



Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema

Rafael Luiz Giannella
Vitor Kim Fujita

ANÁLISE DOS ASPECTOS ENERGÉTICOS E DE TRANSFERÊNCIA DE
CALOR E MASSA EM PROCESSOS DE SECAGEM DE PASTA LEITE-
POLPA DE AMORA PRETA EM LEITO DE JORRO.

Diadema
2019

Fujita, Vitor Kim

Análise dos aspectos energéticos e de transferência de calor e massa em processos de secagem de pasta leite-polpa de amora preta em leito de jorro / Vitor Kim Fujita, Rafael Luiz Giannella. - - Diadema, 2019. 53 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema, 2019.

Orientador: Matheus Boeira Braga

1. Leito de Jorro 2. Amora Preta 3. Transferência de calor 4. Transferência de massa I. Rafael Luiz Giannella II. Análise dos aspectos energéticos e de transferência de calor e massa em processos de secagem de pasta leite-polpa de amora preta em leito de jorro

CDD

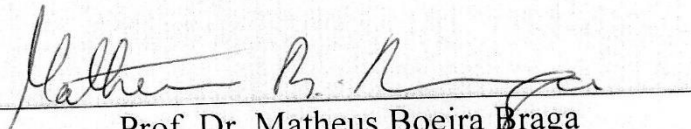
**RAFAEL LUIZ GIANNELLA
VITOR KIM FUJITA**

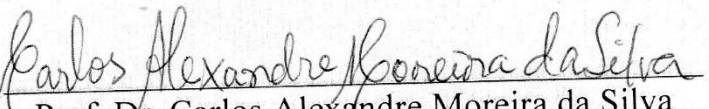
**ANÁLISE DOS ASPECTOS ENERGÉTICOS E DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM
PROCESSOS DE SECAGEM DE PASTA LEITE-POLPA
DE AMORA PRETA EM LEITO DE JORRO**

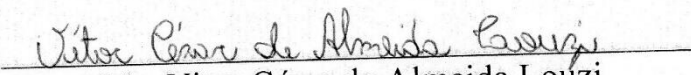
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e
Farmacêuticas da Universidade Federal
de São Paulo – Campus Diadema.

Aprovado em: 22/11/2019

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Matheus Boeira Braga
Orientador


Prof. Dr. Carlos Alexandre Moreira da Silva


Me. Vitor César de Almeida Louzi

Diadema (SP)
2019

Resumo

O Processo de desidratação da polpa de amora preta por secagem em leito de jorro tem como objetivo aumentar a estabilidade do produto em pó, melhorando as condições de armazenamento e transporte. Devido à composição química e à alta concentração de água presente na polpa de amora preta, utilizou-se uma mistura leite-polpa de amora, já que a secagem da polpa sem a adição de adjuvantes pode resultar em níveis baixos de rendimento, inviabilizando o processo. O objetivo deste trabalho foi estudar a transferência de calor e massa durante o processo de secagem de mistura leite concentrado-polpa de amora preta em leito de jorro cônico cilíndrico. O estudo da transferência de calor e massa e dos aspectos energéticos (eficiência energética e consumo específico de energia), foi realizado para diversos ensaios de secagem reportados em Braga (2014). Os ensaios foram conduzidos sob condições fixas de massa de inerte de 1,4 kg e velocidade do ar de processo de 1,2. velocidade de jorro mínimo. As variáveis de processo foram a temperatura do ar de secagem (60 a 80 °C), o tipo de inerte (poliestireno ou polipropileno), a pressão de alimentação da pasta (10 a 20 psig), a vazão de alimentação da pasta (2 a 4 ml/min) e o modo de alimentação (atomizado ou gotejado). Com uma massa fixa de inerte polipropileno de 1,4 kg, obteve-se uma velocidade de jorro mínimo média de 0,463 m/s. Já para o poliestireno a velocidade de jorro mínimo média foi de 0,490 m/s. Em relação aos aspectos energéticos, observou-se um maior valor de eficiência energética e um menor valor de consumo específico de energia para o Ensaio 3, ou seja, quando se utilizou a maior vazão de alimentação da pasta de 4 ml/min e a menor temperatura de entrada do ar de 60 °C. Para os ensaios 8 e 9 (mesmas condições operacionais: vazão de alimentação da pasta de 2 ml/min, temperatura do ar de entrada de 60 °C, inerte poliestireno e alimentação por gotejamento), os quais apresentaram a maior eficiência na produção de pó segundo Braga (2014), calculou-se o número de Nusselt experimental, resultando em valores de 0,280 e 0,225, respectivamente. Os valores experimentais de número de Nusselt foram confrontados com os valores obtidos via correlações disponíveis na literatura, sendo a correlação de Rocha et al. (1996) a que melhor descreveu o processo. Analogamente, para a transferência de massa e para os Ensaio 8 e 9, obteve-se os valores experimentais do número de Sherwood de 0,026 e 0,023, respectivamente.

Palavras Chave: Leito de jorro, Amora preta, Transferência de calor, Transferência de massa, Aspectos energéticos.

Abstract

The process of blackberries dehydration using spouted bed aims to increase the powder stability and improve the storage and transportation conditions. Due to the chemical components and the high water concentration in blackberries, it was used a Milk-Blackberry mix paste, since the pulp drying without adjuvants could result in a low efficiency and affect the efficiency negatively. The objective was studying the heat and mass transfer during the drying process of Milk-Blackberry mix paste using a conventional spouted bed. The heat and mass transfer analysis (energy efficiency and specific energy consumption) were studied to different laboratory tests by Braga (2014). The tests were conducted under specific conditions, a specific polypropylene mass, 1,4 Kg and a air speed of 1.2 times the minimum spouting velocity. The process variables were the drying air temperature (60 to 80 °C), the sort of inert (polypropylene and polystyrene), the feed pressure (10 to 20 psig), the paste flow rate (2 to 4 mL/min) and feeding mode (drip or atomized). With a fixed mass of polypropylene of 1.4 Kg, it was obtained a minimum spouting velocity of 0.463 m/s. To the polystyrene the minimum spouting velocity was 0.490 m/s. Regarding the energetic aspects it was noticed a bigger energy efficiency and a smaller specific energy consumption value to the tes number 3, which means that when it was used the biggest feeding flow rate (4 mL/min) and the smallest air temperature (60 oC). To the tests 8 and 9 (same operational conditions: feeding paste flow rate of 2 mL/min, inlet air temperature of 60 oC, polystyrene and drip feeding), which showed a better efficiency in the powder production, concluded by Braga (2014), it was calculated the experimental Nusselt number, resulting in values between 0.280 and 0.225, respectively. The experiental Nusselt number values were compared with the ones obtained through correlations in literature and the Rocha et al (1996) was the one that best fitted the process. Similarly, to the mass transfer e to the tests 8 and 9, it was obtained the experimental Sherwood number, 0.026 and 0.023, respectively.

Key Words: Spouted bed, Blackberry, Heat transfer, Mass transfer

Sumário

1.INTRODUÇÃO E OBJETIVO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 O leito de jorro.....	3
2.2 Secagem de pastas em leito de jorro.....	7
2.3 Transferência de calor e massa em leito de jorro	10
2.4 Contextualização do trabalho	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1.O processo de secagem em leito de jorro e o conteúdo de umidade dos pós	16
3.2 Balanço de massa e energia	19
3.3 Metodologia para determinação do coeficiente de transferência de calor e massa por convecção	21
4. RESULTADOS	25
4.1. Curvas Fluidodinâmicas	25
4.2 Balanço de Energia.....	27
4.3 Transferência de Calor.....	30
4.4 Transferência de Massa	34
5. CONCLUSÃO.....	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

Lista de Figuras

Figura 1 - Leito de jorro.	4
Figura 2 . Classificação de Geldart.....	5
Figura 3 .Curva fluidodinamica típica de queda de pressão versus velocidade superficial do gás para o leito de jorro.....	6
Figura 4 - Esquema experimental disponível no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem da Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP.....	17
Figura 5 - Fluxograma experimental do balanço de energia	20
Figura 6 :Curva fluidodinâmica para o inerte poliestireno (M= 1,4 kg).	25
Figura 7 - Número de Nusselt experimental e estimado via correlações para cada ensaio de secagem.	31
Figura 8 - Temperatura do ar de saída em função do tempo de processo.	36
Figura 9 - Taxa de evaporação da água em função do tempo de processo.	36

Lista de Tabelas

Tabela 1. Correlações de transferência de calor em leito de jorro.....	11
Tabela 2 – Números adimensionais na transferência de calor e massa.	12
Tabela 3. Correlações de transferência de massa em leito de jorro.....	13
Tabela 4 - Caracterização das partículas inertes (Braga, 2014).....	15
Tabela 5 – Condições operacionais dos processos de secagem.....	18
Tabela 6 - Modelos empíricos de capacidade calorífica (J/g.°C) para a pasta leite concentrado-polpa de amora (25%-75%, v/v).....	21
Tabela 7 - Modelos empíricos de capacidade calorífica (J/g.°C) para o produto em pó.	21
Tabela 8 - Resultados dos cálculos de balanço de energia.	27
Tabela 9 – Taxa de evaporação da água (mv), taxa de calor (q), coeficiente de transferência de calor por convecção médio (h), Número de Nusselt (Nu) e Número de Reynolds da partícula (Re_p).....	30
Tabela 10 - Resultado dos desvios relativos para cada correlação empírica estudada.	32
Tabela 11 - Taxa de evaporação da água, coeficiente de transferência de massa médio e Número de Sherwood experimental.	34
Tabela 12 - Resultado dos desvios relativos para cada correlação empírica estudada.	35

NOMENCLATURA

d_p = diâmetro da partícula inerte (m)

ρ_p = densidade da partícula inerte (kg/m^3)

ρ_g = densidade do gás (kg/m^3)

H=Altura de leito fixo (m)

U_{jm} = Velocidade de jorro mínima (m/s)

U_M = Velocidade referenciada à máxima queda de pressão (m/s)

ΔP_M = Queda de pressão máxima (N/m^2)

ΔP_S = Queda de pressão de jorro estável. (N/m^2)

U_{jm} = velocidade de jorro mínimo (m/s)

ρ_g = densidade do gás (kg/m^3)

μ_g = viscosidade absoluta do gás (Pa.s)

U_s = velocidade superficial do gás tendo como referência o diâmetro da seção cilíndrica do leito (m/s)

θ = ângulo de inclinação da base cônica

$f\emptyset$ = fator de esfericidade de partícula

\dot{m}_s = vazão mássica de água [kg/s]

\dot{m}_g = vazão mássica de ar (kg/s)

C_s = concentração de sólidos na pasta (kg/kg)

\dot{m}_{pasta} = vazão mássica da pasta (kg/s)

cp_g = calor específico do gás (J/kg.K)

k_g = coeficiente de condutividade térmica do gás (W/m.K)

D_{AB} = coeficiente de difusividade de massa (m^2/s)

k_m = coeficiente de transferência de massa por convecção (m^2/s)

D_c = diâmetro da seção transversal da base cilíndrica do leito (m)

T_e = temperatura do ar na entrada do leito (K)

\dot{m}_{alim} = vazão de alimentação da pasta (kg/s)

T_1 = temperatura do ar de entrada (K)

ε = consumo específico de energia (J/kg)

U_{pasta} = umidade da polpa (kg/kg)

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

q = taxa de calor (W)

a = área total superficial das partículas inertes (m^2)

V_o = volume do leito fixo (m^3)

ΔT_{ml} = média logarítmica da diferença de temperatura (K)

T_{bs1} = temperatura de bulbo seco na entrada do leito (K)

T_{bu1} = temperatura de bulbo úmido na entrada do leito (K)

T_{bs2} = temperatura de bulbo seco na saída do leito (K)

T_{bu2} = temperatura de bulbo úmido na saída do leito (K).

