

SECAGEM DE PASTA ALIMENTÍCIA EM LEITO DE JORRO: AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ENERGÉTICOS E PRODUÇÃO

M. B. BRAGA^{1*}, S. C. S. ROCHA¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Processos

*e-mail: matheus19braga@yahoo.com.br

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi analisar o processo de secagem da pasta leite reconstituído-polpa de amora (25%: 75% (V/V)) em leite de jorro cônico-cilíndrico, em termos de eficiência de produção de pó, consumo específico de energia, eficiência térmica e umidade do pó. Constatou-se que o tipo e as características físicas do inerte (poliestireno e polipropileno), a vazão de alimentação e o modo de alimentação da pasta (atomização ou gotejamento), influenciaram os parâmetros de desempenho do processo. Os melhores resultados de produção de pó foram obtidos quando se empregou o poliestireno como inerte, a menor vazão de alimentação (0,12 kg/h) e o modo de alimentação por gotejamento; entretanto, tais condições resultaram em altos valores de consumo específico de energia. Todavia, a quantidade de energia térmica fornecida ao sistema de secagem pode ser consideravelmente reduzida a partir da desumidificação e recirculação do ar de saída do leito.

1 INTRODUÇÃO

A secagem de pastas em leito de jorro ocorre na presença de partículas inertes, que agem tanto como um suporte para as pastas, como uma fonte de calor para a secagem. Neste processo, a pasta empregada pode ser atomizada através de um bico atomizador de simples ou duplo fluido ou gotejada sobre o leito móvel de partículas (FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2011; BRAGA e ROCHA, 2013).

Durante o processo de secagem, o leito se torna molhado e a pasta recobre gradativamente a superfície dos inertes formando uma fina camada de material. O filme sobre a superfície do inerte é seco devido à transferência de calor da própria partícula (condução) e convectivamente a partir do ar quente que entra no leito. O

recobrimento atinge um nível crítico a partir do qual o filme é removido da superfície do inerte, na forma de pó, devido ao atrito entre os mesmos e com a parede do leito (BARRET e FANE, 1990; FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2011; OCHOA-MARTINEZ, BRENNAN e NIRANJAN, 1993; ROCHA e TARANTO, 2008).

A medida em que o leito é alimentado continuamente, os estágios de formação do filme, secagem, fratura do filme e elutriação ocorrem simultaneamente. Na prática, a taxa de produção e remoção do pó deve ser sempre maior ou igual a taxa de alimentação da pasta, evitando a aglomeração e acumulação de material no leito (BARRET e FANE, 1990; FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2011; PHAM, 1983).

A secagem de materiais termo sensíveis em leito de jorro tem sido estudada com foco

na fluidodinâmica do leito e nos parâmetros operacionais relacionando-os aos parâmetros de eficiência e qualidade do processo e do produto. A qualidade do pó pode ser qualificada pelo sabor, textura e cor e determinada por uma ampla gama de métodos disponíveis na literatura, todavia, está submetida à aceitação dos consumidores (BENALI e AMAZOUZ, 2006).

A secagem pode representar uma significativa fração do consumo de energia de um processo, dependendo do tipo de indústria e da tecnologia empregada. Na produção de materiais provenientes da madeira, por exemplo, a energia requerida para a secagem pode chegar a 70% da energia total do processamento. Além disso, tanto os processos de secagem de *commodities* e materiais de baixo custo como os processos de secagem de materiais com alto valor agregado, requerem um baixo consumo de energia, evitando a elevação dos custos de produção (KUDRA, 2004). Portanto, o desafio reside na otimização das interações entre a eficiência energética, eficiência de produção e qualidade do produto.

Neste trabalho são apresentados resultados de desempenho do processo de secagem da pasta leite reconstituído-polpa de amora (25%: 75% (V/V)) (eficiência de produção de pó), dos aspectos energéticos (consumo específico de energia, eficiência térmica de secagem), e de umidade do pó para diferentes condições operacionais. Para a condição otimizada em relação à eficiência de produção de pó, são apresentadas as curvas de secagem e análise da evolução do processo (eficiência de obtenção de pó e massa de pó coletada em função do tempo de processo).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação da pasta

A polpa de amora preta *in natura* foi obtida a partir de frutas congeladas da marca DeMarchi (Jundiaí, São Paulo), seguindo o

procedimento: descongelamento das amoras; trituração das frutas; prensagem empregando filtro de pano; homogeneização; congelamento a -18 °C. A polpa não foi submetida a tratamento enzimático, sendo diretamente congelada. O período de armazenamento variou de 3 a 11 meses.

Empregou-se leite reconstituído como adjuvante nos processos de secagem da polpa de amora com intuito de aumentar a concentração de sólidos (diminuindo o conteúdo de água a ser evaporado) e melhorar o desempenho do processo (BRAGA e ROCHA, 2013; BRAGA, 2014; BRAGA e ROCHA, 2015). Para tanto, utilizou-se leite em pó da marca Nestlé (Ninho), seguindo o procedimento (para 100 g de pasta): 50 g de leite em pó; 50 g de água; mistura do leite em pó e da água.

