

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

Partial drying of cherry tomatoes in a vibrated tray dryer with recycle

Autores | Authors

Giovani Aud LOURENÇO

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Faculdade de Engenharia Química
Uberlândia/MG - Brasil
e-mail: gio_aud@yahoo.com.br

✉ José Roberto Delalibera FINZER

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Faculdade de Engenharia Química
Rua Bernardo Cupertino, 580, Bairro
Martins
CEP: 38400-444
Uberlândia/MG - Brasil
e-mail: jrdfinzer@pq.cnpq.br

✉ Autor Correspondente | Corresponding Author

Recebido | Received: 05/09/2013
Aprovado | Approved: 06/11/2013
Publicado | Published: dez./2013

Resumo

Foram analisados os dados experimentais da curva e da cinética de secagem para desidratação parcial do tomate-cereja ovalado, *Lycopersicum sp. Mill.*, e foi verificado o desempenho na aplicação de um secador em leito fixo e em leito vibrado na sua secagem. A umidade inicial do tomate-cereja foi de 94,01% (15,7 kg água/kg massa seca) e utilizou-se um secador de bandejas vibradas operando com reciclo até que no tomate restasse 15% da quantidade de água inicial ou umidade em base úmida de 70,15% (2,35 kg de água/kg de massa seca). Para a identificação dos frutos amostrados, estes foram dispostos em cinco cestos feitos de tecido de polietileno, com diâmetros de abertura de cerca de 0,01 m. Os tomates-cereja processados foram seccionados radialmente em duas metades, perpendicularmente ao eixo de maior comprimento de cada fruto. A temperatura, a vazão de ar e a quantidade de tomate alimentada foram ajustadas em 67,6 °C, 6 kg/min e 4,025 kg, respectivamente. O processo de secagem iniciou-se com operação em batelada sem recirculação dos frutos, até que se atingiu o teor de umidade de aproximadamente 85% (5,67 kg água/kg tomate seco); seguiu-se a adição de esferas de porcelana com 0,0235 m de diâmetro, as quais forçaram o escoamento das partículas de tomate e o processo passou a ocorrer com recirculação. Na cinética de secagem obtida dos resultados experimentais, três períodos foram identificados: dois períodos em que os tomates secaram em taxas constantes, intercalados por um período com taxa variável. Para as taxas de secagem constantes, quantificaram-se os valores do coeficiente de correlação superiores a 0,99, ao ajustar uma reta aos pontos experimentais. Comparando-se o processo de secagem de leito fixo com o vibrado, observou-se que, no processo com aplicação de vibração, ocorreu diminuição em 30% do tempo de secagem. A esfericidade do tomate variou do valor unitário (início da secagem) para 0,53 ao final da secagem. A contração do tomate na secagem foi de 80% e o diâmetro médio inicial das partículas, de 2,32 cm, modificou-se para 1,34 cm, no final da secagem. Os resultados indicaram que as influências simultâneas da vibração e das esferas de porcelana intensificam o processo de secagem, resultando em uma cinética de secagem não convencional.

Palavras-chave: *secagem; tomate-cereja; vibração; cinética de secagem; planejamento composto central.*

■ Summary

The kinetics and drying curve of the partial dehydration of oval cherry tomatoes, *Lycopersicum* sp. Mill., were analysed. The initial moisture content was 94.01% (15.7 kg water/kg dry mass) and the performances of both fixed and vibrating bed dryers were determined. In the latter case, a vibrated tray dryer with recycle was used, recycling the product until the tomato was left with only 15% of the initial amount of water, that is a moisture content of 70.15% (2.35 kg water/kg dry mass) on a wet weight basis. For identification purposes, the fruits sampled were arranged in five baskets made of polyethylene fabric with a mesh of about 0.01 m in diameter. The cherry tomatoes were cut into two halves perpendicular to the axis of greatest length. The temperature, air flow and the amount of tomato fed in were adjusted to 67.6 °C, 6 kg/min and 4.025 kg, respectively. The initial part of the drying process was a batch operation with no recirculation of the fruit, until the moisture content reached about 85% (5.67 kg water/kg dry tomatoes). Porcelain balls with a diameter of 0.0235 m were then added which forced the flow of tomato particles, and as from this point the process occurred with recirculation. Three periods were identified in the drying kinetics obtained using the experimental results: two periods during which the tomatoes showed steady state drying rates, intercalated with one period showing a variable rate. For the constant drying rates, correlation coefficients with values above 0.99 were quantified on fitting a straight line through the experimental points. A comparison of the behaviours of the fixed and vibrating beds showed that the application of vibration decreased the drying time by 30%. The sphericity of the tomatoes ranged from a value of unity (start of drying) to 0.53 at the end of drying. Shrinkage of the tomatoes during drying was 80%, the initial average particle diameter of 2.32 cm reducing to 1.34 cm at the end of drying. The results indicated that the simultaneous influence of vibration and porcelain balls intensified the drying process, resulting in non-conventional air drying kinetics.

Key words: *drying; cherry tomatoes; vibration; drying kinetics; central composite design.*

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

1 Introdução

A secagem é a forma mais comum de preservação e aumento da vida de prateleira de alimentos em virtude da diminuição da atividade de água (PORTO e PINTO, 2002). A secagem possibilita, também, considerável economia no transporte, no manuseio e na estocagem do produto (ROMERO-PEÑA e KIECKBUSCH, 2003). O interesse por alimentos desidratados tem crescido paralelamente ao aumento da demanda por alimentos 'prontos para consumo'. No Brasil, em relação aos desidratados prontos para o consumo, por tratar-se de produtos relativamente novos, microempresas, em geral próximas às regiões produtoras, têm realizado o processamento. Verifica-se a aplicação de métodos artesanais, com a preparação manual do tomate e a secagem realizada ao sol, em fornos convencionais e variados tipos de secadores industriais; contudo, tais condições operacionais não são padronizadas (SANTOS, 2008). Portanto, é importante o conhecimento das influências que o equipamento exerce sobre o material processado (físicas e fenomenológicas), uma vez que a estrutura física tanto do equipamento quanto do material afeta sensivelmente a transferência de calor e massa.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar o comportamento do tomate-cereja e do secador de bandejas vibradas com reciclo na operação de secagem, visando à obtenção de tomate parcialmente desidratado.