ϕ = esfericidade as partículas inertes

\dot{m}_v = taxa mássica de vapor (kg/s)

λ_v = calor latente de vaporização (J/kg)

c_{pa} = calor específico da água na temperatura de bulbo úmido (J/kg.K)

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$)

Y_1 = umidade absoluta na entrada do leito (kg de água/kg de ar seco)

Y_2 = umidade absoluta na saída do leito (kg de água/kg de ar seco)

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

A amora preta possui um alto valor nutricional e devido às altas concentrações de antocianinas, potenciais aplicações industriais como corante natural. No entanto, seu armazenamento e comercialização mostram-se difíceis, uma vez que é um fruto altamente perecível e sazonal. Sendo assim, o processo de secagem torna-se uma alternativa para aprimorar a sua conservação/comercialização (BRAGA, 2014).

A amora preta apresenta uma alta concentração de açúcares redutores e água, o que pode resultar em níveis baixos de rendimento, inviabilizando o processo para obtenção do produto em pó. Todavia, o emprego de leite integral como adjuvante no processo de secagem tem sido estudado e os resultados apontaram para um bom rendimento e um produto final com alta qualidade (OCHOA-MARTINEZ et alli,1993).

O processo de secagem tem ampla aplicação industrial e possui por finalidade reduzir o desperdício pós-colheita, aumentar a vida útil do produto (minimizando as alterações nas características nutricionais), além de facilitar o transporte e o armazenamento do material. Nesse sentido, a escolha do equipamento para o processamento do material, assim como a preocupação com as condições operacionais são fundamentais para a eficácia da operação (GUERRERO, 2003).

O leito de jorro convencional (cônico-cilíndrico), consiste em uma câmara cilíndrica conectada à uma base cônica preenchida com inertes. O ar é injetado por um orifício localizado na base cônica e a uma velocidade suficientemente alta, observa-se a formação de uma fonte de partículas inertes e uma região de jorro. As partículas inertes são então direcionadas para as paredes da câmara denominada região anular, em uma trajetória descendente. Na região anular, as partículas movem-se lentamente em direção à base e, conseqüentemente, de encontro ao fluido injetado, repetindo o movimento cíclico e contínuo das partículas (EPSTEIN e GRACE, 2011; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O processo de secagem de pastas em leito de jorro consiste em atomizar ou gotejar a pasta sobre o leito móvel de partículas inertes, com o intuito de recobri-las e, com a passagem de ar, secar a pasta. A corrente de ar ascendente passa pelos inerte e retira a umidade do produto até um valor crítico. Devido ao o atrito entre as partículas inertes recobertas e entre as partículas e

a parede da câmara, a pasta seca torna-se quebradiça e, conseqüentemente, forma-se um pó que é removido via ciclone (MARKOWSKI,1992).

Braga (2014) estudou a secagem de polpa de amora preta em leite de jorro convencional empregando como adjuvante o leite concentrado. Avaliou-se, a influência das condições operacionais (temperatura do ar de entrada, vazão de alimentação da pasta, tipo de inerte, pressão de atomização da pasta, modo de alimentação da pasta atomização/gotejamento), e das formulações leite concentrado-polpa de amora na qualidade do produto e na eficiência de produção de pó (rendimento do processo). Dentre todas as pastas formuladas, a pasta leite concentrado-polpa de amora (25%: 75% (v/v)) foi a mais indicada ao processo de secagem em termos de estabilidade dinâmica do leite, quantidade de polpa de amora empregada e desempenho do processo (eficiência de produção de pó superior a 60%).

O estudo da transferência de calor e massa mostra-se fundamental para o entendimento da secagem de pastas em leite de jorro. Tanto a transferência de calor quanto a transferência de massa ocorrem simultaneamente durante este processo. Em um primeiro momento, a passagem do ar à temperatura de entrada aquece o leite de partículas inertes. Com o início da alimentação da pasta o leite se torna molhado e a pasta recobre gradativamente a superfície das partículas inertes, formando uma fina película de material (mistura de líquido e sólidos). O líquido sobre a superfície dos inertes é seco devido à transferência de calor por condução do próprio inerte e devido à transferência de calor por convecção a partir do ar quente que percola o leite (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Em relação à transferência de massa, destacando como agente direto o ar, pode ser identificado duas etapas principais: evaporação parcial da água presente na pasta e transferência para o ar; remoção da umidade do sistema pela corrente de ar que deixa o equipamento. A teoria da evaporação de um líquido em um fluxo de gás supõe que o vapor presente na interface gás-líquido está saturado, ou seja, que as condições de equilíbrio termodinâmico se estabelecem na interface. Conseqüentemente, a taxa de evaporação depende da taxa de remoção do vapor da superfície do líquido por meio de difusão e convecção de massa (DLOUHY, 1957).

1.2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo o estudo dos aspectos energéticos e da transferência de calor e massa para processos de secagem da pasta leite concentrado-polpa de amora preta (25%:

75%, v/v) em leite de jorro cônico-cilíndrico. O estudo foi realizado a partir dos dados experimentais obtidos por Braga (2014).

1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivos específicos, determinou-se para diferentes condições de processo as taxas de transferência de calor e massa e os respectivos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção. Os dados experimentais foram confrontados com correlações clássicas da literatura para a estimativa do número de Nusselt e Sherwood. Além disso o cálculo de eficiência energética e o consumo específico de energia também foram determinados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A amora preta e o leite

Segundo Reyes-Camona et al (2005) a amora-preta in natura é composta por: água, proteínas, lipídeos, fibras, cinzas, carboidratos e concentrações consideráveis (mg/100 g) de cálcio, fósforo, potássio, selênio, magnésio, ferro, ácido ascórbico; em menor quantidade vitamina A, vitamina E, vitaminas B-6 e B-12, folato, tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantotênico, ácidos graxos saturados, ácidos graxos monoinsaturados e polinsaturados. Sendo assim, apresenta em sua composição diversos componentes nutricionais de grande importância para o consumo.

Já o leite é uma solução aquosa diluída de baixa viscosidade e que possui densidade de aproximadamente 1029 kg/m³ à 20 °C, variando suas características principalmente em função da concentração de gordura. O leite também é caracterizado como uma dispersão de coloração branca, cujos glóbulos de gordura possuem uma membrana que age tanto como uma barreira entre a fase aquosa e os lipídios. (WALSTRA et al, 1999).

2.2. O leite de jorro

O secador do tipo Leite de Jorro foi desenvolvido em 1954 por Gishler e Mathur como um equipamento para secagem de trigo. Quando comparada aos secadores convencionais, o secador do tipo leite de jorro apresentava uma maior gama de aplicações (granulação, polimerização

catalítica, recobrimento etc.). A primeira unidade comercial no Canadá foi instalada em 1962 e desde então diversas outras unidades foram desenvolvidas em diferentes países com diversas funções, incluindo secagem, recobrimento e granulação (MATHUR; EPSTEIN,1974).

O leito de jorro convencional consiste em uma câmara cilíndrica conectada a um fundo cônico preenchida com partículas inertes. Já o funcionamento é regido pela injeção de fluido por um orifício localizado na base da câmara. Dessa forma, com uma alta velocidade do fluido há a formação de uma fonte e uma região de jorro. Com a passagem do fluido algumas partículas inertes são carregadas em um fluxo ascendente, retornando para a área mais periférica da câmara, denominada região anular, em uma trajetória parabólica. Na região anular, as partículas movem-se lentamente em direção a base da câmara e, conseqüentemente, de encontro ao fluido injetado, repetindo o movimento cíclico e contínuo das partículas, **Figura 1**. (EPSTEIN e GRACE, 2011; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

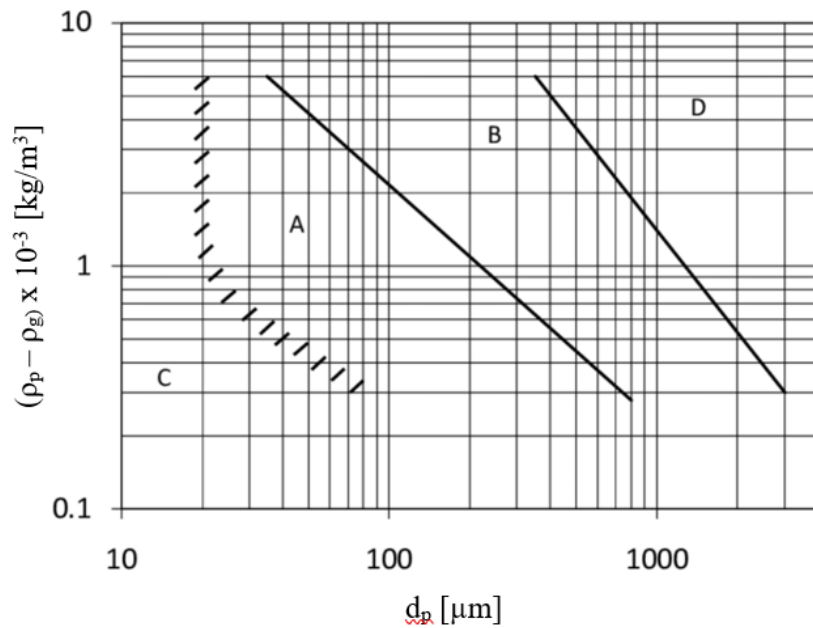
Figura 1 - Leito de jorro.



Fonte: MATHUR e EPSTEIN, 1974

Geldart (1973) estabeleceu uma classificação de material particulado em um diagrama que relaciona diâmetro médio com as diferenças entre as densidades da partícula e do fluido. Na **Figura 2**, apresenta-se o diagrama com a classificação de Geldart. Com essa classificação, nota-se que para atingir a fluidização do tipo jorro é necessário um tamanho mínimo de partículas classificadas no grupo D.

Figura 2. Classificação de Geldart.



Fonte: GELDART,1986

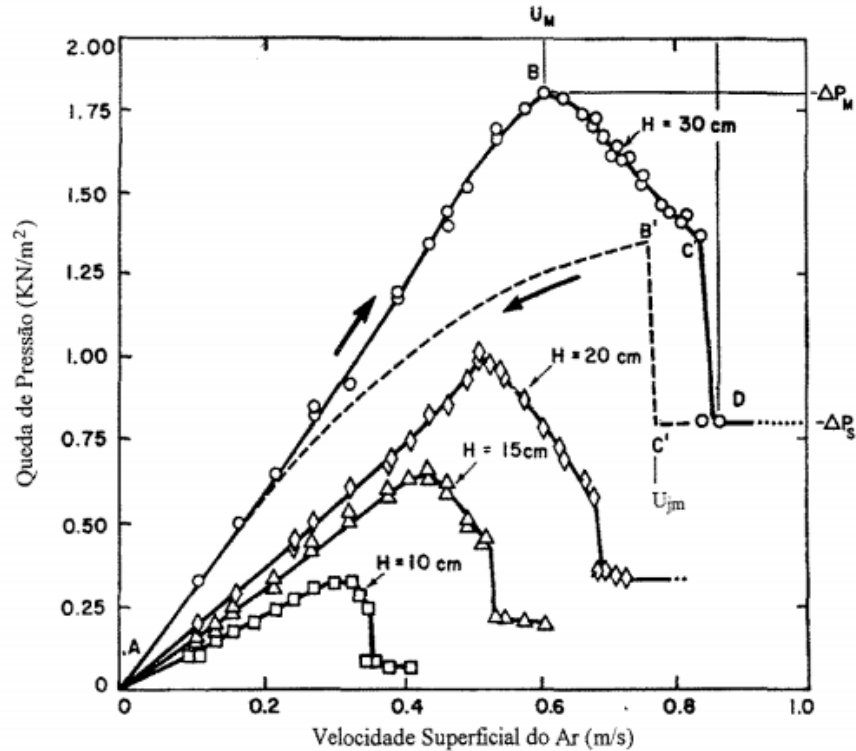
Sendo d_p = diâmetro da partícula inerte; ρ_p = densidade da partícula inerte; ρ_g = densidade do gás

Apresentam-se características dos quatro grupos (A, B, C e D) de partículas:

- Grupo A: Partículas pequenas que fluidizam em baixa velocidade;
- Grupo B: Partículas que apresentam fluidização com borbulhamento desde o início;
- Grupo C: Partículas muito pequenas, as quais apresentam uma coesão que dificulta a fluidização;
- Group D: material composto de partículas maiores que formam um leito do tipo jorro ao invés da fluidização típica.