A razão volumétrica da pasta empregada na secagem foi de 25% leite reconstituído: 75% polpa de amora *in natura*, tal formulação foi otimizada conforme Braga e Rocha (2014).

2.2 Caracterização física da pasta

A pasta leite reconstituído-polpa de amora (25%: 75%, V/V) foi caracterizada quanto à densidade e umidade. A densidade foi determinada por picnometria, em triplicata. A umidade da pasta foi determinada pelo método da estufa a 105 °C para secagem do solvente até peso constante, em triplicata.

2.3 Umidade do pó

A umidade do pó ($X_{pó}$) foi determinada a partir da secagem de 1 g das amostras em estufa a vácuo de 20 inHg por 24 horas à 70 °C, em duplicata.

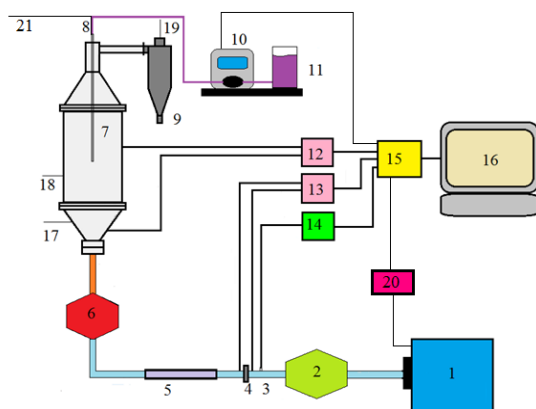
2.4 Sistema experimental e condições fixas de operação

Os ensaios de secagem foram conduzidos em leito de jorro do tipo cônico-cilíndrico construído em acrílico Plexiglas®, com as seguintes dimensões: diâmetro do

leito de 20 cm, altura da coluna cilíndrica de 30 cm, altura da base cônica de 14 cm, diâmetro do orifício de entrada do ar de 3 cm e ângulo de inclinação da base cônica de 60°. Na parte superior do leito de jorro foi conectado um ciclone *Lapple* em aço inox.

A Figura (1) apresenta o esquema do sistema experimental. O processo de secagem foi monitorado através do uso de instrumentos como termohigrômetros (Cole Parmer, com faixa de medida de 0,5 a 100% para umidade relativa e temperatura de 10 a 90 °C, precisão de $\pm 1,5$ e $\pm 0,2^\circ$, respectivamente), e termopar de cobre-constantan ligado ao controlador de temperatura.

Figura 1 - Esquema experimental



Esquema experimental: (1) soprador; (2) trocador de calor; (3) tomada de pressão estática; (4) tomada de pressão na placa de orifício; (5) leito de sílica gel; (6) aquecedor; (7) leito de jorro cônico-cilíndrico; (8) linha de alimentação da pasta; (9) ciclone *Lapple*; (10) bomba peristáltica; (11) pasta; (12 e 13) transdutores diferenciais; (14) transdutor absoluto; (15) sistema de aquisição de dados; (16) microcomputador; (17, 18 e 19) termohigrômetros; (20) inversor de frequência; (21) linha de ar comprimido.

Antecedendo este trabalho, realizaram-se caracterizações físicas dos inertes polipropileno PP (forma irregular) e poliestireno PS (forma lenticular) (diâmetro

de *Sauter* (d_p), densidade real (ρ_r) e esfericidade (Φ)), análises fluidodinâmicas (massa de inertes (M), vazão de jorro mínima (W_{jm}), vazão de ar de secagem (W_{ar}), e queda de pressão máxima (ΔP_{max})), além de testes preliminares de secagem. A partir dos resultados obtidos, estabeleceram-se as condições fixas de operação apresentadas na Tabela 1 (BRAGA e ROCHA, 2013).

Tabela 1 - Caracterizações físicas, parâmetros fluidodinâmicos e condições operacionais fixas empregadas nos processos de secagem.

| Inerte | PS | Des. | PP | Des. |
|-------------------------------|--------------------|------|--------------------|------|
| $d_p(\text{mm})^a$ | 5,19 | 0,26 | 3,14 | 0,18 |
| $\rho_r(\text{kg/m}^3)^b$ | 1060,0 | 0,6 | 907,8 | 0,5 |
| Φ^a | 0,90 | 0,07 | 0,74 | 0,06 |
| $M(\text{kg})$ | 1,4 | - | 1,4 | - |
| $W_{jm}(\text{kg/min})^b$ | 0,79 | 0,00 | 0,87 | 0,01 |
| $\Delta P_{max}(\text{Pa})^b$ | 1813 | 23 | 1371 | 18 |
| $W_{ar}(\text{kg/min})$ | $1,2 \cdot W_{jm}$ | - | $1,2 \cdot W_{jm}$ | - |

*Des.= desvio: ^adesvio padrão; ^bdesvio médio

A partir de testes preliminares, fixou-se a alimentação em 300 mL de pasta por Ensaio com o objetivo de operar em regime permanente de obtenção de pó, atenuando assim, a influência da variação inicial da obtenção de material sólido adicionado ao leito.