2 Tomate parcialmente desidratado

Uma parte significativa da produção de tomate-cereja está concentrada em um curto período, durante o qual o seu valor de venda diminui para abaixo do custo de produção. Portanto, os produtores procuram alternativas para comercializar o excesso da produção, buscando a lucratividade. Isto pode ser conseguido através da elaboração de um novo produto, que seja estável e para o qual exista demanda durante todo o ano (MURATORE et al., 2008). Assim, a desidratação parcial do tomate possibilita agregar valor ao produto com um gasto energético menor, quando comparado com a secagem até menores umidades finais, já que o tempo de secagem é diminuído devido à menor quantidade de água a ser removida. Além desta vantagem, o tomate parcialmente desidratado tem agradado o consumidor, o que se comprova a partir de estudos sensoriais que avaliaram a aparência, a textura, o aroma, o sabor e a qualidade total, sendo que os melhores resultados sensoriais foram selecionados para umidade próxima a 70% (base úmida) (SILVA FILHO et al., 2007).

A comercialização dos tomates parcialmente desidratados efetua-se na forma de conservas e também de tomate seco triturado. A forma em conserva tem apresentado maior preferência pelo consumidor, sendo utilizada como aperitivo e cobertura de pizzas,

e agregada a massas diversas. A aparência de tais produtos, entretanto, não é atrativa, geralmente com cor castanho-escuro ou preto, em função principalmente do processo de desidratação a altas temperaturas e/ou longo tempo de processo de secagem, uma vez que o tomate *in natura* é um produto com alto teor de umidade, em torno de 95% em base úmida (SILVA FILHO et al., 2007).

2.1 Curva de secagem e cinética de secagem

Na secagem de um material sólido em contato com gás, a uma dada umidade e determinada temperatura, normalmente há um comportamento que pode ser tomado como padrão, conforme relatado a seguir. Elaborando-se um gráfico de umidade em função do tempo, durante o processo de secagem, obtém-se, para muitos materiais, uma curva de secagem que apresenta geralmente duas etapas principais: uma de taxa de secagem constante e outra, decrescente (CAMARGO, 2005). Contudo, materiais, como alguns biológicos, apresentam somente a taxa de secagem decrescente.

Um método apropriado para representar o comportamento fenomenológico da secagem considera a variação da taxa de secagem, expressa pela taxa de secagem (W_d), em (kg de água/m².s), em função da umidade do sólido em base seca. Para materiais biológicos, a secagem apresenta dois períodos distintos, de taxa de secagem constante e outra decrescente, o que é verificado na representação da taxa de secagem em função da umidade [$W_d=f(X)$], em que X é a umidade absoluta do sólido (kg de água/kg de sólido seco). A taxa de secagem do sólido é determinada a partir dos dados experimentais de cinética de secagem, sendo a derivada da umidade em função do tempo (dX/dt), locada em função da umidade em cada ponto da curva de secagem (SFREDO, 2006).

3 Material e métodos

3.1 Matéria-prima utilizada

A matéria-prima utilizada para estudo foi o tomate-cereja ovalado (*Lycopersicum sp. Mill.*), adquirido no CEASA/Uberlândia-MG. Os tomates utilizados nos experimentos estavam maduros e o critério de seleção adotado foi apresentar cor vermelha típica e sem nenhum dano mecânico. Antes da secagem dos tomates, efetuou-se uma seleção dos tomates, eliminando-se os que apresentavam danos mecânicos na superfície. Seguiu-se o corte dos frutos em duas metades, as quais foram usadas para o estudo de secagem.

3.2 Caracterização do tomate *in natura*

A caracterização dos frutos foi relacionada à distribuição granulométrica dos frutos. Para representar

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

a distribuição granulométrica, utilizou-se, como dimensão característica da partícula (tomate-cereja), o diâmetro da esfera de igual volume do tomate (D_v) (SMITH, 2003).

Os frutos de uma caixa de tomate-cereja foram dispostos sobre uma superfície plana e efetuaram-se quarteamentos até obtenção de uma amostra da população de 70 tomates, os quais tiveram seu volume mensurado, individualmente, usando o resultado do deslocamento volumétrico da água contida em uma proveta graduada de 100 mL.

O diâmetro característico (D_v) do tomate foi determinado usando a Equação 1, que relaciona o volume da partícula medida experimentalmente com o diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula (D_v).

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_v}{2} \right)^3 = \frac{\pi}{6} D_v^3 \Rightarrow D_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1)$$

Os resultados obtidos foram ajustados ao modelo RRB (Rosin-Rameler Bennet), que melhor se ajustou para a distribuição cumulativa das partículas de tomate, com a finalidade de quantificar o diâmetro médio de Sauter.

3.3 Determinação da massa específica dos frutos

Para determinação da massa específica média dos frutos, foram amostrados dez tomates aleatoriamente, daqueles provenientes do quarteamento e usados, previamente, para quantificar o diâmetro característico. Seguiu-se o seguinte procedimento:

Quantificação da massa de cada tomate

Medição do volume dos frutos em proveta graduada de 100 mL, a partir do deslocamento de água. Dividindo-se a massa pelo volume, obtém-se a massa específica média dos tomates (ρ_m). A umidade média inicial dos frutos de tomate foi de 94,01% (bu), obtida com amostras quarteadas e dispostas no interior de estufa à temperatura de 105 °C até massa constante.

3.4 Amostragem dos frutos

Partículas marcadas (tomates) foram dispostas em cesta de polietileno flexível e foram seccionadas em duas metades na direção radial, perpendicularmente ao eixo de maior comprimento de cada fruto. Os tomates marcados foram selecionados com diâmetros iguais ao diâmetro médio de Sauter, Equação 2, correspondendo, assim, ao diâmetro médio dos frutos de tomate. Na Equação 2, \bar{D} representa o diâmetro médio de Sauter, Δx_i a fração de partículas em um determinado intervalo de tamanho e D_i o diâmetro médio de cada intervalo de diâmetro estipulado.

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{D_i}} \quad (2)$$

O diâmetro médio de Sauter foi transformado para o equivalente em massa (m_{eq}) da seguinte forma:

- Com a distribuição granulométrica, foi calculado o diâmetro médio de Sauter (\bar{D});
- Substituindo, na Equação 1, D_v pelo diâmetro médio de Sauter (\bar{D}), calcula-se o volume equivalente ao diâmetro médio de Sauter (V_{eq});
- Multiplicando a massa específica média dos frutos (ρ_m) pelo volume equivalente ao diâmetro médio de Sauter (V_{eq}), encontra-se o equivalente em massa ao fruto com diâmetro médio de Sauter (m_{eq}), representado na Equação 3.

$$m_{eq} = \rho_m V_{eq} \quad (3)$$

Com a equivalência em massa que representa o diâmetro médio de Sauter, a amostragem para aquisição dos dados cinéticos se dava pelo acompanhamento da massa dos frutos em intervalos de tempo sucessivos. Para identificar os tomates a serem amostrados, foram confeccionadas cinco cestas de polietileno, sendo uma delas mostrada na Figura 1. Cada cesta acomodava duas metades de um tomate. As metades dos tomates seccionadas foram dispostas nas cestas com as partes planas do corte voltadas, uma para cima e a outra para baixo, conforme a Figura 1, objetivando contemplar as duas possibilidades de acomodação das seções dos tomates nas bandejas, considerando-se que a disposição das fatias influencia na secagem.

