



ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SECADOR DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM DIFERENTES CARGAS DE MATERIAL PARA A SECAGEM DE FOLHAS DE BARBATIMÃO (*Stryphnodendron adstringens*)

ELENARA O. SILVA^{1*}, MARIA C. FERREIRA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Departamento de Engenharia Química
*e-mail: elenara.silva@gmail.com

RESUMO – O presente trabalho objetivou investigar a secagem de folhas de barbatimão em um secador de múltiplos estágios variando a carga de alimentação. Para isso, foram realizados ensaios de cinética de secagem e testes para avaliar a mistura do material no secador e a homogeneidade do produto seco. As cinéticas foram realizadas a 60°C, com velocidade do ar de secagem de 0,4 m/s e foram testadas as cargas de alimentação de 100 g (AM100), 200 g (AM200), 300 g (AM300) e 400 g (AM400). Foram ajustados os modelos de Lewis e Page aos dados de cinética de secagem. Os ensaios de mistura foram realizados utilizando uma técnica de traçador com folhas de diferentes colorações. Para o teste de homogeneidade foi analisada a umidade final do produto coletado em diferentes posições da bandeja de descarga. O aumento da carga de material provocou uma diminuição na taxa de secagem e os modelos cinéticos representaram adequadamente as curvas de umidade em função do tempo. A mistura do leito foi mais efetiva para a carga de 300 g. A umidade do produto final foi homogênea para as amostras com massas de 100 a 300 g. Dentre as condições testadas, a operação com 300g/estágio mostrou-se a mais adequada do ponto de vista operacional e de aproveitamento energético.

INTRODUÇÃO

A secagem é uma das mais antigas operações unitárias e pode ser definida como o processo de remoção térmica de água (ou outro líquido) de um material sólido, tendo como objetivo reduzir o teor de umidade do material até um valor adequado para o armazenamento ou processamento (McCabe *et al.*, 1991). É uma operação importante em diversos tipos de indústrias e envolve a transferência simultânea de calor e massa (Mujumdar, 2006).

A secagem de folhas medicinais ou aromáticas tem como principal finalidade a preservação dos constituintes bioativos para processamento posterior, tais como a obtenção de medicamentos fitoterápicos, extratos e óleos essenciais. Além de preservar os constituintes químicos e minerais das folhas, esta operação também proporciona a redução de volume e

indiretamente, uma redução de custos em transportes e manipulação, bem como aumento da vida útil das folhas (Kaya; Aydin, 2009; Lima, 2013; Canabarro, 2019).

A secagem de folhas é realizada, principalmente, por meio de processos convectivos, nos quais o material é exposto a uma corrente de ar aquecido que fornece energia para a remoção de água. Existem muitas possibilidades de configurações para de secagem, sendo comum a utilização de secadores de leito fixo como em estufas e secadores de bandeja. As vantagens da utilização destes secadores estão relacionadas, principalmente à sua fácil operação, construção e custo relativamente baixo (Ferreira, 2018).

Na secagem em leito fixo, o sólido é disposto na forma de uma camada estática de material, que é exposta a uma corrente de ar aquecido. Entretanto, quando se utiliza essa configuração para a secagem de folhas, é

comum ocorrer aglomeração do produto, o que dificulta um contato uniforme da fase fluida com a superfície do sólido (Lima, 2013). Isto pode ocasionar a formação de caminhos preferenciais de escoamento, bem como o desenvolvimento de gradientes de umidade e temperatura no interior do leito, mesmo quando a camada de material é rasa. Nesse caso, a qualidade do produto final pode ser afetada, pois as folhas podem apresentar características heterogêneas de umidade, cor e teor de constituintes de interesse.

Uma alternativa para melhorar a uniformidade da secagem é a utilização de equipamentos que possibilitem a movimentação e a mistura do leito através de mecanismos específicos para a homogeneização. Por exemplo, Temple e Von Boxtel (2000) propuseram a utilização de um secador com múltiplas esteiras dispostas em um arranjo vertical, no qual o material é descarregado a partir da esteira superior para as inferiores, permitindo sua movimentação.

Com proposta similar, Gardenal (2022) desenvolveu no DEQ/UFSCar um secador de múltiplos estágios, cujo princípio de funcionamento está ilustrado na Figura 1. A alimentação do material úmido é feita no estágio superior (último estágio), enquanto o ar aquecido é alimentado na base. A movimentação do leito é realizada a partir da descarga manual do material das bandejas superiores para as inferiores. Além de reduzir os problemas de aglomeração e não uniformidade da secagem devido à movimentação entre bandejas subsequentes, é possível processar uma maior quantidade de material utilizando o mesmo volume de ar. Além disso, a energia do ar de secagem é utilizada de maneira mais efetiva, pois o ar na saída de um estágio é alimentado sucessivamente na entrada do próximo estágio, proporcionando um maior aproveitamento da sua energia térmica.

Gardenal (2022) avaliou o desempenho do secador de múltiplos estágios para a secagem de folhas de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*) (Mart.) Coville. A autora avaliou a operação com a alimentação de uma carga de 100 g de folhas/estágio e obteve bons resultados em termos de homogeneidade de secagem. A autora

observou, contudo, que nas condições testadas o ar de exaustão deixava o secador com temperatura ainda elevada e sugeriu a realização de ensaios com cargas maiores de material.