2.5 Ensaios de secagem

Os processos de secagem foram iniciados somente quando o sistema entrou em regime permanente de temperatura do ar de entrada e saída. Após o termino da alimentação da pasta (300 mL), a secagem foi prolongada por mais 20 min com o objetivo de coletar o pó residual desprendido do leito e dos inertes. Para vários ensaios, uma grande quantidade de material foi coletada após o fim da alimentação da pasta, sendo indispensável

considerar esse período para o cálculo de eficiência de produção de pó.

O polipropileno foi escolhido como o inerte para iniciar a investigação da influência de três variáveis operacionais sobre a eficiência de produção de pó: temperatura do ar de entrada (T_2); pressão de atomização (P_{at}); vazão de alimentação da pasta (W_f). Para tanto, uma matriz de planejamento 2^{3-1} , com ponto central foi construída.

A partir do trabalho de Medeiros (2010) e da melhor condição operacional encontrada em termos de eficiência de produção, estudou-se o processo de secagem com alimentação da pasta por gotejamento (G), empregando como inerte o PP e o PS.

Para uma conclusiva análise da influência do tipo de alimentação (por gotejamento ou atomização) sobre o desempenho do processo, dois ensaios foram realizados empregando o PS e as condições operacionais: $T_2 = 60\text{ }^\circ\text{C}$; $W_f = 2\text{ mL/min}$; $P_{at} = 10\text{ psig}$ (BRAGA e ROCHA, 2013).

Com os dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa de entrada (2) e saída (3) do leito, obtidos durante a realização dos ensaios de secagem, realizou-se a análise energética dos processos de secagem da pasta leite reconstituído-polpa de amora.

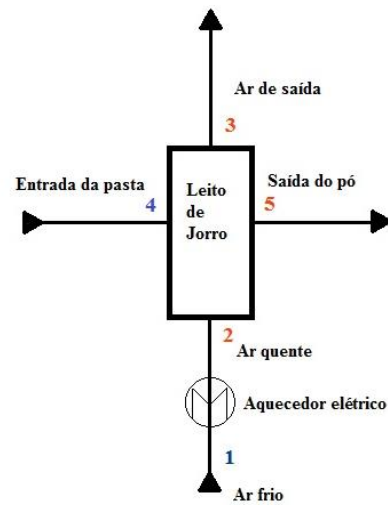
A eficiência da produção de pó (ξ) foi calculada através da razão entre a massa coletada no ciclone ($M_{pó}$) pela massa total de sólidos adicionada ao leito (M_{pasta}), em base seca, Equação (1).

$$\xi = (M_{pó} / M_{pasta}) \cdot 100 \quad (1)$$

2.6 Aspectos energéticos

O consumo de energia, avaliado neste trabalho, compreende o calor requerido para o aquecimento dos inertes e da pasta à temperatura de processo e a compensação devido à perda de calor na linha de secagem. A Figura 2 apresenta o esquema da passagem do ar e da pasta através da linha de secagem.

Figura 2 - Esquema da passagem do ar e da pasta através da linha de secagem.



Fonte: Adaptado de BENALI e AMAZOUZ (2006).

Do ponto de vista industrial, o parâmetro energético determinante é o consumo específico de energia (ϵ_{sp}) de um sistema de secagem para um dado processo (BENALI e AMAZOUZ, 2006). Por sua vez, tal parâmetro está relacionado à variação da entalpia do ar, Equação (2).

$$h_{ar} = (C_{pg} + Y \cdot C_{pv}) \cdot T + Y \cdot \lambda_v \quad (2)$$

A energia requerida (q_r) para alcançar o conteúdo final de umidade é determinada a partir da Equação (3).

$$q_r = W_{as} \cdot [(h_{ar})_2 - (h_{ar})_1] \quad (3)$$

O consumo específico de energia é definido com a razão entre a energia transferida ao sistema de secagem e a massa de água evaporada, Equação (4).

$$\epsilon_{sp} = q_r / (W_f \cdot (X_{pasta} - X_{pó} / 1 - X_{pó})) \quad (4)$$

Na secagem convectiva, em processos adiabáticos, para baixos valores de umidade e temperatura e capacidades caloríficas constantes, a eficiência energética pode ser

estimada a partir da eficiência térmica de secagem (η), Equação (5) (KUDRA, 2004).