No regime de leito de jorro, os principais parâmetros a serem estudados são: a velocidade de jorro mínima (U_{jm}), a queda de pressão de jorro estável (ΔP_s) e a queda de pressão máxima (ΔP_M). Por meio da curva fluidodinâmica pode-se representar o mecanismo de transição de um leito fixo para um leito de jorro. A curva fluidodinâmica caracteriza-se por representar valores de queda de pressão versus velocidade do fluido, **Figura 3**.

Figura 3. Curva fluidodinâmica típica de queda de pressão versus velocidade superficial do gás para o leito de jorro



Fonte: Mathue e Epstein (1974).

H=Altura de leito fixo; U_{jm} = Velocidade de jorro mínima; U_M = Velocidade referenciada à máxima queda de pressão; ΔP_M = Queda de pressão máxima; ΔP_S = Queda de pressão de jorro estável.

A velocidade de jorro mínima (U_{jm}) representa a mínima velocidade necessária do gás para que haja o regime de jorro, depende das propriedades das partículas inertes presentes na câmara, da geometria da câmara e do fluido utilizado. Além disso, há também a velocidade do jorro incipiente que representa a velocidade mínima para iniciar o regime, seus valores apresentam-se mais elevados que a velocidade de jorro mínima, já que a energia necessária para iniciar o processo é maior que a necessária para manter o regime. Já a queda de pressão máxima (ΔP_M) e a queda de pressão incipiente (ΔP_S), representam a maior e a menor variação no valor da pressão, respectivamente (MATHUR e EPSTEIN,1974).

A partir desses conceitos pode-se analisar e descrever as observações que decorrem do aumento da velocidade superficial do fluido, ilustrados pela curva fluidodinâmica da **Figura 3**.

Com um aumento gradual da velocidade do fluido há também um aumento da queda de pressão, uma vez que a passagem de ar entre as partículas inertes provoca um empacotamento das partículas, o que aumenta a resistência a passagem de fluido (pontos A –B).

Aumentando-se a velocidade além do ponto B, há o início da diminuição na queda de pressão, uma vez que a altura da cavidade interna criada pelo fluido na região de jorro torna-se maior que a altura das partículas compactadas. Dessa maneira o espaço criado diminui a queda de pressão (pontos B e C). Com um leve aumento de velocidade a partir do ponto C, conhecido como ponto de jorro incipiente, nota-se que há uma abrupta redução na queda de pressão. Isso ocorre devido ao rompimento do jorro interno através da superfície do leite, o que causa uma redução repentina da concentração de sólidos acima da região jorro e, conseqüentemente, uma diminuição da queda de pressão. Entre os pontos (C) e (D) situa-se a região de jorro estável, e o aumento da velocidade acarreta em um aumento da altura da fonte na câmara. Com isso, a queda de pressão torna-se praticamente constante.

2.3. Secagem de pastas em leite de jorro

A secagem de pastas e líquidos em leite de jorro empregando partículas inertes foi inicialmente desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Leningrado (URSS) como uma alternativa em processos de secagem como o *spray dryer*, segundo Mathur e Epstein (1974). Esta técnica se mostrou adequada para a secagem de uma grande variedade de pastas e suspensões, resultado na obtenção de pós homogêneos e finos. O processo de secagem de pastas e líquidos em leite de jorro com a presença de inertes, apresenta vantagens e desvantagens. Como vantagens tecnológicas inerentes podemos citar o movimento cíclico das partículas, o que resulta em uma mistura intensa dos inertes, um maior contato entre gás e sólido, resultando em uma alta taxa de transferência de calor e de massa. Outras vantagens são processos conduzidos de forma contínua, semi-contínua e batelada; equipamento de fácil operação; baixo custo e uma boa secagem para materiais sensíveis termicamente (MEDEIROS et al, 2004; PHAM, 1983; ROCHA e TARANTO, 2008).

Em relação as desvantagens, tem-se principalmente as limitações do processo, pois é de difícil ampliação de escala, uma capacidade de secagem limitada (máxima) e uma vazão limitada de alimentação (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Em relação ao processo, a instabilidade dinâmica, a aglomeração de partículas e a deposição de pó na coluna são os maiores problemas encontrados no emprego de leitos móveis. Portanto, com o intuito de amenizar tais problemas,

verifica-se a necessidade de se obter as melhores condições operacionais para cada material empregado.

Pesquisas sobre a secagem de pastas em leito de jorro vem se destacando nas últimas décadas. Segundo Weltman (1960) uma pasta pode ser definida como um sistema constituído de partículas microscópicas ou coloidais em um meio líquido, como polpas de frutas, sangue animal e extratos vegetais.

O processo de secagem tem por objetivo aumentar a resistência do produto contra a ação de microrganismos que podem se proliferar, devido à umidade. Além disso, aumentar a estabilidade do produto e evitar possíveis reações de degradação. Dessa maneira, deseja-se retirar a umidade sem que haja uma modificação muito grande das propriedades químicas e nutricionais do material desidratado, assim existem poucos métodos de secagem que atendem os requisitos exigidos pela indústria (SPITZNER NETO, 2001).

O processo de secagem em leito de jorro consiste em atomizar ou gotejar a pasta sobre o leito móvel de partículas inertes, com o intuito de recobri-las e, com a passagem de ar, secar a pasta. A corrente de ar ascendente passa pelos inerte e retira a umidade do produto até um valor crítico. Devido ao o atrito entre as partículas inertes recobertas e entre as partículas e a parede da câmara, a pasta seca torna-se quebradiça e, conseqüentemente, forma-se um pó que é removido via ciclone e armazenado (MARKOWSKI,1992).

Diversas pesquisas foram conduzidas com o objetivo de compreender mais detalhadamente os aspectos fluidodinâmicos durante os processos de secagem de pasta em leito de jorro. A partir destes estudos foi possível aprofundar o conhecimento sobre a estabilidade fluidodinâmica do leito, baseando-se nos parâmetros de queda de pressão (ΔP), altura da fonte (h) e velocidade do gás (U). A grande maioria das pesquisas indicam que a queda de pressão diminui na presença de pastas. Patel et al (1986) e Schneider e Bridgewater (1993) constataram que, com a adição de pasta, a vazão de ar na região anular é reduzida, ou seja, o ar é canalizado para a região de jorro, o que causa uma redução da queda de pressão global. A pasta gotejada aumenta a força de interação entre as partículas inertes, diminuindo também o movimento na região anular.

Concluiu-se que há um aumento da altura da fonte (h) à medida que a vazão de gás é aumentada. No entanto, quando há a presença da pasta é necessária uma maior altura para o funcionamento estável do jorro. Patel et al (1986) e Schneider e Bridgewater (1993) concluíram que quanto maior é o volume de pasta, maior é o aumento das forças entre as partículas e, conseqüentemente, maior será a vazão de ar e a altura necessária para manter o jorro estável.

Em relação a velocidade de jorro mínima, resultados divergentes podem ser encontrados na literatura. Os resultados obtidos por Passos e Mujumdar (2000) com o uso de glicerol em um leito de jorro bidimensional mostraram um aumento da U_{jm} com a adição da pasta. Já Schneider e Bridgewater (1993) observaram uma redução na U_{jm} com a utilização de glicerol. Bacelos et al (2005) concluíram que essa divergência foi causada pelas diferentes geometrias dos equipamentos utilizados.

A geometria não é o único fator capaz de ocasionar mudanças no comportamento dos valores de U_{jm} com adição de pastas, pois as propriedades da pasta também podem influir na variação deste parâmetro. Bacelos et al.(2005) verificaram que, ao secar uma pasta de ovo homogeneizada, os valores de U_{jm} apresentaram uma elevação, o oposto do discutido acima para a alimentação de glicerol. Essa tendência conflitante é explicada pela natureza das pontes formadas entre as partículas inertes, que no caso da pasta de ovo era semi-sólida (ocorre evaporação), ao invés de líquida, como no caso do glicerol. Esse raciocínio está de acordo com os dados de Reyes (1993 apud PASSOS et al., 1997), para a evaporação de uma suspensão de alumina.

Costa (2015) realizou um estudo baseado na influência das variáveis operacionais na secagem de polpa de açaí em leito de jorro. O trabalho consistiu na avaliação da influência da temperatura do ar de secagem, da vazão de ar de secagem e da concentração de maltodextrina sobre as respostas de eficiência de produção de pó, teor de umidade final e concentração de antocianinas. Com o estudo, obteve-se uma condição ótima de operação que permitiu uma produção de um pó com boa escoabilidade, baixa umidade e grande potencial nutritivo, indicando que a produção de pó de açaí em leito de jorro é viável em escalas laboratoriais.

2.4. Transferência de calor e massa em leite de jorro

No processo de secagem de pastas em leite de jorro a transferência de calor e massa ocorre simultaneamente. Em um primeiro momento, a passagem do gás à temperatura de processo aquece o leite de partículas inertes. Com o início da alimentação da pasta o leite se torna molhado e a pasta recobre gradativamente a superfície das partículas inertes, formando uma fina película de material (mistura de líquido e sólidos). O líquido sobre a superfície dos inertes é seco devido à transferência de calor por condução do próprio inerte e devido à transferência de calor por convecção a partir do ar quente que percola o leite (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Em leitos de jorro, as distintas características do fluxo de gás em torno das partículas inertes resultam em uma maior dificuldade para descrever a transferência de calor e massa. Na região de jorro o fluxo de gás é ascendente e a concentração de partículas inertes é consideravelmente menor quando comparado à região anular onde o movimento dos inertes é descendente e a concentração é maior. Ainda, a velocidade de circulação das partículas inertes difere em cada região sendo maior na região de jorro e fonte e menor na região anular (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Usualmente, considera-se que a transferência de calor ocorre apenas externamente, ou seja, despreza-se o fluxo de energia o interior das partículas inertes. Tal consideração também é aplicada para situações em que há transferência de massa simultaneamente, nas quais as superfícies das partículas inertes estão recobertas pela pasta a uma temperatura uniforme (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Uma das metodologias empregada para descrever a transferência de calor consiste em assumir que o leite de jorro possui duas regiões distintas, região de jorro e a região anular. Dessa maneira, a geometria e a estrutura do leite de jorro são consideradas corretamente, no entanto, a área de troca térmica em cada região é um parâmetro complexo de ser determinado (ENGLART e KMIEC, 2009).

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever a transferência de calor no processo de secagem em leite de jorro, porém exigem soluções matemáticas sofisticadas para serem empregados. Um exemplo de modelo foi proposto por Oliveira e Freire (1996) os quais analisaram a taxa de evaporação do leite de jorro por meio de balanços de massa e energia durante a secagem das partículas inertes, considerando a existência de 3 regiões no processo: região anular, de jorro e fonte.