3.5 Procedimento operacional do secador

Foi utilizado um secador de bandejas vibradas com reciclo, com escoamento ascendente do ar de secagem no túnel de secagem, com possibilidades de efetuar controle de vazão e temperatura do ar, conforme visto na Figura 2 (LOURENÇO, 2011).

O secador consiste basicamente de quatro seções: túnel vertical de secagem; sistema de vibração; sistema de injeção de ar aquecido no túnel de secagem, e sistema de reciclo dos tomates. O túnel de secagem



Figura 1. Cesta de amostragem mostrando a disposição das metades dos tomates.

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

contém quatro bandejas perfuradas por onde escoavam os frutos de tomate e o ar, em fluxo cruzado (SFREDO e REZENDE, 2008).

Anteriormente à alimentação dos frutos no secador, a temperatura, a vazão de ar e a quantidade de tomate alimentada foram ajustadas em 67,6 °C, 6 kg/min e 4,025 kg, respectivamente, baseado nos resultados de otimização estudados por Lourenço (2011). Na partida do secador, efetuou-se a seguinte sistemática: os tomates foram alimentados no topo do secador, vagarosamente, de maneira a preencher a área da seção transversal da primeira bandeja, estando acionado o vibrador do alimentador vibratório (1) no topo do leito. Neste momento, acionava-se o vibrador da primeira bandeja de secagem. Os tomates escoavam da primeira para a segunda bandeja e, quando os tomates ocupavam a área da seção transversal da segunda bandeja, acionava-se o vibrador daquela bandeja e outros tomates eram alimentados da mesma maneira que a primeira bandeja. Na sequência, os tomates da segunda bandeja escoavam para a terceira bandeja. E assim, sucessivamente, até que as quatro bandejas estivessem em operação. As condições vibracionais foram: frequência de 60 Hz e amplitude de

vibração de 1 mm. Esta amplitude, inicialmente, não proporcionava o escoamento dos tomates de um estágio para o outro. Isso só ocorria quando o conteúdo de umidade do tomate se tornava menor e com auxílio de arrasto das partículas por esferas de porcelana, o que será relatado na sequência. Assim, em uma etapa inicial, a operação ocorreu em batelada e leito fixo vibrado.

No início da etapa inicial, a primeira bandeja (topo) do secador encontrava-se a uma temperatura menor do que a segunda e, assim, sucessivamente, até a quarta. Efetuou-se uma mudança na posição das bandejas a cada 30 minutos para que a umidade dos tomates após a fase de secagem inicial em batelada (sem recirculação) fosse homogênea. A mudança da posição dos frutos nas bandejas se deu de forma manual, com auxílio do aumento da vibração para forçar o escoamento das partículas. Os frutos da bandeja 4 eram transferidos para a bandeja 1; os da bandeja 1 para a bandeja 2; da bandeja 2 para a 3, e da bandeja 3 para a 4.

Quando os frutos atingiam a umidade em base seca de 6 kg de água/kg de massa seca (quantificada por medida da massa das partículas marcadas, as quais, após medidas, retornavam para o secador), foram adicionadas esferas de porcelana. Observe-se que, inicialmente, o conteúdo de água em base seca dos tomates era de 15,69 kg de água/kg de massa seca. Quarenta esferas de porcelana de 0,0212 m a 0,0253 m de diâmetro, com diâmetro médio aritmético de 0,023 m (Figura 3), eram alimentadas no secador e a amplitude de vibração das bandejas era ajustada em 5 mm (condição obtida em testes preliminares), o que possibilitou o escoamento das esferas e dos tomates seccionados, e permitiu a realização da segunda etapa de secagem, operando em batelada com recirculação dos tomates. Quando a umidade do tomate era superior a 6 kg de água/kg de massa seca, ocorria desagregação dos tomates durante o escoamento. Portanto, a diminuição da umidade das partículas possibilitou que se aumentasse a rigidez do tomate.

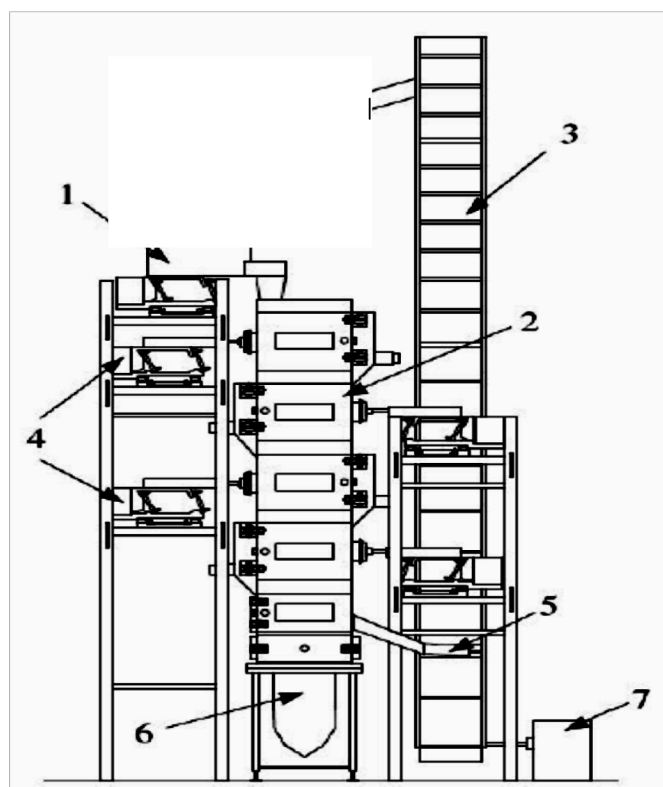


Figura 2. Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal). 1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4 vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos frutos de tomate; 6: tubulação de ar; 7: motorreductor (Adaptado SFREDO e REZENDE, 2008).



Figura 3. Esferas de Porcelana.