$$\eta = [(T_2 - T_3) / (T_2 - T_{bu})] \cdot 100 \quad (5)$$

2.7 Curvas de secagem

As curvas de secagem foram construídas a partir da metodologia empregada por Rocha et al. (2011). O procedimento para obtenção das taxas de evaporação e das curvas de secagem consistiu em: após o sistema entrar em regime permanente de temperatura, registraram-se as respectivas medidas de umidade relativa e temperaturas de bulbo seco do ar na entrada e saída do leito. Para determinação das demais propriedades do ar, utilizaram-se relações psicrométricas. A taxa de evaporação (W_{evp}) foi calculada através da Equação (6).

$$W_{evp} = W_{as} \cdot (Y_3 - Y_2) \quad (6)$$

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização física da pasta

A pasta composta por 25% de leite reconstituído e 75% de polpa de amora (V/V), ou 25,3% de leite reconstituído e 74,7% de polpa de amora (m/m) apresentou densidade de 1046,9 com desvio médio de 0,5 kg/m³ e umidade de aproximadamente 83,3% (concentração de sólidos de 0,167 com desvio médio de 0,002 kg/kg).

3.2 Produção de pó e aspectos energéticos

A Tabela 2 apresenta os valores de consumo específico de energia, eficiência térmica, umidade do pó e eficiência de produção de pó, usando como inerte o PP e diferentes condições operacionais.

Com exceção dos experimentos 1 e 2, todos os Ensaios apresentaram valores de eficiência de produção de pó abaixo de 30%, sendo que grande parte do material sólido permaneceu retido sobre a superfície dos inertes, paredes do leito e ciclone ou foi

perdido na forma de finos. Constatou-se que a eficiência aumentou com o decréscimo da vazão de alimentação da pasta. Para a vazão de 0,12 kg/h (maior eficiência), observou-se o efeito negativo do aumento da temperatura, Ensaios 3 e 4, sem influência significativa da pressão de atomização, Ensaios 1 e 2.

Tabela 2 - Consumo específico de energia, eficiência térmica, umidade do pó e eficiência de produção de pó, usando como inerte o PP.

| Ensaio | Condições operacionais (W_f (kg/h), T_2 (°C), P_{at} (psig)) | ε_{sp} (MJ/kg) | η (%) | $X_{pó}$ (%)* | ξ (%)* |
|--------|---|----------------------------|------------|---------------|------------|
| 1 | 0,12, 60, 10 | 12,6 | 16,5 | 3,50 | 33,8 |
| 2 | 0,12, 60, 20 | 13,0 | 19,8 | 2,60 | 33,3 |
| 3 | 0,12, 80, 10 | - | 19,6 | 1,60 | 23,3 |
| 4 | 0,12, 80, 20 | - | 22,8 | 0,92 | 26,5 |
| 5 | 0,25, 60, 10 | 5,7 | 24,8 | 3,00 | 21,1 |
| 6 | 0,25, 60, 20 | 4,1 | 27,9 | 3,12 | 8,9 |
| 7 | 0,25, 80, 10 | - | 25,1 | 3,10 | 9,7 |
| 8 | 0,25, 80, 20 | - | 23,6 | 2,60 | 14,4 |
| 9 | 0,18, 70, 15 | - | 20,4 | 2,10 | 22,1 |
| 10 | 0,18, 70, 15 | - | 18,5 | 2,66 | 19,2 |
| 11 | 0,18, 70, 15 | - | 20,5 | 2,13 | 20,4 |

* Resultados obtidos em Braga e Rocha (2013)

Devido aos baixos valores de umidade relativa obtidos durante os processos de secagem onde se empregou T_2 de 70 e 80 °C, uma vez que a precisão do termohigrômetro era de $\pm 1,5\%$, optou-se por não calcular os valores do consumo específico de energia. Portanto, tal parâmetro foi estimado apenas para T_2 de 60 °C, Tabela 2. Como esperado, constatou-se que o consumo específico de energia diminuiu com o aumento da vazão de alimentação da pasta, atingindo um valor na

ordem de 4,1 MJ por kg de água evaporada, Ensaio 6.

Benali e Amazouz (2006) analisaram o consumo específico de energia do processo de secagem de pastas de amido vegetal em leito de jorro cônico diluído (*Jet spouted bed*), empregando como inertes partículas cúbicas de Teflon® (condutividade térmica de 0,202 W/mK (YANG, 2007)). A alimentação das pastas se deu por atomização, a temperatura do ar de entrada variou de 140 °C a 240 °C, utilizou-se 12 kg de inertes e vazão de alimentação de 107,5 kg/h. Constatou-se que o consumo específico de energia aumentou com o aumento da diferença da temperatura de entrada e saída do leito e da concentração de sólidos das pastas, variando de 3,8 MJ/kg água evaporada à 5,3 MJ/kg água evaporada.

