidade e se estabelecendo durante todo o processo. Devido à natureza orgânica dos grãos de sorgo, com estruturas internas que mantêm a umidade fortemente ligada, há mais dificuldade em realizar a secagem, o que foi evidenciado pela comparação com a secagem de alumina realizada por Genaro (2021). Desse modo, não houve reumidificação significativa ao se implementar a reversão do escoamento. Sendo assim, a técnica da reversão de escoamento pode, de fato, ser uma alternativa para diminuir os gradientes de umidade e de temperatura durante a secagem em leito fixo espesso.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pela ajuda financeira.

NOMENCLATURA

D	Diâmetro da parte esférica	(mm)
E	Espessura	(mm)
L	Comprimento	(mm)
S	Área superficial	(mm ²)
t_0	Tempo inicial de aplicação da reversão	(min)

U	Velocidade de escoamento do ar	(m·s ⁻¹)
V	Volume	(mm ³)
W	Largura	(mm)
Δt	Duração da reversão	(min)
φ	Esfericidade	(-)
ρ_p	Massa específica aparente	(g.cm ⁻³)
ρ_b	Massa específica do leito	(g.cm ⁻³)
ε_b	Porosidade do leito	(-)

REFERÊNCIAS

- ALBINI, G. (2015), Reumidificação, Caracterização e Secagem de Grãos de Cevada em Leito Fixo. PPGEQ/UFSCar - São Carlos - SP, 127p (dissertação de mestrado).
- BARBOSA (2022), Estudo da Transferência de Calor e de Massa em um Leito Fixo Espesso de Grãos de Sorgo com reversão de sentido do Escoamento de Ar. PPGEQ/UFSCar - São Carlos - SP, 136p (dissertação de mestrado).
- BERBERT, P. A. *et al.* (1994), Drying of Coffee (*Coffea arabica* L.) in a Fixed Bed with a Simulated Periodic Airflow Reversal, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 59, Nro. 3, p. 195–202.
- DEFENDI, R. O. (2013) Secagem Periódica de Soja em Leito Fixo. PPGEQ/UEM - Maringá - PR, 87p (dissertação de mestrado).
- EMBRAPA. (2015), Armazenamento Inadequado de Grãos Resulta em Cerca de 15% de Perdas. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3860638/armazenamento-inadequado-de-graos-resulta-em-cerca-de-15-de-perdas>. Acesso em: 28 out. 2020.
- GENARO, L. B. (2021), Leito Fixo com Reversão do Ar de Secagem: Estudo Experimental e Numérico da Secagem de Alumina. PPGEQ/UFSCar - São Carlos - SP, 172p (dissertação de mestrado).

- JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; RIBEIRO, J. P. (2006), Economic Viability Acquisition of a Drying-Storing Facility, Designed for Small Farms. *Engenharia Agrícola*, Vol. 26, Nro. 3, p. 795–803.
- MAPA. (2020), Projeções do Agronegócio Brasil 2019/20 a 2029/30 Projeções de Longo Prazo. Mapa, p. 102.
- MUJUMDAR, A. S. (2006), Part I Fundamental Aspects - Principles, Classification, and Selection of Dryers. *In: MUJUMDAR, A. S. (org.). Handbook of Industrial Drying*. 3rd. ed. New York: CRC Press / Taylor & Francis Group, p. 23. (E-book).
- NAVARRO, S.; NOYES, R. (2001), The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management. Boca Raton: CRC Press LLC, (E-book).
- PRADO, M. M. do; SARTORI, D. J. M. (2011), Heat and Mass Transfer in Packed Bed Drying of Shrinking Particles. *Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications*, Intechopen, p621-651.
- RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. (1995), Simulation of Packed Bed Drying of Foodstuffs with Airflow Reversal. *Journal of Food Engineering*, Vol. 26, Nro. 3, p. 259–271.
- RUIZ-LÓPEZ, I. I. *et al.* (2008), Mathematical Modeling and Simulation of Batch Drying of Foods in Fixed Beds with Airflow Reversal. *Journal of Food Engineering*, v. 89, n. 3, p. 310–318.
- SOUZA, G. F. M. V. *et al.* (2015), Simultaneous Heat and Mass Transfer in a Fixed Bed Dryer. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, p. 38–44.
- WANG, Z. H.; CHEN, G. (1999), Heat and Mass Transfer in Fixed-Bed Drying. *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, Nro. 19, p. 4233–4243.