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

Foram planejadas, portanto, duas etapas no processo de secagem do tomate neste secador. A primeira, com regime batelada sem recirculação, em que os tomates secavam até se atingir a umidade de 6 kg de água/kg de massa seca ou 85,71% de umidade em base úmida. Então, alimentavam-se esferas de porcelana que possibilitavam o escoamento dos tomates no secador, consistindo na segunda etapa, sendo esse processo denominado batelada com recirculação. Essa etapa permanecia até atingir-se 15% da água inicial, ou seja, 70,18% de umidade em base úmida ou 2,35 kg de água/kg de massa seca.

4 Resultados

A distribuição de frequência e a distribuição cumulativa dos tomates estão representadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente, sendo D_v a dimensão característica dos frutos que, neste trabalho, é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, e x (%) a porcentagem das partículas com diâmetro menor que D_v . A densidade do tomate *in natura* foi de 1.090 kg/m³. A Distribuição Cumulativa dos tomates e a Distribuição de Frequência (Figuras 4 e 5) mostram que 100% dos tomates possuem tamanho menor do que 3,2 cm e que não existem tomates com tamanhos menores do que 1,6 cm. A curva da Figura 4 representa a variação contínua da frequência em função da dimensão característica dos frutos de tomate.

O modelo RRB (Rosin-Rameler Bennet) foi ajustado para a distribuição cumulativa das partículas de tomate. A Equação 4, que representa o modelo, contém dois parâmetros, d e n , e foram determinados pela regressão não linear dos dados que compõem a distribuição cumulativa, com o auxílio do *software* STATISTICA 7.0 - StatSoft®.

$$x = 1 - e^{-\left(\frac{D_v}{d}\right)^n} \quad (4)$$

O coeficiente de correlação do ajuste do modelo foi de 99,31% para um nível de significância $\alpha = 0,05$; os valores dos parâmetros encontrados estão dispostos na Tabela 1.

A distribuição dos resíduos mostrada na Figura 6 não segue nenhuma tendência, o que garante a ausência de erro sistemático nos experimentos e a interferência no ajuste do modelo; portanto, há segurança do resultado apresentado. A boa correlação do modelo pode ser verificada na Figura 7, que dispõe os valores preditos pelo modelo e os valores encontrados experimentalmente.

O diâmetro médio das partículas de tomates amostrados foi de 0,0232 m, obtido com a Equação 2.

Segundo o trabalho de Lourenço (2011), usando planejamento de experimentos, as condições de operação otimizadas do secador, em que se verificou o máximo de processamento diário de tomate, foram usadas na desidratação parcial de tomate-cereja, até que os frutos atingissem 15% do conteúdo de água inicial, o que corresponde a 70,18% de umidade em base úmida ou 2,35 kg de água/kg de massa seca. As condições experimentais foram temperatura e vazão do ar de secagem de 67,6 °C e 6 kg/min, respectivamente, sendo a quantidade de tomate alimentado por batelada de 4,025 kg. A curva de secagem esta representada na Figura 8.

Tabela 1. Parâmetros do modelo RRB.

| d (cm) | n |
|----------|------|
| 2,50 | 9,99 |

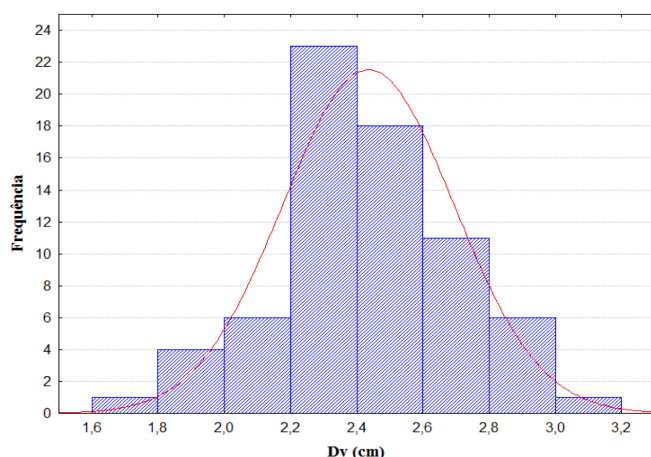


Figura 4. Distribuição de Frequência dos tomates amostrados.

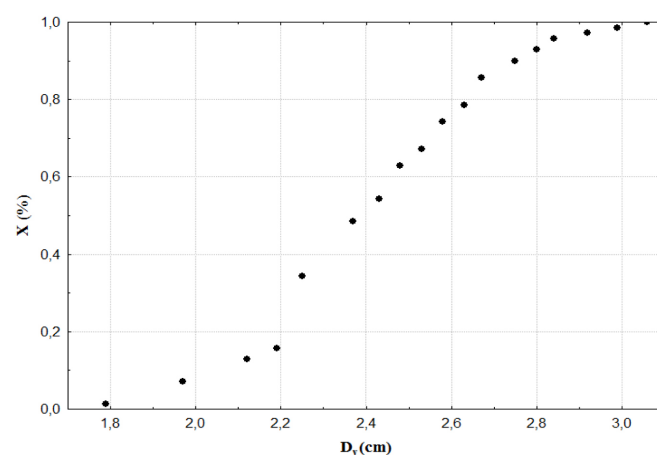


Figura 5. Distribuição Cumulativa dos tomates amostrados.

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

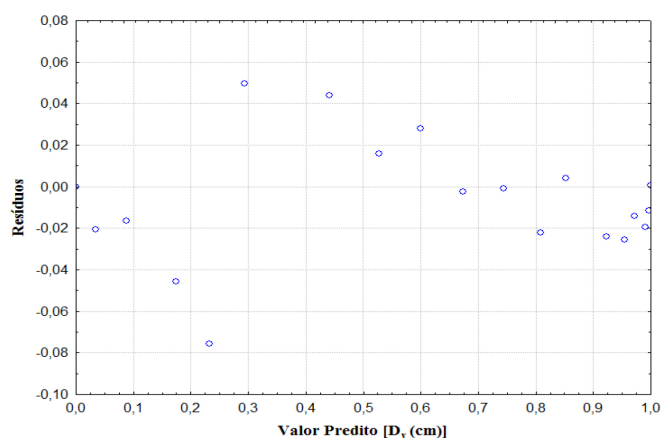


Figura 6. Distribuição de Resíduos.