Wachiraphansakul e Devahastin (2005) estimaram o consumo específico de energia do processo de secagem de Okara, também em leito de jorro diluído. O menor valor de ϵ_{sp} (3,69 MJ/kg água) foi obtido quando se empregou os maiores níveis das condições operacionais avaliadas: velocidade superficial do ar de 1,5 m/s; altura do leito de Okara de 18 cm; T_2 de 130 °C. Apesar deste conjunto de condições operacionais requerer uma maior quantidade de energia para aquecer o ar de jorro, a combinação de um menor tempo para a secagem e de uma maior capacidade de evaporação da água, resultou nos menores valores de consumo específico de energia.

Medeiros (2010) estudou a secagem de leite de cabra em leito de jorro cônico-cilíndrico. As condições operacionais analisados com o intuito de maximizar a obtenção de pó foram: tipo de inerte (PP ou PEAD); tipo de alimentação do leite de cabra (gotejante ou atomizado); forma de alimentação do leite de cabra (contínuo ou intermitente). Os resultados de eficiência de produção de pó variaram de 2,4 a 64,4%, sendo a melhor condição obtida quando se empregou: inerte PP; alimentação gotejante; processo contínuo.

A partir do trabalho de Medeiros (2010) e da melhor condição operacional encontrada em termos de eficiência de produção de pó, Tabela 2 Ensaio 1 ($T_2 = 60$ °C e $W_f = 0,12$ kg/h), estudou-se o processo de secagem com alimentação da pasta por gotejamento e empregando como inerte o PP e o PS. O intuito desta etapa do estudo foi definir o inerte e a condição operacional apropriada para a secagem da pasta leite-polpa de amora (25%: 75% (V/V)), resultando em uma maior eficiência de produção de pó com baixo teor de umidade. A Tabela 3 apresenta os valores de consumo específico de energia, eficiência térmica, umidade do pó e eficiência de produção de pó, Ensaios em duplicata.

Para o PP, Ensaios 12 e 13, observou-se um aumento da eficiência de produção de pó de aproximadamente 24,8% em relação ao processo usando atomização, Tabela 2 Ensaio 1. Entretanto, a eficiência média permaneceu abaixo de 60%, o que dificilmente resultaria em um processo viável.

Os resultados empregando como inerte o PS, Ensaios 14 e 15, apresentaram uma boa eficiência de processo ($\xi_{média} = 63,27\%$), na mesma ordem de grandeza da obtida por Medeiros (2010). Tal resultado se deve às características físicas dos inertes, superfície lisa e uniforme, reduzindo as zonas de acúmulo e estagnação de pasta. Durante os ensaios, visualizou-se grande produção de pó e uma tênue diminuição na velocidade de circulação dos inertes. Concluiu-se, portanto, que o melhor inerte a ser empregado nos ensaios de secagem da pasta leite reconstituído-polpa amora foi o PS.

Para uma conclusiva análise da influência do tipo de alimentação (por gotejamento ou atomização) no desempenho do processo, dois ensaios foram realizados empregando partículas de PS ($T_2 = 60$ °C, $W_f = 0,12$ kg/h e $P_{at} = 10$ psig). Verificou-se uma maior eficiência para o processo com alimentação gotejante, aproximadamente 12,37%, quando comparado ao processo por

atomização. Visualmente constatou-se a formação de uma película sobre a superfície dos inertes quando se empregou a atomização da pasta, fato também verificado para as partículas de PP e que resultou em maior retenção de material no leito.

Analisando a Tabela 3, constatou-se que o consumo específico de energia aumentou consideravelmente quando se empregou como inerte o PS e a alimentação da pasta por gotejamento. Tal fato pode estar relacionado às características físicas do PS, dentre elas a condutividade térmica ($k = 0,105 \text{ W/mK}$; sendo para o PP, $k = 0,12 \text{ W/mK}$ (YANG, 2007)) e, também, a maior resistência à evaporação da água presente nas gotas gotejadas devido à menor área superficial das mesmas, quando comparada à das gotículas formadas durante a atomização da pasta.

Tabela 3 - Consumo de energia específica, eficiência térmica, umidade do pó e eficiência de produção de pó. Condições operacionais fixas: $W_f = 0,12 \text{ kg/h}$; $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

| Ensaio | Alim. /inerte | ε_{sp} (MJ/kg) | η (%) | $X_{pó}$ (%)* | ξ (%)* |
|--------|------------------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------|
| 12 | G/PP | 21,7 | 21,7 | 1,12 | 45,3 |
| 13 | G/PP | - | - | - | - |
| 14 | G/PS | 19,0 | 26,2 | 3,43 | 63,8 |
| 15 | G/PS | 21,5 | 22,3 | 2,74 | 62,7 |
| 16 | 10 psig/PS | 17,6 | 31,8 | 2,50 | 53,3 |
| 17 | 10 psig/PS | 16,6 | 31,0 | 2,97 | 55,5 |

* Resultados obtidos em Braga e Rocha (2013)

