

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

M. B. BRAGA<sup>1\*</sup>, S. C. S. ROCHA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade 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.

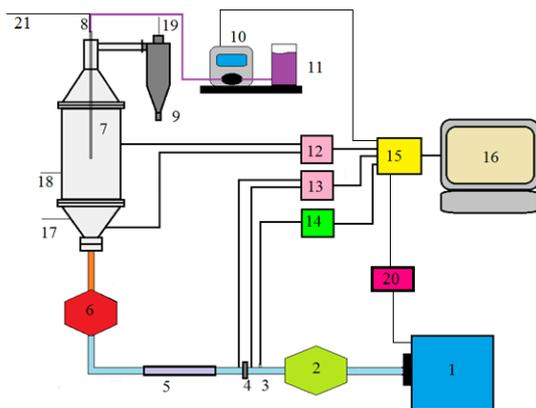
### 2.4 Sistema experimental e condições fixas de operação

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 ( $\rho_r$ ) e esfericidade ( $\Phi$ )), análises fluidodinâmicas (massa de inertes ( $M$ ), vazão de jorro mínima ( $W_{jm}$ ), vazão de ar de secagem ( $W_{ar}$ ), e queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ )), 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.
$d_p$ (mm) <sup>a</sup>	5,19	0,26	3,14	0,18
$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	1060,0	0,6	907,8	0,5
$\Phi$ <sup>a</sup>	0,90	0,07	0,74	0,06
$M$ (kg)	1,4	-	1,4	-
$W_{jm}$ (kg/min) <sup>b</sup>	0,79	0,00	0,87	0,01
$\Delta P_{max}$ (Pa) <sup>b</sup>	1813	23	1371	18
$W_{ar}$ (kg/min)	1,2. $W_{jm}$	-	1,2. $W_{jm}$	-

\*Des.= desvio; <sup>a</sup>desvio padrão; <sup>b</sup>desvio 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 término 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.

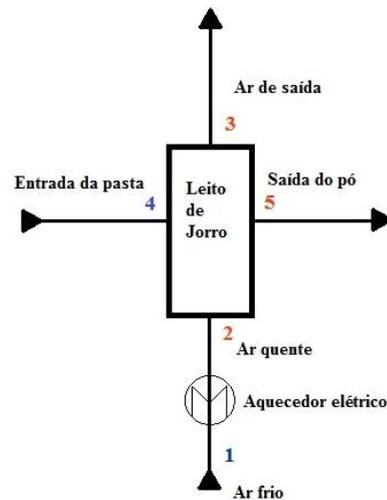
A eficiência da produção de pó ( $\xi$ ) foi calculada através da razão entre a massa coletada no ciclone ( $M_{pó}$ ) pela massa total de sólidos adicionada ao leito ( $M_{pasta}$ ), em base seca, Equação (1).

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

## 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 ( $\epsilon_{sp}$ ) 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 ( $\eta$ ), 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/m<sup>3</sup> 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))	$\epsilon_{sp}$ (MJ/kg)	$\eta$ (%)	$X_{pó}$ (%)*	$\xi$ (%)*
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  $\epsilon_{sp}$  (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 ( $\xi_{m\acute{e}dia}= 63,27\%$ ), 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	$\epsilon_{sp}$ (MJ/kg)	$\eta$ (%)	$X_{pó}$ (%)*	$\xi$ (%)*
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)

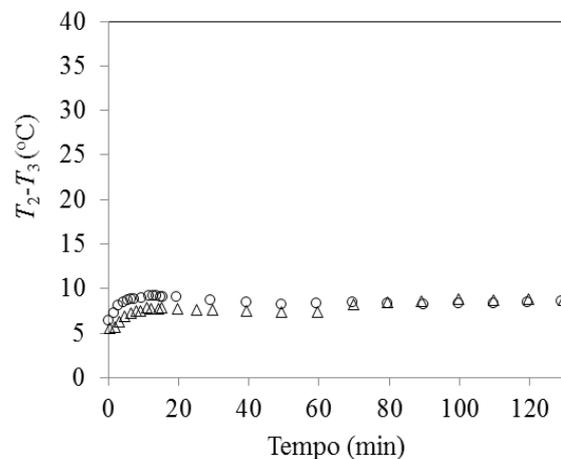
A eficiência térmica do processo de secagem se manteve abaixo de 32%, para todos os Ensaios. Os baixos valores de eficiência estão diretamente relacionados à pequena diferença de temperatura do ar de entrada e saída do leito ( $T_2-T_3$ ). Por exemplo, analisando a Figura 3 Ensaios 14 e 15, esta diferença 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, conseqüentemente, 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)), Ensaios 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.