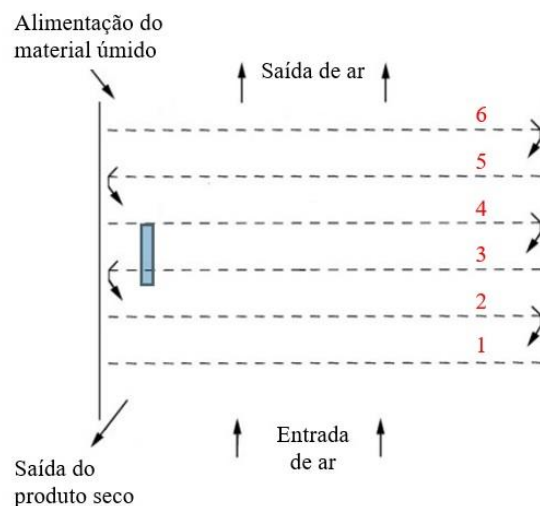


Figura 1: Esquema de funcionamento de um secador de múltiplas bandejas.

Fonte: Adaptado de Temple e von Boxtel (2000).

Assim, dando sequência ao estudo iniciado por Gardenal (2022), este trabalho objetiva avaliar a operação do secador de múltiplos estágios com diferentes cargas de material, visando identificar condições que possibilitem alcançar um melhor aproveitamento da energia do ar mantendo a qualidade do produto. Optou-se por continuar utilizando as folhas de barbatimão, que é uma planta endêmica do cerrado brasileiro e possui diversas propriedades farmacológicas, como atividades antioxidante e citotóxica (Santos *et al.*, 2002; Sabino *et al.* 2018; Santos Filho *et al.*, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

Materiais

A matéria-prima utilizada nos experimentos de secagem foram os ramos de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*), compostos pelas folhas e hastes, como é

ilustrado na Figura 2. As folhas utilizadas possuem um comprimento médio de 1,9 cm e largura de 1,7 cm. Os ramos possuem um comprimento médio de 8,13 cm. A fração mássica de hastes é de $13,6 \pm 0,4\%$ e de folhas é de $86,4 \pm 0,4\%$, ou seja, os ramos são compostos majoritariamente por folhas.



Figura 2: Ramo de Barbatimão.

Os ramos de barbatimão foram coletados no Cerrado da Universidade Federal de São Carlos, no período de março a maio de 2022. Estes foram selecionados de acordo com a coloração inicial das folhas, bem como a ausência de manchas e danos visíveis. A umidade média inicial das folhas utilizadas nos ensaios foi de $52,2 \pm 1,1\%$, obtida pelo método de estufa a 105°C por 24 h.

Secador de múltiplos estágios

Os ensaios de secagem foram realizados no secador vertical de múltiplos estágios, ilustrado na Figura 3. A alimentação do material úmido é realizada na parte superior e a entrada de ar é realizada pela base, como descrito anteriormente.

Na Figura 3, a linha experimental é constituída por: (1) soprador, (2) manômetro de mercúrio, (3) placa de orifício, (4) aquecedor, (5) controlador de temperatura, (6) placa arduino UNO e sensores de umidade e temperatura DHT22, (7) bandeja seccionada (uma parte), (8) secador de bandejas, (9) chave seletora, (10) leitor de temperatura e (11) termopar do tipo T. O sensor DHT22 foi utilizado para a aquisição dos dados de umidade relativa e temperatura do ar na entrada e saída do secador. O sistema também conta com termopares do tipo T conectados na entrada dos estágios de secagem para o monitoramento da temperatura ao longo do secador.

O secador possui uma câmara de secagem vertical com dimensões de 97 cm x 39,3 cm x 30,5 cm. A câmara de secagem possui sete fendas para inserção de bandejas. As bandejas removíveis são constituídas de placas de metal perfuradas, permitindo o escoamento do ar. Uma bandeja é composta de três seções, cada uma com dimensões 30,0 x 12,8 cm (Figura 3 (7)), sendo que cada seção possui um eixo central que possibilita sua rotação. As bandejas podem ser distribuídas verticalmente variando-se a distância entre elas e o número de estágios utilizados. A distância mínima entre as bandejas é de 11,88 cm. Esse espaçamento pode ser aumentado utilizando-se as bandejas posicionadas em fendas alternadas. Na base do secador, há uma gaveta de chapa perfurada com 10 cm de altura para a coleta do material seco.

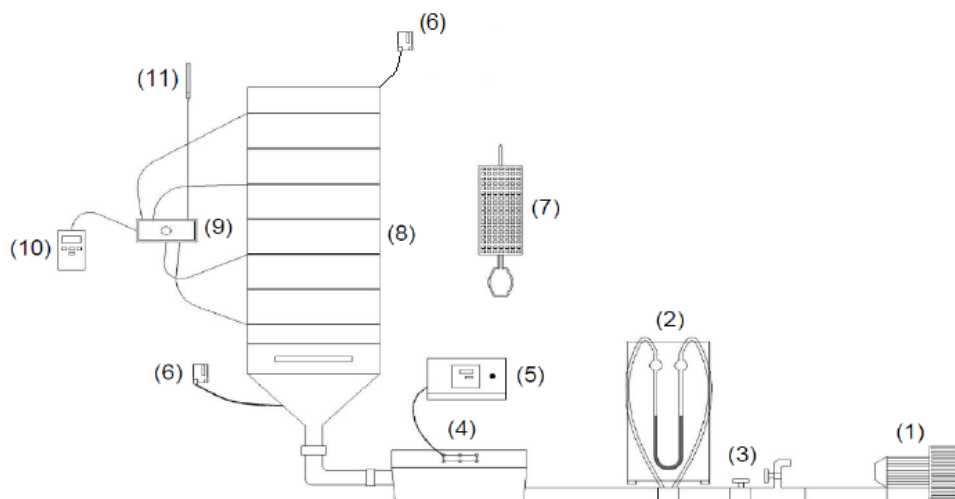


Figura 3: Linha de operação do secador de bandejas de múltiplos estágios.
Fonte: Adaptado de Gardenal (2022).