Uma outra metodologia para analisar a transferência de calor no leito de jorro consiste em relacionar o coeficiente de transferência de calor por convecção com a área superficial total das partículas inertes presentes no leito. Diversas correlações baseadas nesta metodologia foram desenvolvidas e são apresentadas na literatura da área. Algumas delas são apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Correlações de transferência de calor em leito de jorro

Referências	Correlação
Uemaki e Kugo ¹ (1967)	$Nu = 0.0005 \cdot Re^{1.46} \cdot \left(\frac{U_s}{U_{ms}}\right)^{1.30}$
Reger et al ¹ (1967)	$Nu = 0.0597 \cdot Re^2 \cdot Ar^{-0.438} \cdot Gu^{0.61} \cdot \left(\frac{H}{dp}\right)^{-1}$
Kmiec (1980) ²	$Nu = 0.897 \cdot Re^{0.464} \cdot Pr^{0.333} \cdot Ar^{0.116} \cdot \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{-0.852} \cdot \left(\frac{H}{dp}\right)^{-1.19} \cdot f\emptyset^{0.8326}$
Kucharski e Kmiec ² (1993)	$Nu = 9.4723 \cdot Re^{0.516} \cdot Pr^{0.333} \cdot Ar^{0.2302} \cdot \left(\frac{H}{dp}\right)^{-1.031} \cdot \left(\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g}\right)^{0.8135} \cdot (1 - C_s)^{0.795} \cdot f\emptyset^{0.8326}$
Rocha et al. ² (1995)	$Nu = 0.9892 \cdot Re^{1.6421} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H \cdot f\emptyset}{dp}\right)^{-1.3363} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{pasta}}{\dot{m}_g}\right)^{0.71} \cdot \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{0.1806}$

^{1, 2}= diferentes formas de expressar o número de Reynolds.

As características das partículas e dos fluidos e as características geométricas do leito são utilizadas para estimar o número de Nusselt (Nu). Dessa forma, encontram-se nas correlações empíricas, os seguintes fatores: d_p = diâmetro da partícula (m); U_{jm} = velocidade de jorro mínimo (m/s); ρ_g = densidade do gás (kg/m³); μ_g = viscosidade absoluta do gás (Pa.s); U_s = velocidade superficial do gás tendo como referência o diâmetro da seção cilíndrica do leito (m/s); H = altura de leito fixo (m); θ = ângulo de inclinação da base cônica; $f\emptyset$ = fator de esfericidade de partícula; \dot{m}_s = vazão mássica de água (kg/s); \dot{m}_g = vazão mássica de ar (kg/s); C_s = concentração de sólidos na pasta (kg/kg); \dot{m}_{pasta} = vazão mássica da pasta (kg/s).

As características físicas das partículas inertes, as propriedades do fluido, as características geométricas do sistema e os números adimensionais são necessários para o estudo da transferência de calor e massa. As definições dos números adimensionais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Números adimensionais na transferência de calor e massa.

Números Adimensionais	
Reynolds da partícula ¹	$Re_p = \frac{U_{jm} \cdot d_p \cdot \rho_g}{\mu_g}$
Reynolds da partícula ²	$Re_p = \frac{U_s \cdot d_p \cdot \rho_g}{\mu_g}$
Arquimedes	$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g}$
Prandt	$Pr = \frac{\mu_g \cdot cp_g}{k_g}$
Nusselt	$Nu = \frac{h \cdot d_p}{k_g}$
Gukhman	$Gu = \frac{T_{bs} - T_{bu}}{T_{bs}}$
Schmidt	$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AB}}$
Sherwood	$Sh = \frac{K_m \cdot d_p}{D_{AB}}$

Sendo: cp_g = calor específico do gás (J/kg.K]; k_g = coeficiente de condutividade térmica do gás (W/m.K]; h = coeficiente de transferência de calor por convecção do gás (W/m².K] ; D_{AB} = coeficiente de difusividade de massa (m²/s]; K_m = coeficiente de transferência de massa por convecção (m²/s].

Em relação à transferência de massa, destacando como agente direto o ar, pode ser identificado duas etapas principais: evaporação da água contida na pasta e transferência para o ar; remoção da umidade do sistema pela corrente de ar que deixa o equipamento. A teoria da evaporação de um líquido em um fluxo de gás supõe que o vapor presente na interface gás-líquido está saturado, ou seja, que as condições de equilíbrio termodinâmico se estabelecem na interface. Conseqüentemente, a taxa de evaporação depende da taxa de remoção do vapor da superfície do líquido por meio de difusão e convecção de massa (DLOUHY, 1957).

Na câmara de secagem, as gotículas da pasta e o filme de pasta sobre as partículas inertes recebem energia até atingir a temperatura de bulbo úmido, iniciando-se a evaporação da água. O vapor de água é então levado para fora do sistema pela corrente de ar que atravessa o leito. Assim como na transferência de calor, é possível estudar a transferência de massa relacionando o coeficiente de transferência de massa por convecção à área superficial total das partículas inertes presentes no leito. Na Tabela 3 são apresentadas algumas correlações baseadas nesta metodologia.

Tabela 3. Correlações de transferência de massa em leito de jorro

Referências	Correlação
Uemaki e Kugo ² (1967)	$Sh = 0.00022.Re_p^{1.45} \cdot \left(\frac{D_c}{H}\right)$
Kmiec ² (1975)	$Sh = 0.829.Re_p^{0.687}.Sc^{0.333}.Ar^{0.031}.tg\left(\frac{\theta}{2}\right)^{-0.915} \cdot \left(\frac{H}{d_p}\right)^{-1.227} \cdot f\phi^{1.754}$
Kmiec e Kucharski ² (1993)	$Sh = 5.314.Re_p^{1.072}.Sc^{0.333} \cdot \left(\frac{H}{d_p}\right)^{-0.901} \cdot \left(\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g}\right)^{0.687} \cdot (1 - C_s)^{0.533} \cdot f\phi^{0.164}$
El-Naas et al. ² (2000)	$Sh = 0,000258.Re_p^{1,66}$
Kmiec, Englart e Ludwinska (2009)	$Sh = 0,0095.Re_p^{0,843}.Sc^{0,333}.Ar^{0,172}.Gu^{-2,586} \cdot \left(\frac{d_0}{d_p}\right)^{3,124} \cdot \left(\frac{D_b}{d_p}\right)^{-4,078} \cdot \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_g}\right)^{0,605} \cdot \phi^{-1,31}$

²= expressão empregada para o cálculo no número de Reynolds

Paras essas correlações, além dos fatores informados anteriormente temos: D_c = diâmetro da seção transversal da base cilíndrica do leito (m]. A temperatura do ar na entrada do leito (T_e) e a temperatura do ar de saída do leito (T_f) são empregadas no cálculo da média aritmética da temperatura na qual as propriedades do ar são determinadas.

2.5. Contextualização do trabalho

A amora preta apresenta um alto valor nutricional e um grande potencial de aplicação na área de corantes naturais (LEE et al, 2005). Todavia, a amora é um fruto que apresenta dificuldades para ser comercializada *in natura*, já que é sazonal, climatérico e altamente perecível (EMBRAPA, 2008). A secagem da polpa de amora em leito de jorro se destaca como uma alternativa para a obtenção de um produto em pó com uma maior vida de prateleira, sem grandes alterações nas características nutricionais, reduzindo-se os gastos com transporte e armazenamento (BRAGA, 2014).

Tendo em vista as diversas possibilidades de formulações, Braga (2014) estudou a secagem de misturas leite concentrado-polpa de amora em leito de jorro convencional (cônico-cilíndrico). A formulação otimizada da pasta foi obtida pela mistura de 25% em volume de leite concentrado (concentração de sólidos de aproximadamente 0,485 kg/kg) e 75% em volume de polpa de amora *in natura* (concentração de sólidos de aproximadamente 0,061 kg/kg), pasta leite concentrado-polpa de amora (25%-75%, v/v).

Almeida (2002) realizou um estudo da fluidodinâmica de sementes de brócolis em leito de jorro cônico-cilíndrico. A partir dos gráficos de queda de pressão versus vazão do ar foram obtidos os valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. A queda de pressão máxima ocorreu exatamente antes de haver o estabelecimento do jorro, $\Delta P_M = 732$ Pa. A vazão mássica de jorro mínimo (W_{jm}) obtida foi de 0,34 kg/min. Os valores de ΔP_M e W_{jm} foram comparados com valores obtidos por equações empíricas da literatura e o erro relativo foi calculado a fim de comparar os resultados obtidos. A equação que apresentou o menor desvio relativo para a obtenção da velocidade de jorro mínimo foi a proposta por Tsvik et al (1967), com um desvio médio menor que 20%. As demais equações apresentaram desvios relativos maiores que 20%. Já para a queda de pressão máxima foram obtidos desvios relativos que variaram de 0,1% a 129%. As melhores previsões para a ΔP_M foram obtidas a partir das correlações de San Jose et al. (1996) e Pallai e Nemeth (1969), para todas as cargas de sólidos.

Wachiraphansakul e Sakamon Devahastin (2007) estudaram a cinética de secagem de resíduo de soja em leito de jorro cônico-cilíndrico modificado, com um bocal para a entrada de ar mais largo quando comparado a leitos de jorro convencionais. Realizaram-se ensaios em diferentes temperaturas e diferentes vazões do ar de entrada, obtendo-se os valores de consumo específico de energia em cada ensaio. Os autores puderam determinar as melhores condições para a secagem com o intuito de se manter uma alta concentração de proteína no produto concentrado. Os resultados de consumo específico de energia variaram de 3,89 a 5,89 MJ/

Brito et al. (2018) estudou o consumo específico de energia para os processos de secagem de pasta de alumina e de leite desnatado em duas configurações de leito de jorro. A primeira configuração utilizada foi um leito de jorro convencional e a segunda configuração se baseou no leito de jorro equipado com um parafuso helicoidal. Os experimentos resultaram em um maior consumo específico de energia no leito de jorro modificado, o que pode ser justificado pela energia requerida para rotacionar o parafuso durante o processo (a eficiência energética variou de aproximadamente 75% a 10%).

Aronson (2019) realizou um estudo buscando uma melhor eficiência na transferência de massa por meio do uso de um leito fluidizado. Para isso, utilizou-se 2 tipos de sólidos inertes fluidizáveis: partículas de sílica-gel e areia de olivina com diâmetro médio variando entre 6,35 e 25,4 mm e com densidades de 690 kg/m³ e 1550 kg/m³, respectivamente. Utilizou-se também sólidos empacotados: esferas de silicato de alumínio com densidade de 1400 kg/m³ (com diâmetros de 25,4, 12,7 e 6,35 mm) e argila expandida com densidade de 280 kg/m³ e diâmetro de 12 mm.

Com o intuito de avaliar o processo em termos de eficiência de produção de pó e qualidade do produto, utilizou-se como material inerte partículas de poliestireno (PS) e de polipropileno (PP). Em um primeiro momento, uma matriz de planejamento foi construída e as variáveis independentes analisadas foram: temperatura do ar de entrada (60 °C – 80 °C); vazão de alimentação da pasta (2 mL/min – 4 mL/min); pressão de atomização da pasta (68947 Pa – 137893 Pa). Utilizou-se como material inerte o polipropileno (massa de 1,4 kg) e uma velocidade do ar de $1,2.U_{jm}$.

O melhor resultado de eficiência de produção de pó foi obtido para uma vazão de alimentação de 2 mL/min e temperatura de 60 °C (33,84%). Com o intuito de aumentar o rendimento, testou-se uma alimentação da pasta por gotejamento, mantendo-se uma vazão de alimentação de 2 mL/min e temperatura de 60 °C (nestas condições de processo a eficiência de produção de pó aumentou para 43,92%). Posteriormente, o poliestireno foi utilizado como material inerte em substituição ao polipropileno, mantendo-se a vazão de alimentação de 2 mL/min, a temperatura do ar de entrada de 60 °C e a alimentação da pasta por gotejamento, o que resultou em uma eficiência de 63,82%.