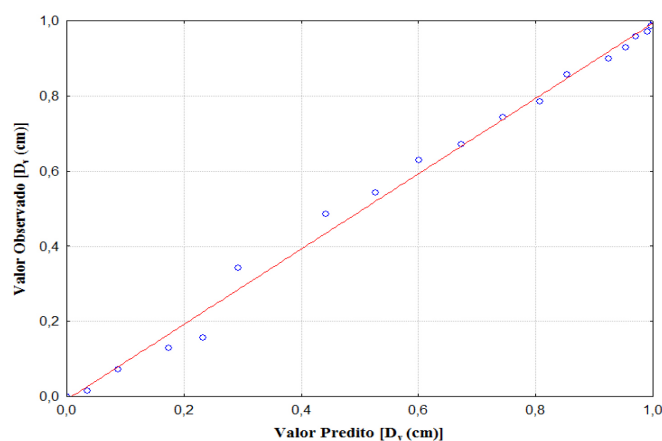


Figura 7. Comparação dos valores do modelo com os valores experimentais.

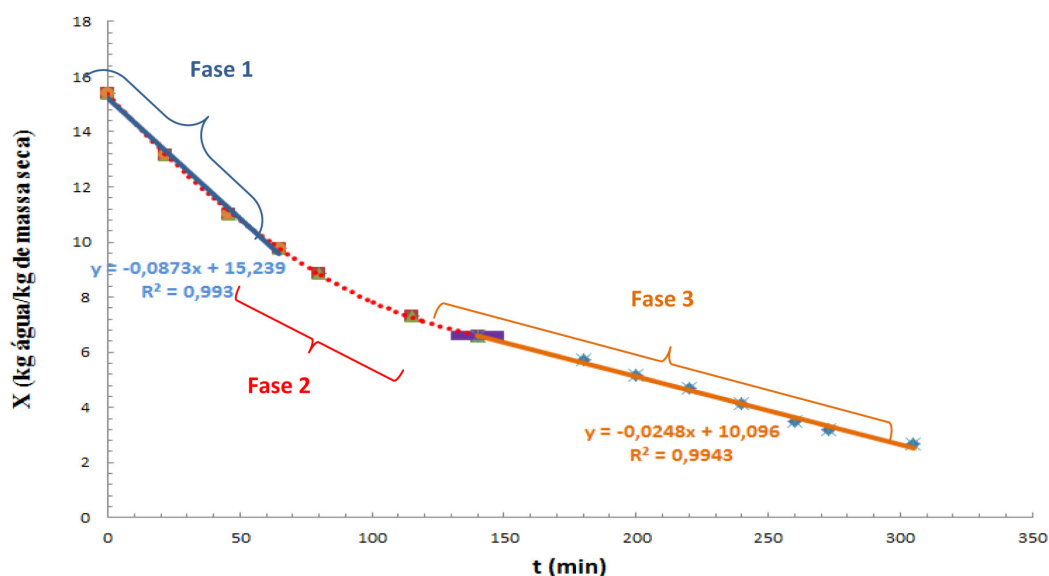


Figura 8. Dados de secagem para as condições de operação otimizadas: temperatura e vazão do ar de secagem de 67,6 °C e 6 kg/min, respectivamente.

Verifica-se, na análise da curva de secagem da Figura 8, que existem três regiões de secagem com comportamento distinto, descritas como Fase 1, Fase 2 e Fase 3. Na Fase 1 e na Fase 3, a secagem ocorre com taxa constante, pois os pontos experimentais se ajustam a uma linha reta, o que é mostrado por meio das duas retas que correspondem às duas fases. Essas informações estão, também, disponibilizadas na Figura 9, que fornece a visão abrangente do comportamento na secagem.

Como o secador opera inicialmente em batelada, sem ocorrência de reciclo, verifica-se que, durante a fase denominada Fase 1, em que o conteúdo de umidade do tomate é próximo do conteúdo de umidade inicial, a transferência de água para a superfície exposta ao ar de secagem é suficiente para manter a taxa de secagem constante, sendo o coeficiente angular da reta nesta

fase de 0,087 (kg de água/kg tomate seco · min). Ao final desta fase do processo, a concentração de umidade na superfície do sólido começa a diminuir e isto corresponde à condição em que a água contida nos poros ou células do tomate, e que se difunde para a superfície externa, por diferença de concentração e de pressão devido à contração do tomate, não é suficiente para manter a taxa de secagem constante. Segue-se, então, uma nova fase do processo, na qual ocorre a taxa de secagem variável, conforme fenomenologia clássica de secagem (TREYBAL, 1981).

Nesta fase em que a taxa de secagem se torna decrescente, denominada Fase 2, o secador ainda opera em batelada sem recirculação, já que o tomate tinha muita umidade e isto impedia seu escoamento, além de a temperatura atingida pelos frutos na secagem

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

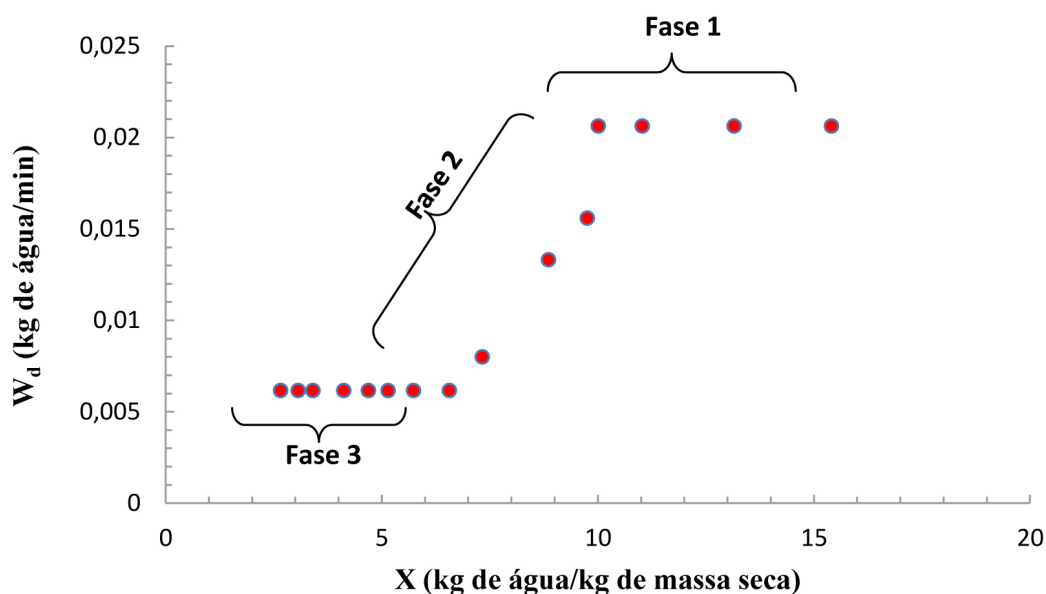


Figura 9. Curva da taxa de secagem. Condições experimentais: temperatura e vazão do ar de secagem de 67,6 °C e 6 kg/min, respectivamente.

fazer com que a estrutura física do fruto se tornasse frágil e pegajosa. Nesta fase, o leito fica compactado, aumentando a densidade aparente (*bulk*) e diminuindo a porosidade.