A operação de secagem é realizada como um sistema de bateladas em série (ou semi-contínuo). Sendo assim, o material é alimentado no secador no estágio superior, onde permanece por um tempo predeterminado e posteriormente é descarregado para a bandeja inferior. O processo continua até a obtenção de um produto com a umidade final desejada.

Análise da cinética de secagem

Para avaliar a influência da carga do material na velocidade de secagem, foram efetuados ensaios de cinética de secagem com massas iniciais de 100 g, 200 g, 300 g e 400 g. Será adotada a nomenclatura de AM100, AM200, AM300 e AM400 para estas amostras. As cargas de material utilizadas neste trabalho foram escolhidas a partir de estudos prévios (Gardenal, 2022).

Todas as secagens foram realizadas a temperatura de 60°C, com uma velocidade média de escoamento do ar de 0,4 m/s e em triplicata. Para uma estimativa do tempo requerido para a secagem das diferentes cargas do material, foram obtidas curvas de cinética de secagem para as 4 cargas de material. Para obtenção das curvas de cinéticas foi utilizado um único estágio do secador, devido à impossibilidade de fazer amostragens simultâneas em diferentes bandejas. Por praticidade de operação, optou-se por utilizar o 4º estágio para esses ensaios. Na operação com um único estágio, Gardenal (2022) já demonstrou não haver diferença significativa na cinética de secagem em função da posição da bandeja no secador.

A perda de peso das folhas foi monitorada em intervalos de 5 e 10 minutos em uma balança eletrônica (Marte, AL500). Este procedimento foi realizado até a obtenção de massa constante. A partir dos dados da perda de massa em função do tempo foram calculados o adimensional de umidade (MR) e a taxa de secagem (N), expressos nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

$$N = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (2)$$

Foram ajustadas as equações semi-empíricas de Lewis (Equação 3) e Page (Equação 4) aos dados experimentais a fim de determinar a equação mais adequada para descrever a perda de umidade em função do tempo para as folhas de barbatimão.

$$MR = \exp(-k \cdot t) \quad (3)$$

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (4)$$

A qualidade dos ajustes foi avaliada a partir do coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado (X^2) (Equação 5) e soma quadrática dos resíduos (SQR) (Equação 6).

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{exp} - y_{mod})^2}{nn - NN} \quad (5)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_{exp} - y_{mod})^2 \quad (6)$$

Além disso, para cada condição foram estimadas a taxa de fornecimento de calor (Q_l) e a energia utilizada para a evaporação da umidade do leito de folhas (Q_{ev}), ambas em kJ/min. Q_l e Q_{ev} foram obtidos pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$Q_l = \dot{m}C_p(T_e - T_{amb}) \quad (7)$$

$$Q_{ev} = \frac{m_{vap} \cdot \lambda}{t} \quad (8)$$

Análise de Mistura

Com o objetivo de verificar se a descarga do material entre as bandejas era efetiva para promover a mistura das folhas no interior do secador de acordo com a quantidade de material alimentada, realizou-se a análise para as amostras AM200 e AM300. A análise de mistura para AM100 foi apresentada anteriormente por Gardenal (2022).

O procedimento consistiu em dividir o leito de folhas em três frações, e cada uma destas foi colorida com uma cor específica usando tinta spray. A amostra AM200 foi alimentada no quarto estágio e AM300 no sétimo estágio. Realizou-se, então, o

descarregamento sucessivo do leito com as folhas coloridas da bandeja superior para as inferiores e visualmente observou-se sua distribuição na superfície das bandejas. Ao final, a amostra foi recolhida na gaveta do secador.

Análise da Homogeneidade da Secagem

A análise de homogeneidade de umidade foi realizada com o objetivo de verificar se o processo de secagem ocorreu de forma homogênea para diferentes cargas iniciais de folhas. Para isso, foram feitos ensaios com as amostras AM100, AM200 e AM300 a uma temperatura de secagem de 60°C, em operação semi-contínua. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se quatro estágios do secador e a alimentação foi feita no quarto estágio para AM100 e AM200 e no sétimo estágio para AM300. Para as secagens com AM100 e AM200 foram utilizados os menores espaçamentos (11,88 cm) entre as bandejas, ou seja, os estágios 1, 2, 3 e 4. Para o ensaio com AM300, utilizou-se os estágios 1, 3, 5 e 7, pois foi necessário um maior espaçamento (23,76 cm) entre as bandejas para acomodar o material.

Com base nos ensaios de cinética para as diferentes massas, o tempo total de secagem para que os ramos atingissem a umidade final desejada foi estimado. Esse tempo foi dividido entre os estágios e adotou-se um valor de 10% (b.u.) como umidade final requerida. Tal valor foi assumido por estar na faixa recomendada pela Farmacopeia Brasileira para o armazenamento de matérias-primas vegetais, entre 8 e 14% (b.u.).

Ao final do tempo de secagem o material descarregado na gaveta (base do secador) foi coletado em seis diferentes posições, conforme ilustrado na Figura 4. Cada amostra foi seca em estufa a 105°C por 24 h.



Figura 4: Vista superior das regiões de coleta de amostras na gaveta do secador.

Eficiência de secagem (ϵ_D)

A eficiência térmica das secagens pode ser estimada a partir da relação proposta por Menshutina *et al.* (2004) e expressa pela Equação 9. O autor define a eficiência de secagem (ϵ_D) como uma razão entre a energia utilizada para a vaporização de água e a diferença entre as energias alimentada na corrente de ar de entrada e dissipada na corrente de ar na saída do sistema, ou seja, a energia efetivamente consumida no processo.

$$\epsilon_D = \frac{R_w \cdot \lambda}{\dot{m} \cdot [C_H^e \cdot (T_e - T_{amb}) - C_H^s \cdot (T_s - T_e)]} \quad (9)$$

As eficiências médias de secagem obtidas nos ensaios de secagem a 60°C, com 1 (ϵ_{D1}) e com 4 (ϵ_{D4}) estágios do secador para AM100, AM200 e AM300 foram estimadas. Os tempos de residência do material em cada estágio foram os mesmos utilizados nos ensaios de homogeneidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cinética de secagem

Com o intuito de analisar a influência da carga de material na cinética de secagem, são apresentadas na Figura 5 as curvas de adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem (5.a) e de taxa de secagem (5.b) em função do adimensional de umidade.