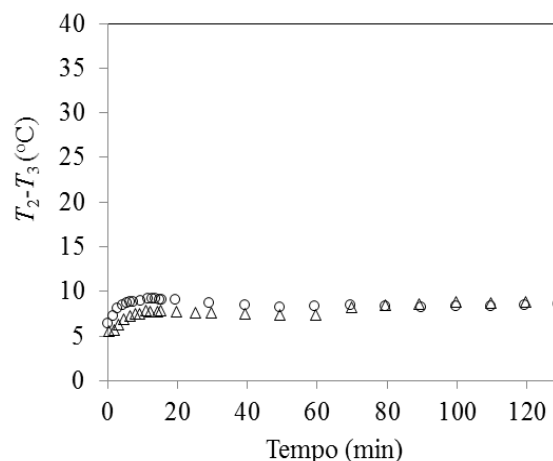
A eficiência térmica do processo de secagem se manteve abaixo de 32%, para todos os Ensaio. Os baixos valores de eficiência estão diretamente relacionados à pequena diferença de temperatura do ar de entrada e saída do leito ($T_2 - T_3$). Por exemplo, analisando a Figura 3 Ensaio 14 e 15, esta diferença foi inferior a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Todavia, o decréscimo da temperatura do ar de saída deve ser analisado com critério, pois resulta

no aumento da umidade do pó, o que pode comprometer a qualidade do produto.

No entanto, a quantidade de energia térmica fornecida ao sistema pode ser consideravelmente reduzida. O ar de saída do leito apresentou pequena quantidade de umidade e temperatura elevada, podendo ser desumidificado e recirculado. Por exemplo, se o ar de saída do leito, Ensaio 15, fosse desumidificado até atingir a umidade absoluta do ar de entrada do primeiro ciclo, à uma temperatura $T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, o consumo específico de energia diminuiria para aproximadamente $4,3 \text{ MJ/kg}$ água. O procedimento sugerido reduz o consumo líquido de energia e, consequentemente, acarreta em um menor valor do consumo específico de energia, conforme reporta a literatura (JUMAH e MUJUMDAR, 1996; WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN, 2005).

A Figura 3 apresenta a diferença de temperatura do ar de entrada e saída do leito ($T_2 - T_3$) durante os processos de secagem da pasta leite reconstituído-polpa de amora (25%: 75% (V/V)), Ensaio 14 e 15. Observou-se que a diferença de temperatura se manteve praticamente constante a partir dos 5 minutos de processo.

Figura 3 – Diferença de temperatura do ar de entrada e saída do leito em função do tempo de secagem (○) Ensaio 14 e (Δ) Ensaio 15.



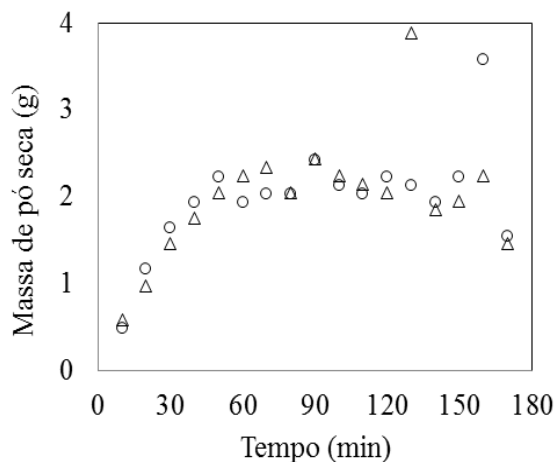
3.3 Umidade do pó

Analisando as Tabelas 2 e 3, observou-se que os valores de umidade dos pós permaneceram abaixo de 3,55%. Usando o leite como parâmetro de comparação, a umidade máxima deve ser de 4% para o leite em pó desnatado e de 2,5% para o leite em pó integral, estando o excesso de umidade relacionado à rápida perda de sabor, solubilidade e alterações nas propriedades físicas do produto (ANVISA, 2008).

3.4 Evolução da eficiência de produção de pó e massa de sólidos acumulada

A Figura 4 apresenta os valores de massa seca de pó coletada em função do tempo de processo para a pasta leite-polpa de amora (25%: 75% (V/V)). Do início da secagem até aproximadamente 50 min, observou-se um crescimento linear da obtenção de pó, e a partir deste ponto, o processo entrou em um estado praticamente estacionário de produção.

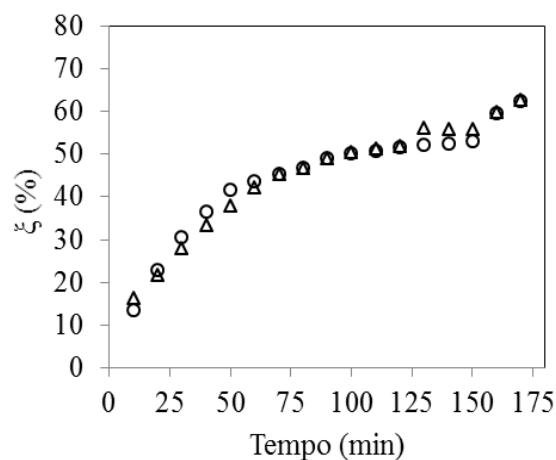
Figura 4 - Obtenção de pó em função do tempo (○) Ensaio 14 e (Δ) Ensaio 15.