A caracterização física dos inertes poliestireno (PS) e polipropileno (PP) também foi realizada e os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização das partículas inertes (Braga, 2014)

Material	PP	Desvio	PS	Desvio
		Médio		Médio
Diâmetro médio- d_p (mm)	3,14	0,18	5,19	0,26
Esfericidade- ϕ	0,74	0,06	0,87	0,03
Densidade <i>bulk</i> - ρ_{bulk} (kg/m ³)	610,5	6,3	663,2	4,6
Densidade real- ρ_{real} (kg/m ³)	907,8	0,5	1051,9	1,2
Porosidade do leito- ϵ (%)	39,25	-	36,85	-
Fator de esfericidade- $f\phi$	1,35	-	1,15	-

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. O processo de secagem em leito de jorro e o conteúdo de umidade dos pós

A Figura 4 apresenta o sistema experimental utilizado por Braga (2014) para a realização dos ensaios de secagem. O equipamento utilizado na condução dos ensaios foi o leito de jorro cônico-cilíndrico construído em acrílico Plexiglas[®], com uma coluna cilíndrica de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura. A base cônica possuía altura de 17 cm, diâmetro do orifício de entrada do ar de 3 cm e ângulo de inclinação da base cônica de 60°. O leito de jorro era conectado a um ciclone Lapple em aço inox.

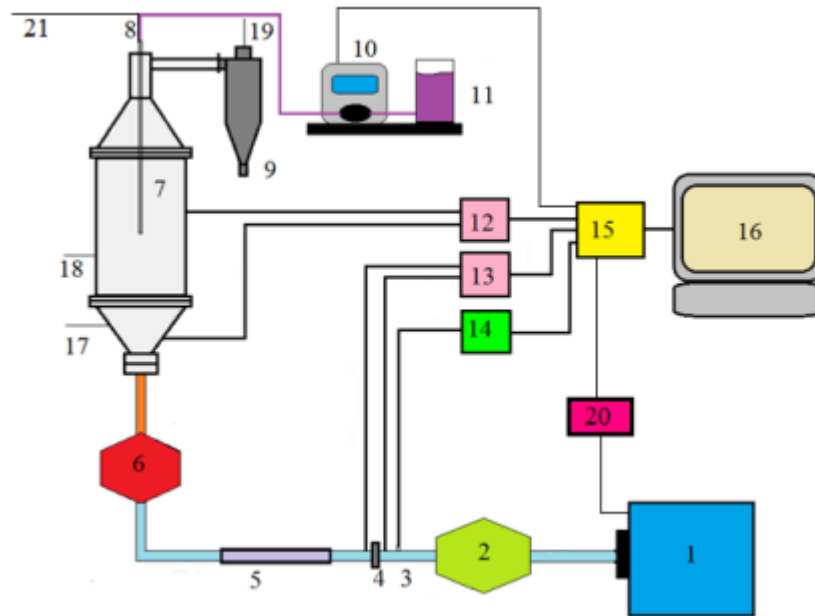
Para produzir a vazão de ar de jorro do processo foi utilizado um soprador (IBRAM modelo CR-10 com 7,5 cv de potência). O ar foi aquecido a partir de um aquecedor elétrico, com potência total de 1220 W, constituído de três resistências, com controlador de temperatura. Para absorver parte da umidade do ar foi utilizado um leito de sílica gel no tubo de aço galvanizado de 53,2 mm de diâmetro interno.

Com o 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 com precisão de $\pm 1,5\%$ e $\pm 0,2$ °C, respectivamente), e termopar de cobre-constantum ligado ao controlador de temperatura, foi realizado o monitoramento do processo. A vazão do ar foi controlada por um inversor de frequência (WEG, modelo CFW 08).

No topo do leito de jorro, o bico atomizador de duplo fluido foi alimentado com ar proveniente da linha de ar comprimido (compressor PRIMAX modelo 40V10 com 10 cv de potência, deslocamento de 0,01833 m³/s e pressão máxima de 12,3x10³cm de H₂O), e a pasta enviada ao bico atomizador por meio de uma bomba peristáltica (Masterflex, modelo L/S 7523-20, EUA, com capacidade de 2 a 130 mL/min).

Uma outra forma de alimentação da pasta foi o gotejamento a partir da extremidade de uma mangueira (diâmetro interno da mangueira de 1,6 mm), sobre a fonte de partículas inertes em regime de jorro estável (BRAGA, 2014).

Figura 4- Esquema experimental disponível no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem da Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP.



Fonte: Braga, 2014.

(1) soprador; (2) trocador de calor casco e tubos; (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 (atomização ou gotejamento); (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.

O sistema de aquisição de dados era composto por três transdutores de pressão, dois transdutores diferenciais (Cole e Parmer modelo 68014-18 com faixa de leitura de 0 a 6229Pa, sinal de saída de 4 a 20mA e tempo de resposta de 250ms), e um transdutor absoluto (Cole e Parmer modelo 07356-0 com faixa de leitura de 0 a 210KPa e sinal de saída de 1 a 5V). Ao receberem os sinais pneumáticos de pressão do leito, da placa de orifício e da linha, respectivamente, os transdutores de pressão transformam estes sinais em analógicos, enviando-os para o sistema de aquisição de dados (*National Instruments*TM, NIcDAQ 9172, Finlândia), que por meio de um conversor (A/D) transforma os sinais analógicos em digitais e os enviam por conexão USB (*Universal Serial Bus*) para o microprocessador (Intel CoreTM i3 com memória RAM de 4Gb e HD de 500Gb) (BRAGA, 2014).

Para todos os ensaios de secagem, o leito foi carregado com uma carga de inertes (PP ou PS, M= 1,4 kg), pré-fixada a partir da análise fluidodinâmica. A vazão de ar de processo foi definida como $W_{ar} = 1,2.W_{jm}$. A temperatura na entrada do leito (T_e) foi controlada e o ar aquecido pelo conjunto de resistências. A temperatura e umidade relativa do ar foram acompanhadas na entrada e saída do leito durante o processo. Quando o sistema entrou em regime permanente em função da temperatura de entrada e de saída, iniciou-se o processo de secagem com a alimentação da pasta. A partir de testes preliminares, fixou-se a altura dos dispositivos de alimentação em aproximadamente 13 cm acima da superfície do leito fixo.

A Tabela 5 apresenta as condições operacionais de 8 ensaios de secagem de pasta leite concentrado-polpa de amora (25%-75% v/v). A partir dos dados coletados durante tais processos, será realizado o estudo das transferências de calor e massa. A umidade do pó foi determinada a partir da secagem de 1g de amostra em estufa a vácuo de 67727,8 Pa por 24 horas a 70 °C, em triplicata.

Segundo Braga (2014) a pasta leite concentrado-polpa de amora preta (25%-75%, v/v) apresentou valor de densidade de 1046,9 kg/m³ com desvio médio de 0,5 kg/m³ e um valor de concentração de sólidos de 0,167 kg/kg com desvio médio de 0,002 kg/kg.

Tabela 5 – Condições operacionais dos processos de secagem.

Ensaio	Inerte	P _{atm} (psig)	\dot{V}_{alim} (mL/min)	T _{alim} (°C)	T ₁ (°C)	Y ₁ (kg/kg)	T _{amb.} (°C)
1	PP	10	2	23,5	60	0,0059	23,5
2	PP	20	2	24,6	60	0,0086	24,6
3	PP	20	4	25	60	0,0037	25
4	PP	10	4	23	80	0,0037	23
5	PP	15	3	20,85	70	0,0014	20,85
6	PP	GOT	2	19,85	60	0,0093	19,85
7	PS	GOT	2	22	60	0,0082	23,8
8	PS	GOT	2	21,3	60	0,0147	24,7

*GOT= alimentação por gotejamento da pasta. Onde: \dot{V}_{alim} = vazão volumétrica de alimentação da pasta; T₁ = temperatura do ar de entrada; P_{atm} = pressão de atomização da pasta; Y₁ = umidade absoluta do ar na entrada do leito de jorro.

Tabela 6 – Condições operacionais dos processos de secagem.

Ensaio	\dot{m}_{ar} (kg/s)	T_2 (°C)	Y_2 calculado (kg/kg)	$U_{pó}$ (%)	$\dot{m}_{pó}$ (kg/s)
1	$1,7165 \times 10^{-2}$	54,03	0,0076	3,50	$1,9792 \times 10^{-6}$
2	$1,6750 \times 10^{-2}$	53,13	0,0102	2,60	$2,0313 \times 10^{-6}$
3	$1,6817 \times 10^{-2}$	49,51	0,007	3,12	$6,2500 \times 10^{-6}$
4	$1,6195 \times 10^{-2}$	66,18	0,0072	3,10	$6,2500 \times 10^{-6}$
5	$1,6293 \times 10^{-2}$	61,35	0,0065	2,66	$1,1458 \times 10^{-6}$
6	$1,6704 \times 10^{-2}$	52,27	0,011	1,12	$2,7604 \times 10^{-6}$
7	$1,6819 \times 10^{-2}$	50,02	0,0098	2,97	$2,1717 \times 10^{-6}$
8	$1,6541 \times 10^{-2}$	48,90	0,0164	4,54	$2,5800 \times 10^{-6}$

3.2 Balanço de massa e energia

A taxa de calor adicionada ao sistema para o aquecimento do ar de secagem (q_1) pode ser definida como o somatório de taxas de calor, quais sejam: calor requerido para aquecer a pasta até a temperatura de bulbo úmido (q_2); calor requerido para evaporar a água presente na pasta (q_3); calor requerido para aquecer o produto em pó até a temperatura do ar de saída (q_4); calor perdido com o ar de saída, pelas paredes do equipamento, etc. (q_5).

$$q_1 = \sum_{i=2}^5 q_i \quad (5)$$

$$q_1 = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p ar,1} \cdot (T_1 - T_{amb.}) \quad (6)$$

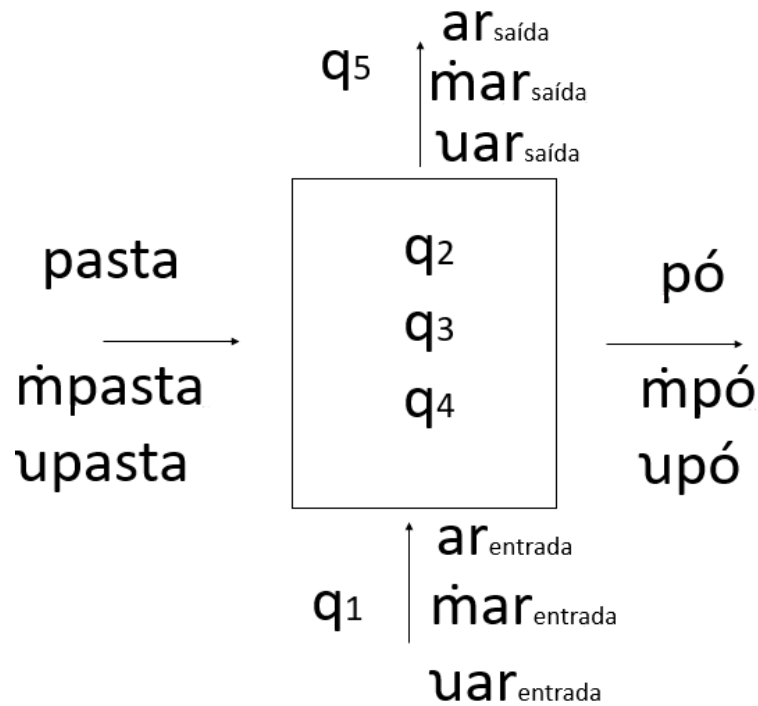
$$q_2 = \dot{m}_{alim} \cdot c_{p pasta} \cdot (T_{bu} - T_{alim}) \quad (7)$$

$$q_3 = \dot{m}_v \cdot \lambda_{vap,Tbu} \quad (8)$$

$$q_4 = \dot{m}_{pó} \cdot c_{p pó} \cdot (T_2 - T_{bu}) \quad (9)$$

$$q_5 = q_1 - q_2 - q_3 - q_4 \quad (10)$$

Figura 5 - Fluxograma experimental do balanço de energia



Fonte: Rafael, 2019

Louzi, Braga e Rocha (2019) determinaram o calor específico (c_p) da pasta e do pó obtidos a partir da mistura leite concentrado-polpa de amora (25%-75%, v/v), via curvas de DSC, baseando-se na norma ASTM E-1269 (2018). Utilizou-se a alfa-alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) como amostra de referência por ser um material quimicamente estável no ar, com elevado ponto de fusão (2030 °C), não volátil, não higroscópico e por não apresentar transições sólido-sólido (GINNINGS E FURUKAWA, 1953). Para as amostras de pasta e de pó, gerou-se modelos matemáticos para determinação do calor específico em função da temperatura, para diferentes faixas de temperatura.