Na Figura 5 é possível observar que as curvas apresentaram um comportamento similar de queda de umidade ao longo do tempo. O aumento da carga alimentada no secador provocou um pequeno aumento no tempo necessário para o equilíbrio dinâmico da secagem, como mostra a Figura 5.a. As diferenças nas curvas para as massas utilizadas são perceptíveis, principalmente, no período inicial da secagem, onde observa-se que diferentes tempos foram necessários para as folhas alcançarem uma determinada umidade. Se comparamos, por exemplo, o tempo necessário para que as amostras atinjam um MR de 0,2, tem-se os valores de 16,1 min para AM100, 22,1 min para AM200, 24,7 min para AM300 e 30,5 min para AM400. Nota-se que o tempo necessário para AM400 foi praticamente o dobro do tempo da AM100.

Na Figura 5.b, são visualizadas as curvas de taxa de secagem para as folhas de barbatimão. Em todos os ensaios observa-se um comportamento decrescente. Isto sugere que a transferência de umidade é controlada pelos mecanismos internos de transferência de massa. Nesse caso, a estrutura interna do material exerce uma resistência significativa ao transporte de massa e os processos internos de migração de umidade limitam o processo. O comportamento decrescente das curvas de secagem é característico da secagem de folhas, sendo relatado em diversos trabalhos da literatura. Lima (2013), Rosanova (2017) e Canabarro (2019) observaram comportamento similar na secagem de folhas de manjeriço, hortelã e oliveira, respectivamente.

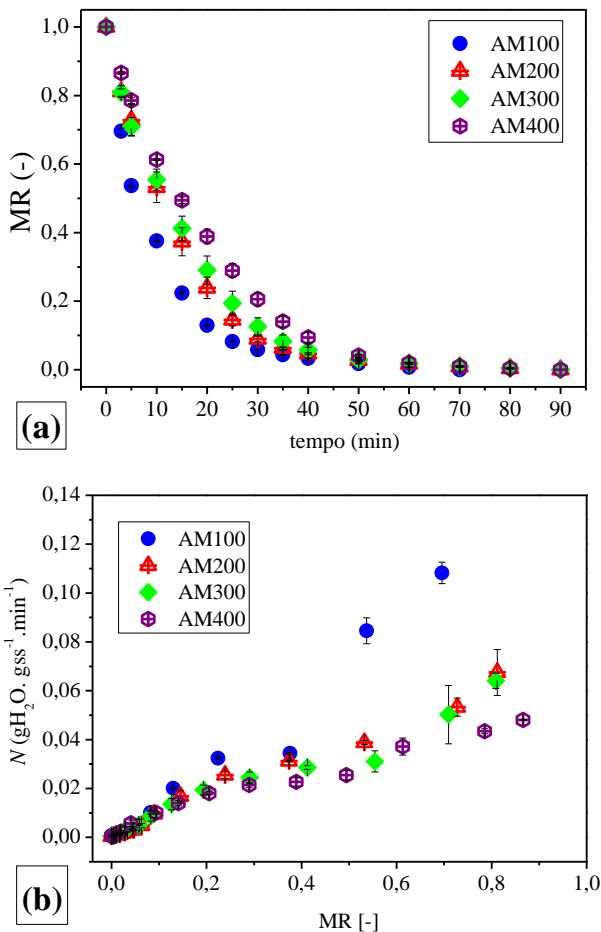


Figura 5: Curvas do adimensional de umidade em função do tempo (a) e de taxas de secagem em função do tempo (b) para os ensaios com diferentes massas de folhas.

Os experimentos realizados com AM100 apresentaram uma taxa de secagem média mais elevada do que os demais ensaios. Os valores

iniciais para as taxas de secagem foram 0,108 gH₂O/(gss.min) para AM100, 0,067, 0,064 e 0,048 gH₂O/(gss.min) para as amostras AM200, AM300 e AM400, respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de Q_I e Q_{ev} , estimadas pelas Eqs. (7) e (8), respectivamente. A taxa de calor consumida na evaporação da água da amostra foi estimada para o tempo de secagem de 90 min.

Tabela 1: Energias fornecida e utilizada na secagem.

| Amostra | Q_I (kJ/min) | Q_{ev} (kJ/min) |
|---------|----------------|-------------------|
| AM100 | 120,47 | 1,30 |
| AM200 | 122,76 | 2,56 |
| AM300 | 120,95 | 3,91 |
| AM400 | 117,49 | 5,33 |

É possível observar, a partir da Tabela 1, que a energia total necessária para a evaporação (Q_{ev}) de umidade das folhas aumenta em função do aumento da carga do leito. Devido à maior massa de folhas, aumenta a quantidade de umidade a ser removida da amostra, consumindo mais energia. A comparação entre os valores de Q_{ev} e Q_I evidencia que a energia está sendo fornecida em excesso e não é limitante para a secagem em nenhuma das condições avaliadas. Além disso, os valores de temperatura e umidade do ar na saída do secador indicam que o ar está distante das condições de saturação. Os valores para a umidade absoluta na saída do secador ficaram entre 0,015 e 0,017 kg H₂O/kg ar seco para todas as amostras, sendo que a condição de saturação seria atingida para umidades entre 0,52 e 0,63 kg H₂O/kg ar seco.