Analisando a eficiência da obtenção de pó em função do tempo para a pasta leite-polpa de amora (25%: 75% (V/V)), Figura 5, constatou-se que tal parâmetro aumentou com o tempo de processo, apresentando três períodos distintos de crescimento: de 0 a 50

min (aumento linear acentuado); de 50 a 150 min (tênue aumento da eficiência de produção de pó); 150 a 170 min (observa-se um acentuado aumento da eficiência de produção de pó). Torna-se importante destacar a influência do período pós-alimentação (20 min) na eficiência de produção de pó ($\xi_{\text{média}} = 54,4\%$ em $t = 150$ min; e $\xi_{\text{média}} = 63,2\%$ em $t = 170$ min), aumento de 16,2%.

Figura 5 - Eficiência da obtenção de pó em função do tempo (○) Ensaio 14 e (Δ) Ensaio 15.



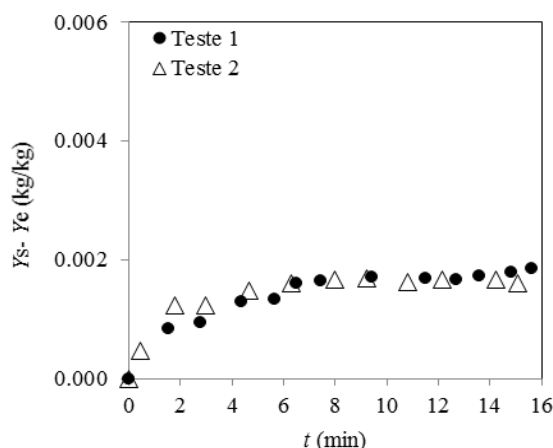
3.5 Curvas de secagem

A Figura 6 apresenta a diferença de umidade absoluta do ar de entrada e saída do leito ($Y_3 - Y_2$) (A), e a taxa de evaporação durante o processo de secagem da pasta (B). Constatou-se que a evaporação ocorreu rapidamente, sendo que já nos instantes iniciais do processo a diferença de umidade absoluta do ar e a taxa de evaporação atingiram valores praticamente constante. Tal comportamento também é reportado na literatura sobre secagem de pastas (BRAGA et al., 2015; MEDEIROS, 2010).

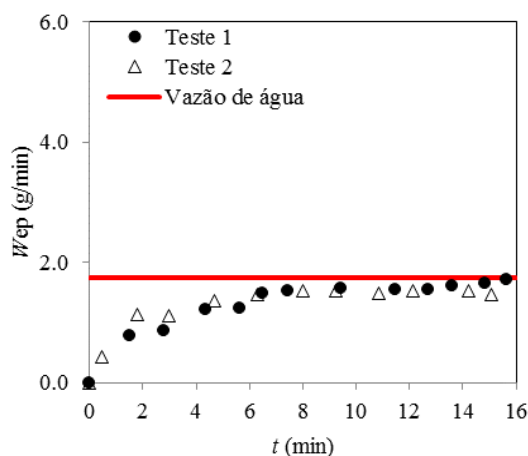
As temperaturas do ar de entrada (T_2) e de saída (T_3) e a umidade relativa do ar de saída do leito foram monitoradas durante a realização dos ensaios de secagem. A umidade relativa do ar de entrada foi determinada antes do início da alimentação da pasta. Como resultado geral, a diferença máxima de temperatura ($T_2 - T_3$) foi de 12,5 °C

e a máxima umidade relativa de entrada foi de 8,7%. Um menor valor de umidade absoluta foi assegurado devido à passagem do ar pelo leito de sílica gel.

Figura 6 - Diferença de umidade absoluta do ar (A) e taxa de evaporação durante o processo de secagem (B): (○) Ensaio 14 ($Y_2 = 0,0094$ kg água/kg ar seco) e (△) Ensaio 15 ($Y_2 = 0,0067$ kg água/kg ar seco).



(A)



(B)

4. CONCLUSÕES

A utilização do poliestireno como inerte, alimentação da pasta por gotejamento e a menor vazão de alimentação utilizada, resultou em boa eficiência de produção de pó,

na ordem de 63 %. Em contra partida, tais condições resultaram em altos valores de consumo específico de energia.

A eficiência térmica do processo de secagem se manteve abaixo de 32%, para todos os ensaios. Os baixos valores de eficiência se devem à pequena diferença de temperatura do ar de entrada e saída do leito.