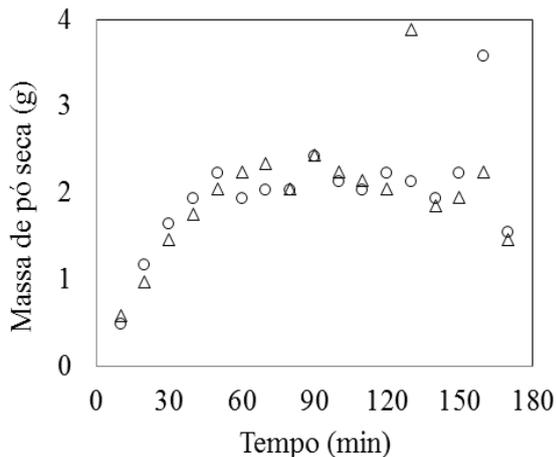
### 3.3 Umidade do pó

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.

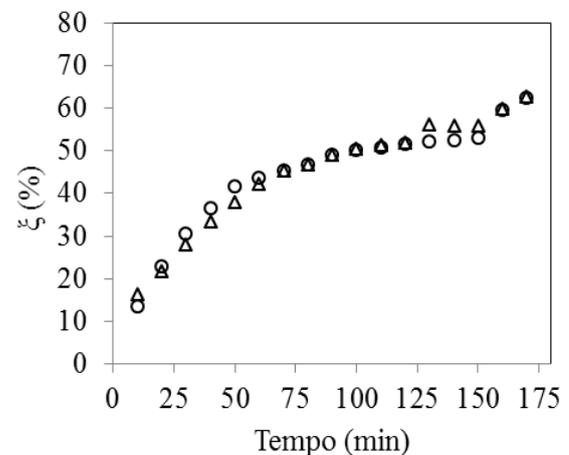
**Figura 4** - Obtenção de pó em função do tempo (○) Ensaio 14 e (Δ) Ensaio 15.



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 (tênuo 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 ( $\xi_{média} = 54,4\%$  em  $t = 150$  min; e  $\xi_{média} = 63,2\%$  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.



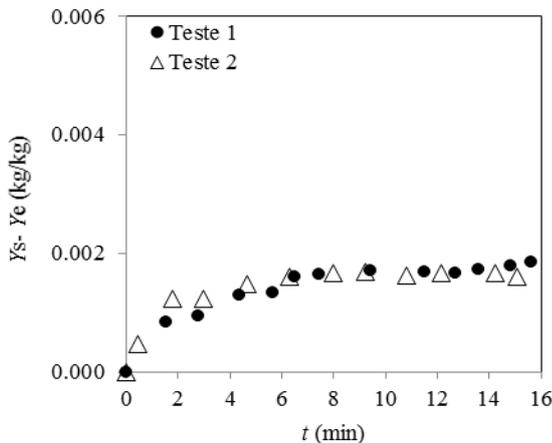
### 3.5 Curvas de secagem

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).

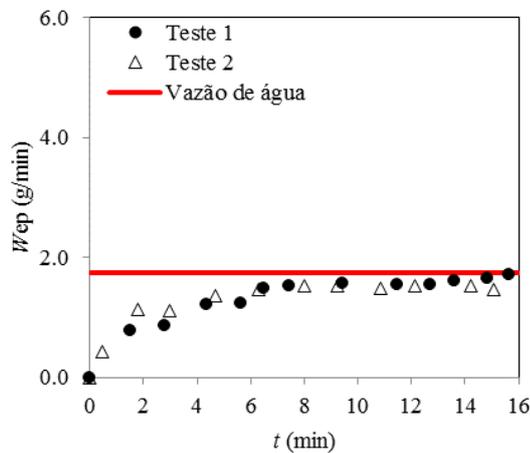
As temperaturas do ar de entrada ( $T_2$ ) e de saída ( $T_3$ ) e a umidade relativa do ar de saída do leito foram monitoradas durante a realização dos ensaios de secagem. A umidade relativa do ar de entrada foi determinada antes do início da alimentação da pasta. Como resultado geral, a diferença máxima 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)
$\Phi$	esfericidade dos inertes	(-)
$\xi$	eficiência da produção de pó	(%)
$\eta$	eficiência térmica	(%)
$\lambda_v$	calor latente de vaporização	(J/kg)
$\rho_{real}$	densidade real	(kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta P_{max}$	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.