Na Tabela 2 são mostrados os valores para as temperaturas médias de entrada do leito e saída do secador.

Tabela 2: Dados de temperatura do ar de entrada e saída.

| Amostra | T_{eL} (°C) | T_s (°C) | ΔT (°C) |
|---------|---------------|------------|-----------------|
| AM100 | 58,6±0,1 | 46,1±1,6 | 12,5 |
| AM200 | 57,7±0,3 | 46,3±3,2 | 11,4 |
| AM300 | 57,6±0,5 | 46,1±0,2 | 11,5 |
| AM400 | 57,1±0,3 | 42,5±0,8 | 14,6 |

Nota-se na Tabela 2 que a queda na temperatura do ar após percolar o leito de folhas foi similar para as amostras AM100, AM200 e

AM300 e mais elevada na secagem com a AM400. Porém, em todos os casos as temperaturas do ar na saída do secador são elevadas, acima de 40°C.

A partir dos dados apresentados fica evidente que a diminuição da taxa de secagem em função do aumento da carga de material não ocorre devido a uma limitação no fornecimento de energia. Portanto, a redução observada na taxa de secagem deve-se, possivelmente, à fatores associados à estrutura do leito fixo de folhas e a qualidade do contato entre o ar de secagem e a fase sólida, constituída pelas folhas.

Para que a secagem seja efetiva, é necessário que o ar seja uniformemente distribuído no entorno de cada folha. Como já foi observado anteriormente, leitos fixos constituídos por folhas tendem a formar aglomerados que favorecem a formação de caminhos preferenciais de escoamento, o que reduz a área de contato gás-sólido e prejudica a uniformidade da secagem (Lima, 2013). Os dados experimentais permitem estimar umidades e taxas médias de secagem, mas localmente elas podem variar.

Na Tabela 3 são mostrados os valores da espessura inicial de cada amostra e sua densidade *bulk* média (ρ_{bulk}), estimadas a partir da massa e volume ocupado pela camada de folhas na bandeja. Observa-se que o valor médio estimado assume que o material está distribuído de maneira uniforme, o que possivelmente não se aplica no caso das folhas. A ρ_{bulk} expressa a relação entre a massa de folhas do leito com o seu respectivo volume ocupado, considerando os espaços vazios. Assim, leitos mais compactos, com maiores valores de ρ_{bulk} possuem um menor volume ocupado por espaços vazios, o que reduz a área de contato.

Tabela 3: Dados de espessura e ρ_{bulk} do leito.

| Amostra | Espessura inicial do leito (cm) | ρ_{bulk} (g/cm ³) |
|---------|---------------------------------|------------------------------------|
| AM100 | 2,5 | 0,033 |
| AM200 | 4,9 | 0,034 |
| AM300 | 6,5 | 0,039 |
| AM400 | 7,5 | 0,045 |

Apesar das estimativas representarem valores médios, estes serão utilizados para fins comparativos entre os ensaios. Os valores de densidade *bulk* são baixos, o que é uma característica de leitos fixos formados por folhas (Ferreira, 2018). Pode-se observar o aumento da compactação do leito à medida que são utilizadas maiores cargas. Para as amostras AM100, AM200 e AM300, apesar da tendência de aumento, os valores de ρ_{bulk} não apresentaram diferença expressiva e pode-se inferir que os leitos possuem estrutura similar. Isso pode justificar as menores diferenças observadas entre as curvas cinéticas e taxas de secagem nessas condições.

Para a amostra AM400, contudo, o valor de $\rho_{bulk} = 0,045$ g/cm³ é cerca de 36% maior do que para AM100 e 15% maior do que para AM300. Um leito menos poroso, em princípio, dificulta o contato homogêneo entre o ar e a superfície das folhas durante a secagem, contribuindo para a redução da taxa de secagem observada nessa condição.

Para a AM400, a redução na taxa média de secagem também pode ser atribuída à formação de gradientes significativos de umidade e temperatura devido à maior espessura do leito. Camadas mais espessas favorecem o desenvolvimento de maiores gradientes de umidade e temperatura, reduzindo o potencial de secagem do ar.

A secagem de folhas de barbatimão com 400 g em leito fixo de aproximadamente 6 cm de espessura foi analisada por Gardenal (2022). A autora constatou que após 30 minutos de secagem, as folhas de barbatimão localizadas na base do leito apresentaram uma umidade média de 25,1%, enquanto as folhas localizadas no topo do leito tinham umidade de 43,9%. Esses valores evidenciam a forte heterogeneidade na secagem dessa amostra.

Os dados experimentais de cinética de secagem de todas as amostras foram ajustados às equações semi-empíricas de Lewis e Page. As curvas dos ajustes para as amostras AM100 e AM400 são apresentadas na Figura 6. As demais curvas não foram apresentadas pois os ajustes foram similares.

Na Figura 6, pode-se observar que as duas equações testadas se ajustaram bem aos dados experimentais e podem ser utilizados para descrever a cinética de secagem das folhas de

barbatimão. A qualidade destes ajustes pode ser verificada na Tabela 4, por meio dos valores do coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado (X^2) e soma quadrática dos resíduos (SQR).

Analisando a Tabela 4, verifica-se que para as equações de Lewis e Page a regressão foi estatisticamente significativa, concordando com as curvas apresentadas na Figura 6. Os valores obtidos de R^2 foram próximos à unidade, ou seja, em todos os casos cerca de 99% da variação total em torno da média pode ser explicada pela regressão, o restante corresponde aos resíduos. O bom ajuste dos modelos é confirmado pelos baixos valores de X^2 . Quanto menores forem estes valores mais o modelo se ajusta ao dado experimental. Ainda, os valores de SQR abaixo de 10% corroboram a boa qualidade dos ajustes em todos os casos.