Objetivando viabilizar o escoamento, foi verificado experimentalmente que existia uma condição em que o escoamento de esferas de porcelana no leito dava-se sob influência vibracional e proporcionava o escoamento do leito de partículas de tomate sem fragmentação das partículas, por estas estarem um tanto firmes com a diminuição do conteúdo de umidade na Fase 1. Isto possibilita aumento da superfície de contato na percolação do ar de secagem através do leito, pois o meio se torna mais permeável ao ar de secagem com o movimento dos sólidos; além disso, existe a influência da deformação das partículas e a aplicação de compressão pelo arrasto das esferas, o que provoca deslocamento de água pela aplicação de pressão, como nas moendas no processamento de cana-de-açúcar.

Quando as esferas de porcelana eram alimentadas no secador e os frutos continham muita água, esta ação promovia fragmentação das partículas. Para suprimir este efeito, foi estudado o comportamento da estrutura física do fruto para que não fosse fragmentado, o que correspondia à condição de umidade do tomate em que esferas inertes de porcelana foram alimentadas no leito.

A secagem foi monitorada com os tomates amostrados nas cinco cestas, que consistiam de tomates com o diâmetro médio inicial de Sauter. Verificou-se que, quando os tomates atingiam a umidade em base seca de aproximadamente 6 kg de água/kg de massa seca, o escoamento acontecia adequadamente com a adição das

esferas. A utilização de vibrações mecânicas para o fim de melhorar a transferência de calor e massa proporciona um escoamento mais uniforme e brando de materiais aglomerados e, conseqüentemente, elimina zonas mortas no equipamento, resultando em uma operação mais higiênica para produtos alimentares, com a redução do risco de crescimento de microrganismos (FINZER et al., 2013). O uso de vibração após diminuição parcial da umidade do tomate possibilitou o escoamento do tomate fatiado. O uso das esferas possibilitou o escoamento das partículas de tomate por arrasto. Não se quantificaram danos mecânicos durante o escoamento; contudo, a deformação das partículas por ação da compressão pelas esferas influenciou no aumento da taxa de secagem do tomate. Com o escoamento dos tomates, a aplicação de esforços de compressão pelas esferas e a recirculação, caracterizou-se, então, a terceira fase de secagem, a Fase 3 (Figura 8), a qual novamente ocorreu à taxa constante.

A explicação plausível para ocorrência da segunda taxa de secagem constante se deve a três influências principais: 1) enquanto o tomate está fora do secador, durante o reciclo, a água dos poros migra por difusão para a superfície, devido à diferença de concentração; 2) As esferas de porcelana contribuem bastante para a deformação dos tomates e os frutos ficam submetidos à compressão, e o processo de escoamento de água (com solúveis dissolvidos), por mecanismo de transferência de quantidade de movimento, se sobrepõe ao processo difusivo; 3) a contração do tomate com a perda de água também exerce compressão sobre a solução aquosa contida no tomate. Como resultado, a secagem do tomate, durante a terceira fase, ocorreu à taxa constante. Na

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

literatura, o termo 'taxa de compressão' é usado para quantificar o fenômeno de transferência de quantidade de movimento na compressão. Para contextualizar, nas usinas de açúcar, existem duas técnicas alternativas para extração do caldo das fibras da cana: 1) moagem, em que se aplica o conceito de compressão, e 2) difusão, em que se aplicam conceitos de transferência de massa. Dá-se, então, origem a dois tipos de equipamentos industriais: a) moenda e b) difusor (REIN, 2007). No estudo atual, na secagem do tomate, os dois efeitos influenciam na secagem do tomate.

A curva de taxa de secagem foi obtida de derivadas em pontos da curva de secagem (Figura 8) e, com os resultados, elaborou-se a curva para taxa de secagem. A Figura 9 consiste na curva da taxa de secagem do tomate em função da umidade em base seca, que possibilitou identificar as três fases de secagem.

O tempo total para secagem de tomate-cereja no secador de bandejas vibradas com reciclo foi de 305 min, possibilitando uma capacidade de processamento diário na unidade experimental de 19,00 kg de tomate/dia, o que corresponde a 0,16 kg tomate seco/h (umidade de 2,35 kg água/kg sólido seco).

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com Muratore et al. (2008), que estudaram a desidratação parcial de tomate-cereja, obtendo um produto com 25% do conteúdo de água inicial, para a temperatura de 40, 60 e 80 °C em estufa de ar forçado G-Therm 075, o tempo gasto para desidratação parcial do tomate-cereja cortado ao meio longitudinalmente, sem

nenhum pré-tratamento, à temperatura do ar de 80 °C, foi de 4 horas; para 60 °C, de 9 horas, e a 40 °C, de 29 horas. No presente trabalho, para obter a mesma umidade final, a desidratação parcial do tomate-cereja durou 4,16 horas com a temperatura de secagem em 67,6 °C; para 60 °C, em torno de 4,7 horas, e para 52,4 °C, próximo de 8,4 horas, sendo a vazão mássica do ar 6 kg/min. Para outros detalhes, consultar Lourenço (2011). Conclui-se que o escoamento, a vibração do leito e a aplicação de compressão pelas esferas contribuíram, apreciavelmente, para diminuir o tempo de secagem. Para exemplificar, na temperatura do ar de 60 °C, o tempo de secagem se reduz em cerca de 48%.

Para quantificar o efeito da vibração no tempo de secagem, foram realizados dois experimentos com vibração sem recirculação (leito vibrado) e sem vibração (leito fixo), sendo que, nestes experimentos, não foram adicionadas esferas de porcelana no leito. Somente a quarta bandeja do secador foi utilizada para manter constantes as condições de secagem, pois ocorre modificação das condições psicrométricas do ar ao longo das outras bandejas. A quantidade de tomate utilizada foi de 25% da condição otimizada, dividindo por quatro bandejas a capacidade do secador, e obtendo-se 1,01 kg. A capacidade otimizada do secador está relacionada com o escoamento das partículas sem ocorrência de estagnação em determinados locais do secador.

A Figura 10 mostra dados de secagem para sistema vibrado e sem vibração e a Figura 11, as taxas de secagem.