As faixas de temperatura foram determinadas previamente, tendo-se como critério temperaturas nas quais o equipamento e as amostras mantiveram estabilidade de fluxo de calor, com inclinação da linha base para que ocorresse variação do calor específico da amostra até a temperatura em que as amostras exigissem mais calor para que ocorresse mudança de fase, não gerando, desta forma, valores duvidosos de c_p (PINTO, 2011). Os modelos empíricos de capacidade calorífica foram empregados no cálculo do calor requerido para aquecer a pasta até a temperatura de bulbo úmido (q_2) e no cálculo do calor requerido para aquecer o produto em pó até a temperatura do ar de saída (q_4), Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Modelos empíricos de capacidade calorífica (J/g.°C) para a pasta leite concentrado-polpa de amora (25%-75%, v/v).

Faixa de T(°C)	Modelo
-50 °C a -20 °C	$C_{p1} = 0,0016.T^2 + 0,1528.T + 5,5256$
10 °C a 50 °C	$C_{p2} = 0,00040.T^2 - 0,0073.T + 4,2326$

Tabela 7 - Modelos empíricos de capacidade calorífica (J/g.°C) para o produto em pó.

Faixa de T(°C)	Modelo
-55 °C a -10 °C	$c_{p1} = 0,0002.T^2 + 0,0191.T + 1,8477$
40 °C a 70 °C	$c_{p2} = 0,0006.T^2 - 0,0170.T + 2,6314$

A eficiência térmica do processo (ξ) pode ser definida como a razão entre o calor efetivo utilizado e o calor total fornecido ao sistema (MASTERS, 1972).

$$\xi = \frac{q_2 + q_3 + q_4}{q_{total}} \quad (11)$$

O consumo específico de energia é definido com a razão entre a energia transferida e a massa de água evaporada, Equação (12).

$$\varepsilon = \frac{(q_1)}{\dot{m}_{alim} \cdot \left[\frac{U_{pasta} - U_{pó}}{1 - U_{pó}} \right]} \quad (12)$$

Onde: ε = consumo específico de energia (J/kg); U_{pasta} = umidade da polpa (kg/kg) b.u.

3.3 Metodologia para determinação do coeficiente de transferência de calor e massa por convecção

A metodologia utilizada para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção foi apresentada por Englart, Kmiec e Ludwinska (2009). Nessa metodologia, considera-se a área total superficial das partículas inertes e a média logarítmica da diferença de temperatura. O intuito será obter um valor experimental de (h) por meio da Equação (12).

$$h = \frac{q}{a \cdot V_o \cdot \Delta T_{ml}} \quad (12)$$

Sendo: h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2.K$]; q = taxa de calor (W]; a = área total superficial das partículas inertes (m^2]; V_o = volume do leito fixo (m^3]; ΔT_{ml} = média logarítmica da diferença de temperatura (K].

A média logarítmica da diferença de temperatura é definida conforme a Equação (13).

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{bs1} - T_{bu1}) - (T_{bs2} - T_{bu2})}{\ln \left(\frac{(T_{bs1} - T_{bu1})}{(T_{bs2} - T_{bu2})} \right)} \quad (13)$$

Sendo: T_{bs1} = Temperatura de bulbo seco na entrada do leito (K]; T_{bu1} = temperatura de bulbo úmido na entrada do leito (K]; T_{bs2} = temperatura de bulbo seco na saída do leito (K]; T_{bu2} = temperatura de bulbo úmido na saída do leito(K].

A área total superficial das partículas inertes será calculada por meio da Equação (14).

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{\phi \cdot d_p} \quad (14)$$

Sendo: ε = porosidade do leito; ϕ = esfericidade as partículas inertes; d_p = diâmetro médio das partículas inertes (m].

A taxa de calor de calor (q) será calculado a partir da taxa mássica de vapor (taxa de evaporação), ou seja, utilizando as Equações (15), (16) e (17).

$$q = \dot{m}_v \cdot \lambda_v + \dot{m}_v \cdot c_{p_a} \cdot (T_{bu} - T_{pasta}) \quad (15)$$

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{ar} \cdot (Y_2 - Y_1) \quad (16)$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\pi \cdot D_c^2 \cdot u \cdot \rho_{ar}}{4 \cdot (Y_2 + 1)} \quad (17)$$

Sendo: \dot{m}_v = taxa mássica de vapor (kg/s]; λ_v =calor latente de vaporização (J/kg]; c_{p_a} = calor específico da água na temperatura de bulbo úmido ($J/kg.K$]; T_{bu} = temperatura de bulbo úmido (K]; T_{pasta} = Temperatura da pasta (K]. \dot{m}_{ar} = taxa massica do ar seco (kg/s]; Y_2 = Umidade

absoluta do ar na saída do leito (kg água/kg ar seco]; Y_1 = umidade absoluta do ar na entrada do leito (kg água/kg ar seco]; D_c = Diâmetro da seção cilíndrica (m]; u = velocidade superficial do gás (m/s]; ρ_{ar} = densidade do ar (kg/m³]

A partir da metodologia proposta é possível obter o coeficiente de transferência de calor por convecção e, conseqüentemente, calcular o número de Nusselt experimental, Equação (18)

$$Nu = \frac{h \cdot d_p}{k_g} \quad (18)$$

k_g = coeficiente de condutividade térmica do fluido (W/m.K].

O valor de k_g foi obtido de maneira análoga ao calor específico do ar, por meio dos valores tabelados presentes no livro produzido por Frank Incropera. A metodologia para determinar o coeficiente de transferência de massa por convecção foi proposta por Kmiec, Englart e Ludwinska (2009). Considera-se a área total superficial das partículas inertes e a média logarítmica da diferença de concentração, equações (19) e (20).

$$k_m = \frac{\dot{m}_v}{a \cdot V_o \cdot \Delta C_{AML}} \quad (19)$$

$$\Delta C_{AML} = \frac{Y_2 \cdot \rho_{ar2} - Y_1 \cdot \rho_{ar1}}{\ln \left[\frac{(Y_{sat} \cdot \rho_{sat} - Y_1 \cdot \rho_{ar2})}{(Y_{sat} \cdot \rho_{sat} - Y_1 \cdot \rho_{ar1})} \right]} \quad (20)$$

Sendo: \dot{m}_v = taxa mássica de vapor (kg/s]; a = área total superficial das partículas inertes (m²]; V_o = volume do leito fixo (m³]; Y_2 = Umidade absoluta do ar na saída do leito; do leito (kg água/kg ar seco]; Y_1 = umidade absoluta do ar na entrada do leito (kg água/kg ar seco]; Y_{sat} = umidade em condições de saturação (kg água/kg ar seco] ρ_{ar2} = densidade do ar na saída do leito (kg/m³]; ρ_{ar1} = densidade do ar na entrada do leito (kg/m³]; ρ_{sat} = densidade do ar saturado (kg/m³].

O volume do leito fixo foi medido por Braga (2014) durante a coleta de dados experimentais. Já as massas específicas de ar e de saturação (ρ_{ar} e ρ_{sat}) são resultantes do uso do software Sugar Engineer, analogamente a temperatura de bulbo úmido

Assim, obtendo-se o valor do coeficiente de transferência de massa (k_m), é possível calcular os respectivos valores de Sherwood e comparar os resultados experimentais com os calculados

a partir de correlações clássicas da literatura, Tabelas 1 e 3. Os resultados experimentais e teóricos serão confrontados a partir da determinação do desvio relativo (DR), Equação 21.

$$\text{DR (\%)} = \left[\frac{V_{\text{cal}} - V_{\text{exp}}}{V_{\text{exp}}} \right] \cdot 100 \quad (21)$$

Onde: V_{cal} = valor calculado; V_{exp} = valor determinado experimentalmente

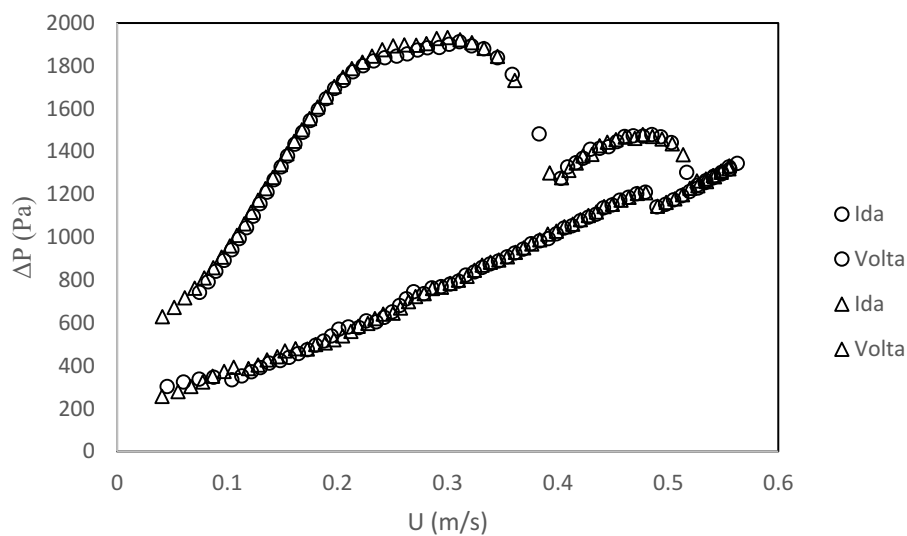
4. RESULTADOS

4.1. Curvas Fluidodinâmicas

As curvas fluidodinâmicas para o inerte poliestireno (PS) e para o inerte polipropileno (PP) foram construídas precedendo cada ensaio de secagem. O objetivo foi determinar a correta velocidade de jorro mínimo (U_{jm}) e assim a correta velocidade do ar de processo ($U = 1,2 \cdot U_{jm}$), empregando-se uma massa fixa de inertes de 1,4 kg.

Para o polipropileno a queda de pressão máxima média no leito foi de 1371,2 Pa e a velocidade de jorro mínimo média foi de 0,463 m/s. Como exemplo, a Figura 6 apresenta as curvas fluidodinâmicas para o inerte PS empregando uma massa de 1,4 kg, em duplicata. A partir das curvas decrescentes de velocidade, observou-se que a velocidade de jorro mínimo foi de 0,4898 m/s e 0,4904 m/s. A partir das curvas crescentes de velocidade, observou-se que a queda de pressão máxima no leito foi de 1850,78 Pa e 1932,45 Pa.

Figura 6: Curva fluidodinâmica para o inerte poliestireno ($M = 1,4$ kg).