Os valores obtidos para a constante de secagem k , do modelo de Lewis, diminuíram com o aumento da massa do leito de folhas, comportamento que está de acordo com as taxas de secagem, pois para a AM100 a taxa de secagem foi maior e, conseqüentemente, o valor de k também. O valor da constante de secagem k foi de $0,105 \text{ min}^{-1}$ para os ensaios com 100 g de folhas de barbatimão e de $0,051 \text{ min}^{-1}$ para o ensaio com 400 g de folhas.

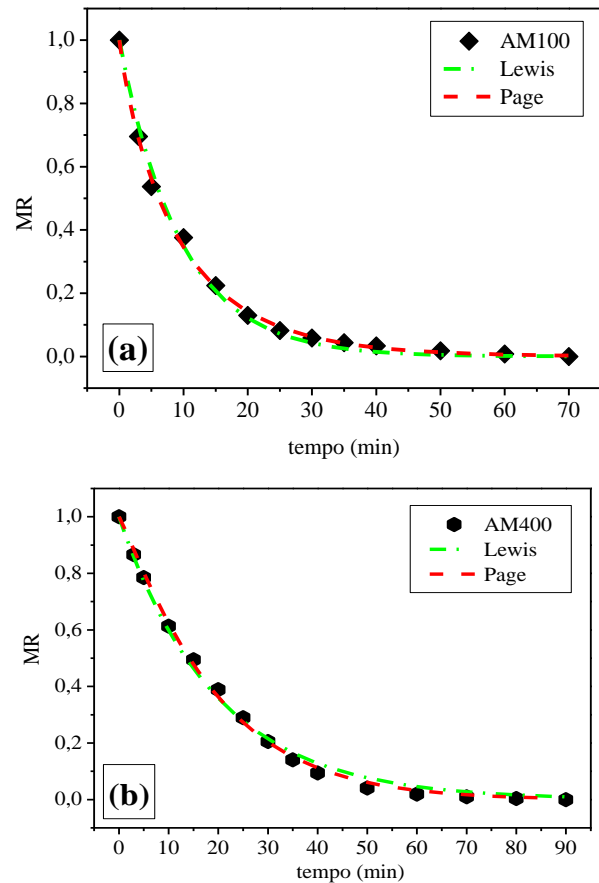


Figura 6: Ajustes dos modelos aos dados experimentais para as amostras AM100 (a) e AM400 (b).

Tabela 4: Parâmetros de ajuste dos modelos de cinética de secagem para as amostras AM100, AM200, AM300 e AM400.

| | | Lewis | | | |
|---------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Amostra | | AM100 | AM200 | AM300 | AM400 |
| Parâmetro do modelo | $k \text{ (min}^{-1}\text{)}$ | 0,105 | 0,070 | 0,064 | 0,051 |
| | R^2 | 0,9947 | 0,9968 | 0,9975 | 0,9958 |
| | X^2 | 5,3E-4 | 3,6E-4 | 2,7E-4 | 4,9E-4 |
| | SQR | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,006 |
| | | Page | | | |
| Amostra | | AM100 | AM200 | AM300 | AM400 |
| Parâmetro do modelo | $k \text{ (min}^{-1}\text{)}$ | 0,14 1 | 0,052 | 0,058 | 0,036 |
| | $n \text{ (-)}$ | 0,874 | 1,101 | 1,029 | 1,107 |
| | R^2 | 0,9983 | 0,9984 | 0,9975 | 0,9979 |
| | X^2 | 1,6E-4 | 1,7E-4 | 2,7E-4 | 2,4E-4 |
| | SQR | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 |

Análise da mistura das folhas de barbatimão no interior do secador

Em função da redução da taxa de secagem observada para a amostra AM400 e também por facilidade operacional, optou-se restringir a

carga de operação do secador a 300 g/estágio. Assim, os ensaios para avaliação da mistura obtida no descarregamento das folhas das bandejas superiores às inferiores foi feito para as amostras AM200 e AM300 e os resultados

são mostrados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

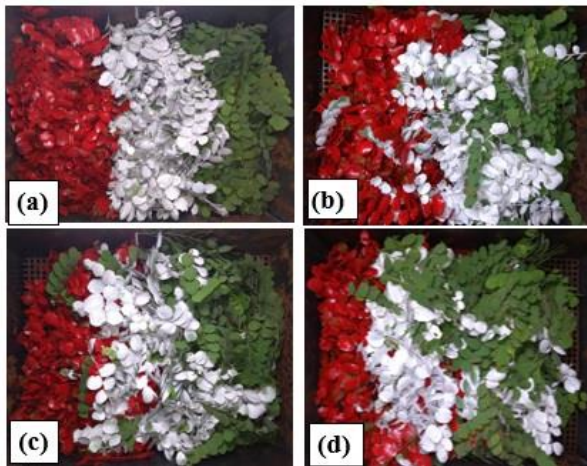


Figura 7: Distribuição dos ramos para AM200 no 4º (a), 3º (b), 2º (c) e 1º (d) estágios do secador.

Na Figura 7, a distribuição das folhas para AM200 do 4º (a) ao 1º (d) estágio do secador demonstra que houve uma mistura do material, porém ela não foi completa pois é possível observar um padrão de cores separadas na superfície da camada.

Na Figura 8 observa-se que, para AM300, a mistura foi mais efetiva, apesar da quantidade de folhas utilizadas ser maior do que no ensaio anterior. Nesse ensaio foi utilizado um maior espaçamento entre as bandejas, o que pode ter contribuído para esse resultado.