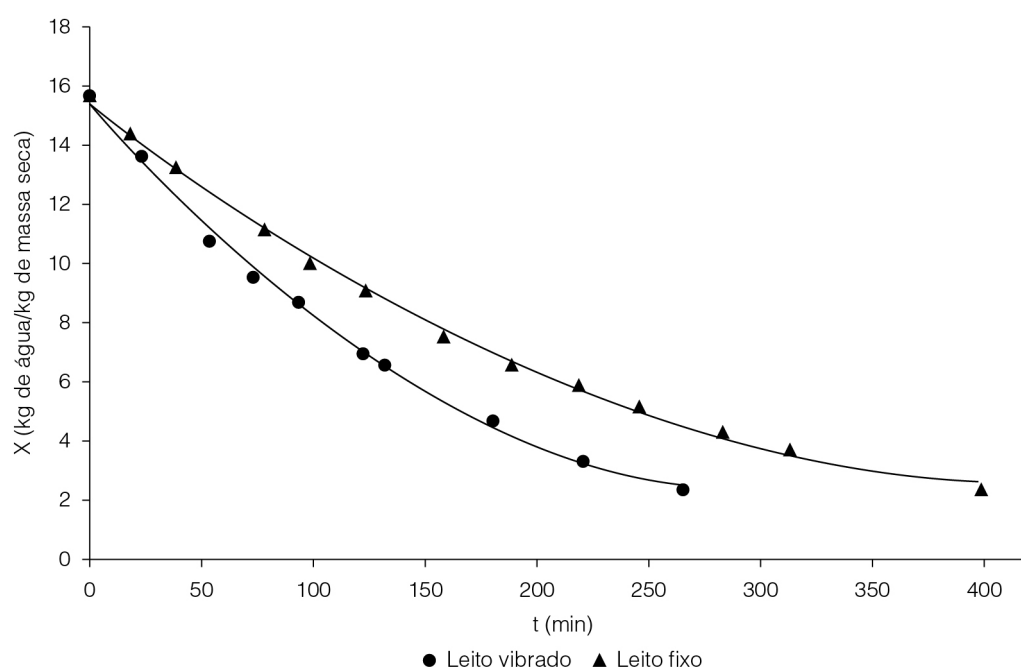


Figura 10. Curvas de secagem em leito fixo e leito vibrado (sem esferas de porcelana no leito).

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

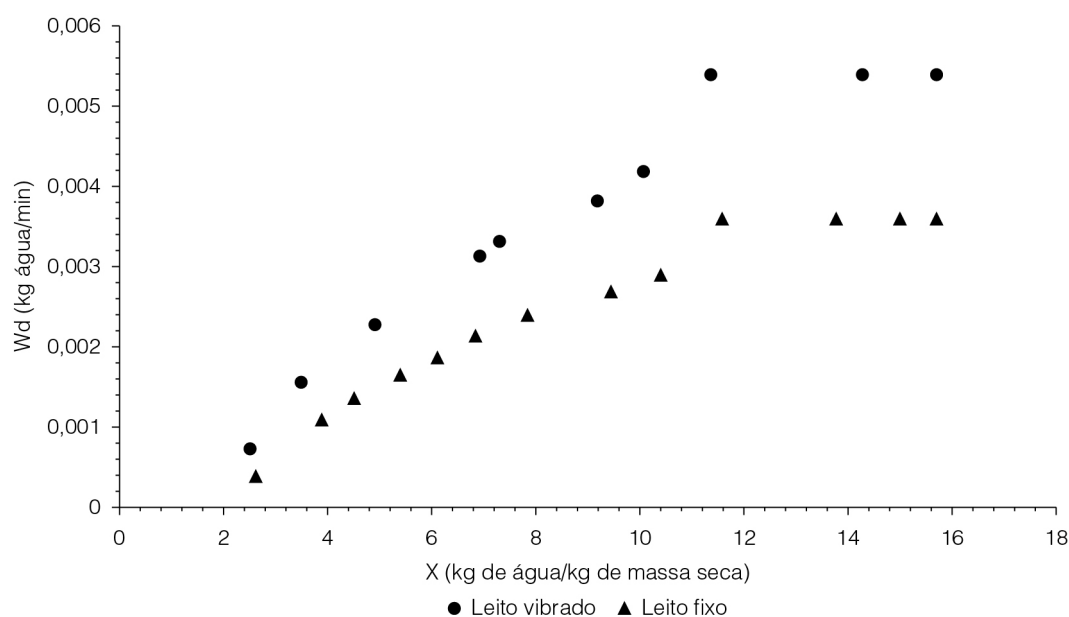


Figura 11. Curvas de taxa de secagem entre leito fixo e leito vibrado (sem esferas de porcelana no leito).

A análise da Figura 10 mostra que ocorre uma redução significativa no tempo de secagem do sistema vibrado. Enquanto para o sistema vibrado, necessitou-se de 275 min, operando, para o sistema sem vibração, o tempo gasto foi de 390 min, para se alcançar a umidade final do tomate de 70,18%, possibilitando uma redução no tempo de secagem de aproximadamente 30%. O leito vibrado possibilita redução da espessura da camada-limite em torno das partículas, além, também, de um efeito de mistura, o que propicia a redução do tempo de secagem.

Fica nítida a importância da vibração no processo de secagem, pois, além de contribuir para o escoamento durante a Fase 3 do processo, reduz o tempo de secagem, influenciando no consumo de energia térmica do processo.

Analisando-se a Figura 11, verifica-se que a taxa de secagem inicial, que é constante, foi de 0,0054 kg de água/min para o sistema vibrado e 0,0036 kg de água/min para o sistema sem vibração. Isso mostra que a vibração intensifica a transferência de calor e massa. Neste caso, as partículas, ao vibrarem, modificam a espessura da camada-limite em torno da partícula, aumentando o coeficiente convectivo de transferência de calor. Já no leito fixo, essas influências não acontecem e, como resultado, a taxa de secagem é menor durante toda a secagem (FINZER e KIECKBUSCH, 1992; FINZER et al., 2003).

A Figura 12 consiste em uma vista do tomate obtido ao final da secagem (umidade de 2,35 kg água/kg tomate seco). A contração de muitos materiais biológicos devido à secagem segue o modelo da secagem uniforme,



Figura 12. Aspecto do tomate parcialmente desidratado (LOURENÇO, 2011).

até que o conteúdo de umidade crítica seja alcançado (SUZUKI et al., 1976). Nesse modelo, a redução de volume devido à contração iguala o volume de água perdida durante a secagem. Esse modelo foi selecionado para o estudo da secagem do tomate em virtude da elevada umidade inicial dos frutos.

Usando-se o diâmetro da esfera (2,32 cm), de volume igual à média dos tomates, obtém-se o volume médio de um tomate de 6,54 cm³. Como a umidade inicial é 94,01% (bu) e, ao final, é 70,02 (bu), isso possibilita obter o volume final de um tomate: 1,31 cm³. Portanto, a contração do tomate devido à secagem foi de 80%.