Constatou-se que a evaporação ocorreu rapidamente, sendo que já nos instantes iniciais do processo a diferença de umidade absoluta do ar de entrada e saída do leito atingiu um valor praticamente constante.

A quantidade de energia térmica fornecida ao sistema de secagem pode ser consideravelmente reduzida a partir da desumidificação e recirculação do ar de saída do leito.

5. NOMENCLATURA

| | | |
|------------------|--------------------------------------|----------------------|
| C_{pg} | calor específico do gás | (J/kgK) |
| C_{pv} | calor específico do vapor | (J/kgK) |
| d_p | diâmetro médio dos inertes | (mm) |
| h_{ar} | entalpia do ar | J/kg ar seco |
| M | massa de inertes | (kg) |
| M_{pasta} | massa de sólidos adicionada ao leito | (kg) |
| $M_{pó}$ | massa seca de pó coletada | (kg) |
| P_{at} | pressão de atomização | (psig) |
| PEAD | polietileno de alta densidade | (-) |
| PP | polipropileno | (-) |
| PS | poliestireno | (-) |
| q_r | energia requerida | (J/s) |
| T | temperatura | (°C) |
| T_{bu} | temperatura de bulbo úmido | (°C) |
| X_{pasta} | umidade da pasta | (kg/kg) b.u. |
| $X_{pó}$ | umidade do pó | (kg/kg) b.u. |
| W_{ar} | vazão do ar de secagem | (kg/min) |
| W_{as} | vazão mássica de ar seco | (kg/s) |
| W_f | vazão de alimentação | (kg/s) |
| W_{jm} | vazão de jorro mínimo | (kg/min) |
| Y | umidade absoluta do ar | (kg água/kg ar seco) |
| Φ | esfericidade dos inertes | (-) |
| ξ | eficiência da produção de pó | (%) |
| η | eficiência térmica | (%) |
| λ_v | calor latente de vaporização | (J/kg) |
| ρ_{real} | densidade real | (kg/m³) |
| ΔP_{max} | queda de pressão máxima | (Pa) |

6. REFERENCIAS

BARRET, N.; FANE, A. **Drying liquid materials in spouted bed**. In: Mujundar, A. S. e Roques, M. A. (org). Drying' 89. New York: Hemisphere Publishing Corp., 1990, p. 426-432.

BENALI, M.; AMAZOUZ, M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles quality and energy aspects. **Journal of Food Engineering**. v. 76, p. 484-489, 2005.

BRAGA, M. B.; ROCHA, S. C. S. Drying of milk-blackberry pulp mixture in spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 91, p. 1786-1792, 2013.

BRAGA, M. B. B. **Obtenção de mistura leite-amora preta em pó por secagem em leito de jorro**. 2014. 187p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2014.

BRAGA, M. B.; ROCHA, S. C. S. Spouted bed drying of milk-blackberry pulp: analysis of powder production efficiency and powder characterization. **Drying Technology**. v.33, p. 933-940, 2015.

BRAGA, M. B.; WANG, Z.; GRACE, J. R.; JIM LIM, C.; ROCHA, S. C. S. Slot-Rectangular spouted bed: hydrodynamic stability and effects of operating conditions on drying performance. **Drying Technology**. v.33, p. 216-226, 2015.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. **Drying of solutions, slurries, and pastes**. In: Epstein, N.; Grace, J. R. (org). Spouted and Spout-Fluid Beds. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. p.206-221.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S. Batch drying kinetics of corn in a novel rotating jet spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. p. 479-486, 1996.

KUDRA, T. Energy aspects in drying. **Drying Technology**. v.22, n.5, p. 917-932, 2004.

MEDEIROS, U. K. L. **Viabilidade técnica de uma rota não convencional para a produção de leite de cabra em pó em cooperativas do Rio Grande do Norte**. 2010. 166p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G.; NIRANJAN, K. Spouted bed dryer for liquid foods. **Food Control**. v. 4, p. 41-45, 1993.

PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 426-434, 1983.

ROCHA, S. C. S.; TARANTO, O. P. **Advances in spouted bed drying of foods**. In: Cristina Ratti. (org). Advances in Food Dehydration. 1 ed. Boca Raton: Taylor e Francis-CRC press, 2008, v. 5, p.153-186.

ROCHA, S. C. S.; SOUZA, J. S.; ALSINA, O. L. S.; MEDEIROS, M. F. D. Drying of tropical fruit pulps: spouted bed process optimization as a function of pulp composition. **Drying Technology**. v. 29, p.1587-1599, 2011.

YANG, Y. **Thermal conductivity**. In: Mark, J. E. (org). Physical properties of polymers handbook. New York: Springer science + Business media, 2007, p. 156-162.

WACHIRAPHANSAKUL, S.; DEVAHASTIN, S. Drying kinetics and quality of soy residue (Okara) dried in a jet spouted-bed dryer. **Drying Technology**. v. 23, p.1229-1242, 2005.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro e institucional.