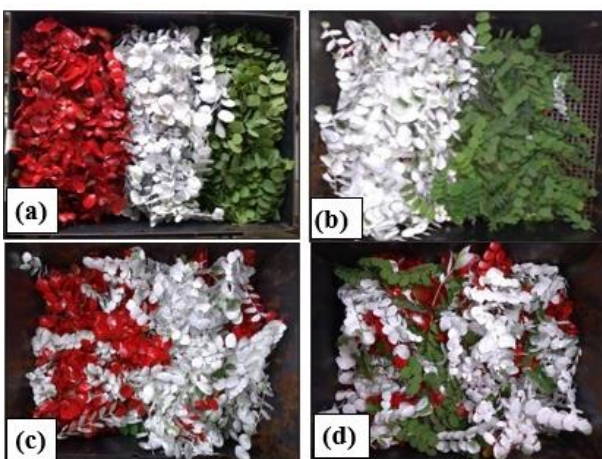


Figura 8: Distribuição dos ramos para AM300 no 4º (a), 3º (b), 2º (c) e 1º (d) estágios do secador.

De modo geral, para ambas as amostras, o processo de movimentação do leito entre os estágios proporcionou um grau de mistura do

material, mas ela foi mais efetiva para a AM300. Uma possível alternativa para melhorar a mistura no caso da AM200 seria a utilização de um maior espaçamento entre as bandejas também para esta carga de folhas.

Análise da homogeneidade de umidade na saída do secador

Os testes de homogeneidade foram efetuados no regime de bateladas em série, simulando uma operação contínua, com o material sendo carregado no estágio 4 e sucessivamente transferido para os estágios inferiores. A partir das curvas de cinética, adotou-se o tempo total de secagem de 40 minutos para a AM100 e AM200. Para a AM300 estimou-se um tempo total de 46 minutos. Os tempos foram divididos entre os quatro estágios a serem utilizados, conferindo um tempo de residência (t_r) de 10 min/estágio para AM100 e AM200 e de 11,5 min/estágio para AM300.

Os resultados para o teste de homogeneidade de umidade das folhas de barbatimão são mostrados na Tabela 5. Estes valores foram obtidos, avaliando-se a umidade de 6 posições diferentes na gaveta de coleta do material seco, como mostrado na Figura 4.

Tabela 5: Valores da umidade de descarga medidas em diferentes posições da gaveta para AM100, AM200 e AM300.

| Posição na gaveta | Umidade (%) | | |
|-------------------|-------------|-------|-------|
| | AM100 | AM200 | AM300 |
| 1 | 11,53 | 13,77 | 11,28 |
| 2 | 10,71 | 11,60 | 11,05 |
| 3 | 10,48 | 11,00 | 10,36 |
| 4 | 11,29 | 13,15 | 11,13 |
| 5 | 11,42 | 12,53 | 9,65 |
| 6 | 10,96 | 13,02 | 10,01 |
| Média | 11,06 | 12,51 | 10,57 |
| DP | ±0,34 | ±0,80 | ±0,57 |

A partir da Tabela 5, pode-se observar que a variação da umidade final de acordo com a posição na gaveta de coleta foi pequena para todas as amostras. Isto demonstra que as folhas apresentam características homogêneas, o que é desejável para um produto de qualidade. Os valores médios de umidade das folhas na saída do secador foram de $11,06 \pm 0,34\%$ para AM100, $12,51 \pm 0,80\%$ para AM200 e $10,57 \pm$

0,57% para AM300. Assim, para todos os ensaios, foi observada a conformidade com a faixa de umidade estabelecida pela Farmacopeia Brasileira para o armazenamento de espécies vegetais.

Pode-se considerar que para todas as cargas de folhas de barbatimão alimentadas (entre 100 e 300 g), a secagem ocorreu de maneira uniforme e o secador atingiu o objetivo de garantir uma secagem homogênea. Os resultados indicam que o secador opera adequadamente com capacidade de alimentação de folhas de barbatimão de até 300 g/bandeja, utilizando-se quatro estágios de secagem, com um espaçamento de 23,76 cm entre eles.

Eficiência média de secagem (ϵ_D)

Para fins comparativos, na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos para a eficiência média de secagem para a operação realizada com um único estágio do secador em funcionamento (ϵ_{D1}) e com quatro estágios em operação (ϵ_{D4}), estimados de acordo com a Equação (9).

Tabela 6: Eficiência média de secagem.

| Amostra | ϵ_{D1} (%) | ϵ_{D4} (%) |
|---------|---------------------|---------------------|
| AM100 | 0,8 | 2,5 |
| AM200 | 1,4 | 3,9 |
| AM300 | 1,8 | 4,7 |

A partir dos dados da Tabela 6 é possível constatar que, como esperado, a eficiência de secagem aumentou com o aumento da carga de material. Em geral, as eficiências de secagem foram baixas, mas para as três condições testadas foi observado um aumento significativo na operação com 4 estágios em relação à operação com um único estágio. Os leitões de folhas possuem porosidade elevada, favorecendo uma rápida percolação do ar devido à baixa resistência oferecida pelo meio. O tempo de residência curto durante a secagem limita a taxa de evaporação da umidade, resultando em baixas eficiências de secagem.

Os resultados evidenciam o ganho em termos energéticos da utilização do secador com maior número de estágios, proporcionando um melhor aproveitamento do calor do ar fornecido para a secagem do material úmido.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que a mistura do material durante a descarga foi mais efetiva para a amostra AM300 em comparação à AM200. As amostras AM100, AM200 e AM300 apresentaram uma umidade uniforme na saída do secador e dentro da faixa estipulada pela Farmacopeia Brasileira.

Na operação com 4 estágios, a eficiência média de secagem aumentou de 2,5% na operação com 100 g/estágio para 4,7%, na operação com 300 g/estágio, indicando um ganho significativo no aproveitamento da energia do ar de secagem.