A superfície específica do tomate pode ser quantificada pela Equação 5 (McCABE et al., 2005).

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

$$A_m = \frac{6}{\Psi \cdot \rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_{s_i}} \quad (5)$$

Em que: Ψ = esfericidade das partículas; ρ_p = massa específica; x_i = fração mássica; d_{s_i} = diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula.

Aplicando-se a equação para os tomates *in natura*, sendo a esfericidade destes praticamente igual à unidade, obtém-se $A_{m\text{ inicial}} = 0,24 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Para o cálculo da superfície específica do produto, necessita-se quantificar a esfericidade do tomate seco, usando a Equação 6:

$$\Psi = \frac{\text{Área da superfície da esfera de mesmo volume que a partícula}}{\text{Área da superfície da partícula}} \quad (6)$$

Efetuando-se o cálculo do diâmetro médio do tomate seco, usando 20 partículas por quarteamento do produto final, obteve-se $2,6 \pm 0,3 \text{ cm}$. A área de uma partícula, estimada como se fosse um cilindro com o diâmetro médio, é igual a $10,6 \text{ cm}^2$. Com o volume final de um tomate ($1,31 \text{ cm}^3$), obtém-se o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula e, com o diâmetro, a área da esfera de mesmo volume é quantificada em $5,64 \text{ cm}^2$. A esfericidade do tomate seco é quantificada ao usar a Equação 6, obtendo-se $\Psi = 0,53$. Por balanço de massa, a massa específica do tomate seco é quantificada, sendo 1.450 kg/m^3 . Usando, novamente, a Equação 5, se obtém a superfície específica do tomate seco, $A_{m\text{ final}} = 0,58 \text{ m}^2/\text{kg}$. Observa-se que a superfície específica do tomate seco é 146% maior do que a do tomate *in natura*.

5 Conclusão

Na desidratação parcial do tomate-cereja, em secador de bandejas vibradas com reciclo, foram observadas duas regiões com taxa de secagem constante. A primeira, denominada Fase 1, foi operada em batelada sem recirculação, e a segunda, denominada Fase 3, foi operada em batelada com recirculação, sob vibração e atuação de arrasto por esferas de porcelana. A alimentação das esferas de porcelana atuou na deformação do fruto, favorecendo o transporte da água do interior do fruto para a superfície, por compressão. Além disso, existe um aumento da área superficial específica durante o processo de encolhimento, passando de $0,237 \text{ m}^2/\text{kg}$, no início da Fase 1, para $0,583 \text{ m}^2/\text{kg}$, ao final da Fase 3; observe-se, ainda, o tempo de descanso do fruto durante a operação em batelada com recirculação, quando o fruto está sendo transportado pela esteira de reciclo, que contribui, provavelmente, para a segunda taxa de secagem constante, na Fase 3. A contração do tomate na secagem foi de 80%, o que fez com que

o diâmetro médio das partículas, inicialmente de $2,32 \text{ cm}$, se modificasse para $1,34 \text{ cm}$, no final da secagem. A esfericidade do tomate também variou da unidade (início da secagem) para $0,53$, ao final da secagem. O escoamento, a vibração do leito e a aplicação de compressão pelas esferas contribuíram, apreciavelmente, para diminuir o tempo de secagem. Para exemplificar, na temperatura do ar de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, o tempo de secagem se reduz em cerca de 30%, quando comparado com o tempo de secagem em leito estático. Este trabalho possibilitou identificar a influência da compressão sobre as partículas processadas na taxa de secagem, o que consiste em um mecanismo de transferência de quantidade de movimento sobreposto à difusão de umidade do interior de partículas de tomate para a superfície.

Referências

- CAMARGO, G. A. **Novas Tecnologias e Pré-tratamento: Tomate Seco Embalado a Vácuo**. 2005. 175 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- FINZER, J. R. D.; BARROZO, M. A. S.; MALAGONI, R. A.; TEIXEIRA, G. A. Crystallization in vibrofluidized beds. In: PASSOS, M. L.; BARROZO, M. A. S.; MUJUMDAR, A. S. **Fluidization Engineering – Practice**. Quebec: Laval University, 2013. chapt. 4, p. 120-174.
- FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Secagem em sistemas com vibração. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**. São Carlos: UFSCar, 1992. cap. 3, p. 87-127.
- FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R.; FREITAS, A. O.; LIMAVERDE JÚNIOR, J. R.; SFREDO, M. A. Drying of coffee berries in a vibrated tray dryer operated with solids recycle and single-stage. **Journal of Food Process Engineering**, College Station, v. 26, n. 2, p. 207-222, 2003. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.2003.tb00597.x>
- LOURENÇO, G. A. **Desidratação Parcial de Tomate Cereja em Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 6th ed. Boston: McGraw-Hill, 2005. 1140 p.
- MURATORE, G.; RIZZO, V.; LICCIARDELLO, F.; MACCARONE, E. Partial dehydration of cherry tomato at different temperature, and nutritional quality of the products. **Food Chemistry**, Barking, v. 111, n. 4, p. 887-891, 2008.
- PORTO, P. S. S.; PINTO, L. A. A. Estudo das características da secagem de cebola (*Allium cepa* L.) descarte quanto à cor e à pungência. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 73-78, 2002.

Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo

LOURENÇO, G. A. e FINZER, J. R. D.

- REIN, P. **Cane Sugar Engineering**. Berlin: Verlag, 2007. 768 p.
- ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 6, n. 1, p. 69-76, 2003.
- SANTOS, E. M. **Secagem de Tomates Inteiros Submetidos a Descascamento Químico**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos)-Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2008.
- SILVA FILHO, E. D.; COELHO, M. I. S.; SANTANA, M. L. Desidratação osmótica do tomate (*Lycopersicon esculentum*) seguida de secagem. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 2., 2007, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2007. p. 1 -5.
- SFREDO, M. A. **Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas**. 2006. 319 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- SFREDO, M. A.; REZENDE, D. R. Adimensionais na secagem de frutos de café em secador de bandejas vibradas. **FAZU em Revista**, Uberaba, n. 5, p. 73-78, 2008.
- SMITH, P. G. **Introduction to Food Process Engineering**. New York: Kluwer Academic, 2003. 466 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-0201-2>
- SUZUKI, K., KUBOTA, K., HASEGAWA, T., HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, Raleigh, v. 41, n. 5, p. 1189-1193, 1976.
- TREYBAL, R. E. **Mass-transfer Operations**. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1981. 784 p.