Fonte: Braga, 2014

Melo (2015) realizou em seu estudo a distinção de regimes fluidodinâmicos pela medição da variação da pressão. Foi utilizado um leito de jorro cônico-cilíndrico e diferentes materiais como inertes (partículas de vidro, polietileno em forma de pastilhas e de pellets, poliuretano e sementes de soja e arroz com casca). A altura do leito fixo e o diâmetro de coluna foram fixados em uma relação de 1:1 e 1,5:1 e as medições de pressão foram realizadas em um ponto

localizado logo acima do orifício de entrada de ar. A partir das curvas de queda de pressão no leito versus velocidade do ar foi possível determinar os parâmetros fluidodinâmicos.

Os sistemas estudados apresentaram um comportamento padrão para o leito de jorro, tornando-se simples a determinação dos parâmetros fluidodinâmicos e a identificação dos regimes de contato sólido-gás: leito fixo; jorro interno; jorro estável. O emprego de partículas de vidro, cuja massa específica é elevada, em uma relação de 1:1 de altura de leito fixo/diâmetro do orifício de entrada permitiu apenas o estudo do regime de leito fixo. Para tal sistema, o soprador de ar empregado não possuía a potência necessária para vencer a máxima queda de pressão exigida pelo leito.

Para o sistema utilizando polietileno se atingiu o regime estável com a menor velocidade dentre todos os sólidos, velocidade de jorro mínimo de 0,56 m/s e uma queda de pressão máxima de 1916,15 Pa. Constatou-se assim valores de parâmetros fluidodinâmicos para o poliestireno próximos aos encontrados em nosso trabalho (velocidade de jorro mínimo média de 0,49 m/s e queda de pressão máxima média de 1891,61 Pa).

Marques (2007) em sua pesquisa sobre o recobrimento de partículas em leito de jorro cônico-cilíndrico com atomização na base do equipamento, estudou o comportamento fluidodinâmico dos inertes, as propriedades de adesão entre partícula-suspensão, o crescimento das partículas e a eficiência do processo. Seus ensaios foram realizados em escala laboratorial, utilizando diversos inertes como o vidro, o ABS[®], o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS). A massa de inertes empregada no estudo fluidodinâmico foi de: 4,1 Kg, de vidro, 1,5 Kg de ABS[®], 1,4 Kg de polipropileno e 1,7 Kg de poliestireno. A autora obteve valores de queda de pressão máxima para o polipropileno de 1291 Pa e para o poliestireno de 1605 Pa. Além disso, a velocidade de jorro mínima foi de 0,312 m/s para o polipropileno e 0,392 m/s para o poliestireno.

Golshan et al. (2018) estudou o desenvolvimento de uma correlação para a determinação da velocidade de jorro mínimo em leitos de jorro cônicos cilíndricos com partículas de alta densidade. No estudo, utilizou-se três tipos de partículas inertes: zircônia; zircônia enriquecida com alumina; esferas de vidro. Os resultados obtidos mostraram a influência dos parâmetros operacionais (tamanho do leito, altura do leito estático, diâmetro do orifício de entrada do ar, densidade das partículas sólidas, tamanho das partículas sólidas e ângulo do cone), em relação à queda de pressão no leito de jorro e velocidade de jorro mínima. Concluiu-se que a queda de pressão no leito de jorro aumentou com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do ar e da densidade das partículas inertes. Além disso, os resultados obtidos mostraram que a

velocidade de jorro mínimo aumentou com o aumento do tamanho e densidade das partículas inertes, comportamento observado em nosso trabalho.

4.2 Balanço de Energia

Os resultados obtidos no cálculo do balanço de energia para diferentes condições de processo, encontram-se na *Tabela 8*. Calculou-se o calor requerido para aquecer o ar da temperatura ambiente até a temperatura de processo (q_1), o calor requerido para aquecer a pasta até a temperatura de bulbo úmido (q_2), o calor necessário para evaporar a água (q_3), o calor necessário para aquecer o pó da temperatura de bulbo úmido até a temperatura do ar de saída (q_4), o calor perdido (q_5), a eficiência energética do processo de secagem (ξ) e o consumo específico de energia (ε).

Tabela 8- Resultados dos cálculos de balanço de energia.

Análise	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6	E.8	E.9
q_1 (J/s)	631,55	597,72	593,34	931,45	807,63	676,07	600,13	565,29
q_2 (J/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,96
q_3 (J/s)	68,44	68,32	137,29	136,84	102,85	68,59	68,71	68,10
q_4 (J/s)	0,12	0,11	0,03	0,05	0,09	0,15	0,16	0,15
q_5 (J/s)	562,99	529,29	456,02	794,56	704,691	607,33	531,26	497,06
ξ (%)	10,86	11,45	23,14	14,70	12,75	10,17	11,54	12,25
ε (MJ/kg)	22,68	21,42	10,64	16,71	19,30	24,34	21,53	20,34

As diferentes condições de processo da secagem da pasta leite concentrado-polpa de amora (25%:75%, m/m), foram conduzidas com o intuito de se obter um produto de boa qualidade, uma alta eficiência de produção de pó e uma adequada eficiência energética.

Analisando a Tabela 8, observou-se uma maior eficiência energética para o Ensaio 3 o qual foi realizado empregando a maior vazão de alimentação da pasta (4 ml/min) a uma temperatura do ar de entrada de 60 °C. Uma maior vazão de alimentação da pasta resultou em uma maior quantidade de água evaporada e, conseqüentemente, um maior aproveitamento da energia do processo.

O Ensaio 4 foi conduzido a uma mesma vazão de alimentação da pasta (4 ml/min) e a uma temperatura do ar de entrada de 80 °C. Observou-se que uma maior temperatura do ar de entrada resultou em um aumento do calor requerido para aquecer o ar da temperatura ambiente até a temperatura de processo (q_1), refletindo em uma menor eficiência energética quando comparado ao Ensaio 3 (redução de aproximadamente 36%).

O Ensaio 5 foi conduzido a uma vazão de alimentação da pasta de 3 ml/min e uma temperatura do ar de entrada de 70 °C. Observou-se que o valor de eficiência energética ficou abaixo dos valores encontrados para os Ensaios 3 e 4 e próximo aos valores de eficiência dos demais Ensaios de secagem. Tal fato ocorreu devido à menor vazão de alimentação da pasta (quando comparado aos Ensaios 3 e 4), e ao aumento do valor do calor requerido para aquecer o ar ambiente até a temperatura de 70 °C (quando comparado a uma temperatura do ar de entrada de 60 °C).

Os demais Ensaios foram conduzidos a uma mesma vazão de alimentação de 2 ml/min e temperatura do ar de entrada de 60 °C. Constatou-se que independente do material inerte utilizado (nos Ensaios E.8 e E.9 foram empregadas partículas de PS e nos demais Ensaios partículas de PP), a eficiência energética permaneceu entre 10,86 e 12,25%. A forma de alimentação da pasta, ou seja, por atomização (Ensaios E.1, E.2, E.3, E.4, E.5) ou por gotejamento (E.6, E.8, E.9) não parece ter influenciado o desempenho energético do processo.

Brito et al. (2018) realizou um estudo da eficiência energética em um leito de jorro cônico cilíndrico modificado mecanicamente com um parafuso helicoidal. O objetivo do trabalho foi comparar a eficiência energética obtida no uso do leito de jorro convencional e o leito de jorro modificado no processo de secagem de dois materiais diferentes, alumina e leite desnatado. Foi inserido no leito de jorro um parafuso helicoidal que auxiliou na movimentação cíclica das partículas sólidas. Com isso, foi possível constatar que o uso desta configuração aumentou a eficiência energética do processo, uma vez que permitiu a realização da secagem com uma menor velocidade de jorro mínimo, diminuindo assim a energia fornecida ao sistema.

Além disso, os autores obtiveram resultados semelhantes a esse estudo ao tratar a relação entre temperatura do ar de entrada, vazão de alimentação da pasta e eficiência energética. Concluiu-se que a maior temperatura do ar resultou em um aumento na massa de água removida para o ar e em um aumento da energia não utilizada durante o processo, causando uma menor eficiência energética. O aumento na vazão de alimentação da pasta resultou em uma maior massa de água transferida e nos casos onde não houve um aumento na energia fornecida ao sistema (q_1), a eficiência energética aumentou.

Benali e Amazouz (2006) estudaram a secagem de soluções de amido em leito de jorro do tipo cônico empregando como material inerte partículas de teflon. O experimento se baseou na análise da secagem de amido com diferentes vazões de alimentação e diferentes temperaturas de entrada e saída do ar. Os autores observaram que as temperaturas de entrada e saída do ar estavam correlacionadas com a eficiência energética e os melhores resultados foram obtidos quando houve um aumento na diferença de temperatura do ar na entrada e na saída do leito de jorro. Além disso, o estudo também utilizou como parâmetros as umidades iniciais da pasta de amido (36,2% e 38,3%), com o intuito de entender a influência deste parâmetro na eficiência energética. Foi possível concluir que para maiores umidade iniciais houve uma menor eficiência energética. Os autores relataram valores de eficiência energética para o processo de secagem de solução de amido a diferentes condições operacionais variando entre 45,6% e 79,6%.

Do ponto de vista industrial o parâmetro energético determinante é o consumo específico de energia de um sistema de secagem sob condições definidas de processo (Benali e Amazouz, 2006; Braga e Rocha, 2015). Analisando a Tabela 8, observa-se que o consumo específico de energia variou de 10,64 a 24,34 MJ/kg.

É importante destacar que a quantidade de energia térmica fornecida ao sistema pode ser consideravelmente reduzida (q_1). O ar de saída do leito apresentou uma umidade absoluta abaixo da condição de saturação e uma temperatura elevada, podendo ser desumidificado e recirculado. Considerando, por exemplo, a desumidificação do ar de saída do Ensaio E.9 até atingir a umidade absoluta do ar de entrada do primeiro ciclo ($Y = 0,0147$ kg de água/kg de ar seco), à uma temperatura de 48,9 °C a ser aumentada até 60 °C (temperatura de processo), o consumo específico de energia diminuiria para aproximadamente 6,06 MJ/kg água e a eficiência energética aumentaria para 41,10%. O procedimento proposto diminuiria o consumo líquido de energia, resultando em um menor valor do consumo específico de energia, conforme reporta a literatura (JUMAH e MUJUMDAR, 1996; WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN, 2005; BRAGA e ROCHA, 2015).

4.3 Transferência de Calor

A partir dos dados de condição de processo, propriedades psicrométricas do ar, geometria do leito e características físicas do material inerte e da pasta leite concentrado-polpa de amora (25%-75%, v/v), foi possível determinar a vazão mássica de evaporação da água, a taxa de calor, o número de Reynolds da partícula, o coeficiente de transferência de calor médio e o número de Nusselt, Tabela 9. Os resultados dos experimentos E.8 e E.9 foram destacados neste trabalho pois, nas condições de processo empregadas, obteve-se os maiores valores de eficiência de produção de pó (BRAGA e ROCHA, 2013).