Dentre as condições avaliadas, recomenda-se a operação do secador utilizando 4 estágios, com distância entre as bandejas de 23,76 cm e carga de 300g/estágio. Nessa condição, o tempo de permanência do material em cada estágio na operação em regime de bateladas em série deve ser de 11,5 min para reduzir a umidade até os valores especificados. Assim, a secagem de uma batelada corresponde a um tempo de residência total de 46 minutos do material no secador, fornecendo um produto homogêneo em termos de umidade. Isto proporciona uma capacidade de processamento de 1500 g/h para as folhas de barbatimão no secador multiestágios.

NOMENCLATURA

| | | |
|--------------|---|----------------------|
| n | Constantes do modelo de Page | [-] |
| C^e_H | Calor úmido do ar na entrada do secador | [kJ/(kg. K)] |
| C^s_H | Calor úmido do ar na saída do secador | [kJ/(kg. K)] |
| C_p | Calor específico do ar | [kJ/(kg.K)] |
| ϵ_D | Eficiência média de secagem | [-] |
| k | Constante de secagem | [min ⁻¹] |
| \dot{m} | Vazão mássica de ar | [kg/m ³] |
| m_{vap} | Água vaporizada durante a secagem | [kg] |
| MR | Adimensional de umidade | [-] |

| | | |
|---------------|--|-------------------------------|
| N | Taxa de secagem | [gH ₂ O/(gss.min)] |
| nn | Número de observações experimentais | [-] |
| NN | Número de parâmetros de ajuste | [-] |
| Q_1 | Energia fornecida para o sistema | [kJ/min] |
| Q_{ev} | Energia utilizada para a evaporação de toda a umidade do leito | [kJ/min] |
| R^2 | Coefficiente de determinação | [-] |
| R_w | Taxa de secagem média | [kg/min] |
| SQR | Soma quadrática dos resíduos | [-] |
| T | Tempo | [min] |
| T_{amb} | Temperatura do ar ambiente | [°C] |
| T_e | Temperatura do ar de entrada do secador | [°C] |
| T_{eL} | Temperatura do ar de entrada do leito | [°C] |
| t_r | Tempo de residência no estágio | [min] |
| T_s | Temperatura do ar de saída do secador | [°C] |
| X^2 | Qui-quadrado | [-] |
| X_0 | Umidade inicial da amostra | [gH ₂ O/gss] |
| X_e | Umidade de equilíbrio | [gH ₂ O/gss] |
| X_t | Umidade da amostra em um tempo t | [gH ₂ O/gss] |
| y_{exp} | valor experimental | [-] |
| y_{mod} | valor predito pelo modelo | [-] |
| ρ_{bulk} | Massa específica bulk do leito | [kg/m ³] |
| Λ | Calor latente de vaporização da água | [kJ/kg] |

REFERÊNCIAS

CANABARRO, N. I (2019), Secagem convectiva de folhas visando a obtenção de compostos bioativos via extração supercrítica. PPGEQ/UFSCAR - São Carlos – SP, 175p. (Tese de Doutorado).

FERREIRA, M. C. A (2018). Secagem de folhas aromáticas e medicinais analisada pela óptica de sistemas particulados. In: FREIRE, J. T. (Eds) Tópicos em Secagem de Produtos Naturais. p. 128–163.

GARDENAL, A. C (2022). Desenvolvimento de um secador de bandejas para a secagem de folhas medicinais e análise da secagem das folhas de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*). PPGEQ/UFSCAR - São Carlos – SP, 119p. (Dissertação de Mestrado).

KAYA, A.; AYDIN, O (2009). An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. Energy Conversion and Management, v. 50, n. 1, p. 118–124.

LIMA, R. D. A. B. (2013). Análise da secagem convectiva de folhas de manjerição (*Ocimum basilicum* L.). PPGEQ/UFSCAR - Campus São Carlos, São Carlos - SP, 145 p. (Tese de Doutorado).

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. (1991). Unit operations of chemical engineering, 4 Ed. Madrid: McGraw-Hill.

MENSHUTINA, N. V.; GORDIENKO, M. G.; VOYNOVSKIY, A. A.; KUDRA, T. (2004). Dynamic analysis of drying energy consumption. Drying Technology, v. 22, n. 10, p. 2281–2290.

MUJUMDAR, A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying. 3. ed. Nova York (EUA): Taylor & Francis Group, LLC.

ROSANOVA, A.H (2017). Desenvolvimento de um secador de tambor rotativo para a secagem de folhas condimentares e fitoterápicas. PPGEQ/UFSCAR - São Carlos, São Carlos - SP, 160 p. (Tese de Doutorado).

SABINO, A. P. L.; EUSTÁQUIO, L. M. S.; MIRANDA, A. C. F.; BIOJONE, C.; MARIOSA, T. N.; GOUVÊA, C. M. C. P (2018). *Stryphnodendron adstringens* (“Barbatimão”) Leaf fraction: Chemical characterization, antioxidant activity, and cytotoxicity towards human breast cancer

cell lines. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 184, n. 4, p. 1375–1389.

SANTOS, S. C.; COSTA, W. F.; RIBEIRO, J. P.; GUIMARÃES, D. O.; FERRI, P. H.; FERREIRA, H. D.; SERAPHIN, J. C (2002). Tannin composition of barbatimão species. *Fitoterapia*, v. 73, n. 4, p. 292–299.

SANTOS FILHO, P. R. dos; FERREIRA, L. A.; GOUVÊA, C. M. C. P (2011). Protective action against chemical-induced genotoxicity and free radical scavenging activities of *Stryphnodendron adstringens* (“barbatimão”) leaf extracts. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 21, n. 6, p. 1000–1005.

TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. (2000). A Comparison of dryer types used for tea drying. *J. Agric. Engng. Res.*, v. 77, n. 4, p. 401-407.