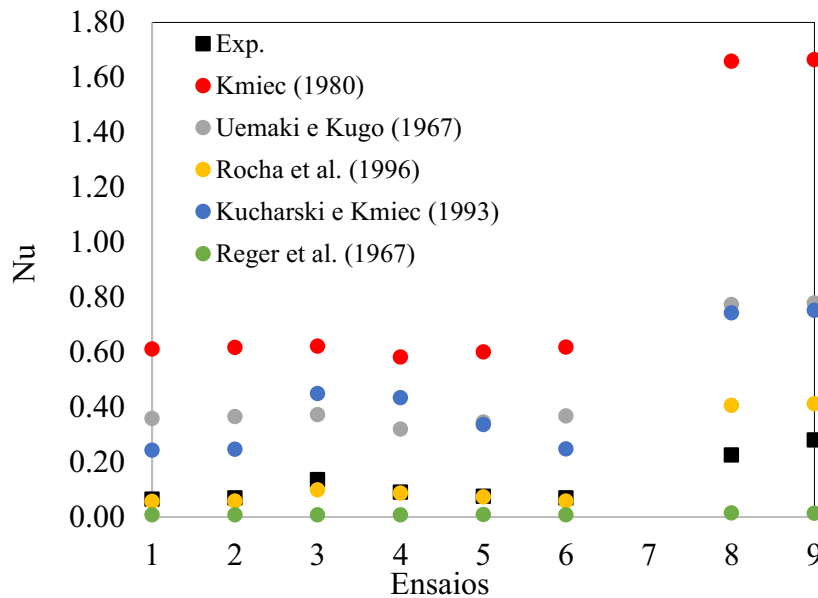
A

Figura 7 apresenta os valores de Número de Nusselt experimental para os nove ensaios de secagem e os valores de Número de Nusselt para cada ensaio estimados a partir das correlações de Kimiec (1980), Uemaki e Kugo (1967), Rocha et al. (1996), Kucharski e Kimiec (1993) e Reger et al. (1967).

Tabela 9 – Taxa de evaporação da água (\dot{m}_v), taxa de calor (q), coeficiente de transferência de calor por convecção médio (\bar{h}), Número de Nusselt (Nu) e Número de Reynolds da partícula (Re_p).

Parâmetros calculados	E.9	E.8
\dot{m}_v (kg água/s)	$3,1825 \times 10^{-5}$	$2,9899 \times 10^{-5}$
q (J/s)	68,88	68,82
\bar{h} (W/m ² .°C)	1,521	1,229
Re_p	158,44	156,79
Nu	0,280	0,225

Figura 7 - Número de Nusselt experimental e estimado via correlações para cada ensaio de secagem.



Fonte: Braga, 2014

A Tabela 10 apresenta os valores de desvio relativo em relação ao valor experimental para cada correlação analisada. É importante destacar que as correlações para o cálculo de número de Nusselt foram desenvolvidas para condições específicas de processo e por isso os valores de desvio relativo destoam tanto entre si e quando comparados aos resultados experimentais.

A correlação de Kmiec (1980) foi obtida para leito de jorro de base cônica com faixa de aplicação para o número de Reynolds entre 10 e 210, utilizando como inertes partículas de sílica gel, e carvão ativado. Para os inertes de carvão, os diâmetros médios das partículas foram de 2,233 e 3,315 mm.

A correlação de Kucharski e Kmiec (1993) foi desenvolvida para leito de jorro de base cônica com altura de leito fixo entre 0,05 a 0,17 m, utilizando como inertes partículas de placebo com diferentes dimensões (4 x 7 mm e 4,3 x 9 mm). A correlação foi obtida para velocidades entre 0,1574 e 0,3799 m/s para o placebo de 4 x 7 mm e velocidades entre 0,1848 e 0,3834 m/s para o placebo de 4,3 x 9 mm. Para esta correlação foi estudado o processo de secagem de pasta de açúcar com 43,5% de açúcar a 80 °C, a uma vazão de alimentação da pasta entre $0,2 \times 10^{-3}$ e $0,6 \times 10^{-3}$ m³/h.

A correlação de Reger et al. (1967) foi obtida para leito de jorro de base cônica, empregando-se como inertes partículas de vidro com massa específica de 2,4 g/cm³ e diferentes diâmetros (2,3 mm, 3,5 mm e 5 mm). A correlação foi obtida para valores de Reynolds entre 935 e 1700.

A correlação de Rocha et al. (1996) foi desenvolvida para leito de jorro retangular com faixa de aplicação de Número de Reynolds entre 75 e 844 e altura de leito fixo entre 0,1065 e 0,2456 m. A correlação foi desenvolvida empregando partículas inertes com diâmetro de 6.49 mm. Para esta correlação foi estudado o processo de secagem de pasta com composição mássica de 3,5% de talco, 1% estearato de magnésio, 1,25% dióxido de titânio, 0,75% polietilenoglicol (PEG 6000), 3,5% hidroxietil, 0,5% corante e 89,5% água, com uma vazão de alimentação de 0,02 kg/min.

A correlação de Uemaki e Kugo (1967) foi desenvolvida para alimentações contínuas em leito fluidizado para diâmetros de partícula de sílica gel entre 1 e 4 mm, diâmetro de coluna entre 80 e 100 mm (de 8 a 10 cm). Analisando a Tabela 10, constatou-se que a correlação melhor correlação que se ajustou aos dados experimentais foi a correlação de Rocha et al. (1995), cujo desvio médio variou de -13,7 a 80,4%.

Tabela 10 - Resultado dos desvios relativos para cada correlação empírica estudada.

Ensaio	Kucharski e Kmiec (1993)	Rocha et al. (1996)	Uemaki e Kugo (1967)	Kmiec (1980)	Reger et al. (1967)
E.1	272,9	-13,7	451,1	840,1	-88,5
E.2	257,2	-16,5	430,1	794,1	-89,3
E.3	230,3	-27,6	174,0	357,0	-94,4
E.4	382,1	-3,5	255,6	546,5	-91,1
E.5	347,7	-2,9	360,1	701,3	-89,0
E.6	258,2	-16,1	431,8	795,4	-89,2
E.8	230,4	80,4	243,8	637,3	-93,5
E.9	168,5	47,0	178,3	494,4	-95,4

Englart et al. (2009) realizaram um estudo sobre a influência da altura de leito fixo (0,07 a 0,15 m), da razão entre a vazão de água e a vazão de ar (0,005 a 0,010), da velocidade do ar de entrada (0 a 6 m/s), da temperatura do ar de entrada (27,5 a 44,1 °C) e da temperatura da água (12 a 15 °C), no coeficiente de transferência de calor de processos de umidificação do leito de jorro cônico-cilíndrico. Empregou-se como material inerte quatro diferentes tipos de polímeros

(poliamida 6-*polycaprolactam*, polietileno, poliacetal branco e preto e agalit). A faixa de Número de Reynolds analisada foi de 20 a aproximadamente 99.

Os resultados experimentais foram comparados com os resultados de correlações da literatura para prever o coeficiente de transferência de calor em leitos de jorro, as correlações empregadas foram: Uemaki e Kugo (1967); Romankow e Rashkovskaya (1968); Kmiec (1975); Kmiec II (1980,1983); Kmiec e Kucharski (1993); Kucharski e Kmiec II (1993); Rocha et al. (1995); Renstron e Berghel (2002). Os desvios médios entre os resultados obtidos via correlações e os resultados experimentais foi de 35,5% para a equação de Kucharski e Kmiec II, 47,4% para a equação de Renstron e Berghel e 50,1% para a equação de Kmiec I. Empregando o método dos mínimos quadrados uma expressão para o cálculo do número de Nusselt foi desenvolvida, resultando em valores de desvio médio de até 14,9 %.

Em relação aos resultados experimentais, para a faixa de Re_p variando entre aproximadamente 27 e 99, obteve-se valores de número de Nusselt entre aproximadamente 0,4 e 1,3 (partículas de polietileno com diâmetro médio de 4,1 mm, altura de leito fixo de 0,15 m, razão entre a vazão mássica de água e do ar de secagem de 0,005). Aumentando-se o valor da relação entre a vazão mássica de água e do ar de secagem para 0,008, obteve-se valores de número de Nusselt entre aproximadamente 0,8 e 2,7. Constatou-se a influência positiva da razão entre a vazão de água e a vazão de ar no coeficiente de transferência de calor. Para os Ensaios E.8 e E.9, em nosso trabalho, a razão entre a vazão mássica de água e do ar foi de 0,002, resultando em baixo valor de Nusselt

Freitas e Freire (1993) fizeram experimentos com o intuito de estudar e analisar os coeficientes de calor envolvidos na troca de calor em leitos de jorro cônico-cilíndrico e cônicos, variando-se a vazão do ar de entrada, o tamanho das partículas inertes e a altura do leito. Seus resultados foram de encontro com as análises de outros autores, observaram-se que a transferência de calor aumenta de acordo com o aumento do diâmetro das partículas inertes e diminui de acordo com o aumento da altura do leito; notaram-se também que, para efeitos de transferência de calor, a vazão de gás não impacta de forma significativa para o sistema. Pode-se perceber em nossos resultados que a análise das transferências ocorre de acordo seu trabalho.

4.4 Transferência de Massa

A partir dos dados experimentais foi possível determinar a vazão mássica de vapor, o número de Reynolds da partícula, o coeficiente de transferência de massa por convecção médio e o número de Sherwood, Tabela 11. Como descrito no Tópico 4.3, os resultados dos experimentos E.8 e E.9 foram destacados neste trabalho pois, nas condições de processo empregadas, obteve-se os maiores valores de eficiência de produção de pó (BRAGA e ROCHA, 2013).

Os experimentos E.8 e E.9 foram conduzidos sob mesmas condições operacionais (temperatura do ar de entrada de 60 °C, massa de inertes de 1,6 kg de partículas de poliestireno, vazão de alimentação de 2 ml/min, modo de alimentação por gotejamento, razão entre a vazão de alimentação e a vazão do ar de secagem de 0,002), apresentando resultados muito próximos para o coeficiente de transferência de massa por convecção e o número de Sherwood.

Tabela 11 - Taxa de evaporação da água, coeficiente de transferência de massa médio e Número de Sherwood experimental.

Parâmetros calculados	E.9	E.8
\dot{m}_v (kg água/s)	$3,1825 \times 10^{-5}$	$2,9899 \times 10^{-5}$
Re_p	158,44	156,79
\bar{k}_m (m/s)	0,00016	0,00014
Sh	0,026	0,023

Os valores de número de Sherwood obtidos experimentalmente foram comparados com os valores obtidos via correlações, a fim de se identificar a correlação com o menor desvio relativo. Analisando a Tabela 12, observou-se que para os experimentos E.8 e E.9 os valores de desvios relativos foram altíssimos, atingindo quase 5000%.

A correlação de El-Naas et al. (2000) apresentou o maior valor de desvio médio. Esta correlação foi desenvolvida a partir de dados experimentais coletados em um leito de jorro convencional operando com partículas de diâmetro médio entre 1,5 e 3,2 mm. A temperatura do ar utilizado nos experimentos de secagem foi de 60 °C a 90 °C e a velocidade do ar foi de 0,65 m/s a 1,35 m/s. Trata-se de uma correlação em função apenas do número de Reynolds da partícula, tornando o cálculo bastante impreciso.

Uemaki e Kugo (1967) também consideraram o número de Reynolds na correlação a qual propuseram. Todavia, levaram em consideração o diâmetro da seção transversal da coluna cilíndrica do leito de jorro e a altura de leito fixo. Os autores empregaram condições experimentais mais próximas aos dados estudados neste trabalho, obteve-se assim o segundo menor desvio relativo.

A correlação que apresentou os menores valores de desvio relativo foi a expressão proposta por Kmiec, England e Ludwinska (2009). Os autores estudaram o processo de umidificação do leito com velocidade de jorro mínimo variando entre 1,83 a 3,30 m/s e velocidade do gás na entrada do leito de até 6 m/s. Utilizaram-se quatro diferentes inertes: policaprolactama 6 com diâmetro médio de 2,5 mm; polietileno com diâmetro médio de 4,1 mm; acetal em variante branca com diâmetro médio de 3,7 mm e preta com diâmetro médio de 2,7 mm; agalite com diâmetro médio de 2,7 mm. O número de Reynolds da partícula variou entre 25 e 95. Para os experimentos empregando como inerte o polietileno e altura de leito fixo de 0,15 m, obtiveram-se valores de Sh entre aproximadamente 0,3 e 0,9 para uma razão entre a vazão mássica de água e do ar de 0,005. Constatou-se que o aumento no valor da razão entre a vazão mássica de água e do ar resultou em um aumento do número de Sherwood.

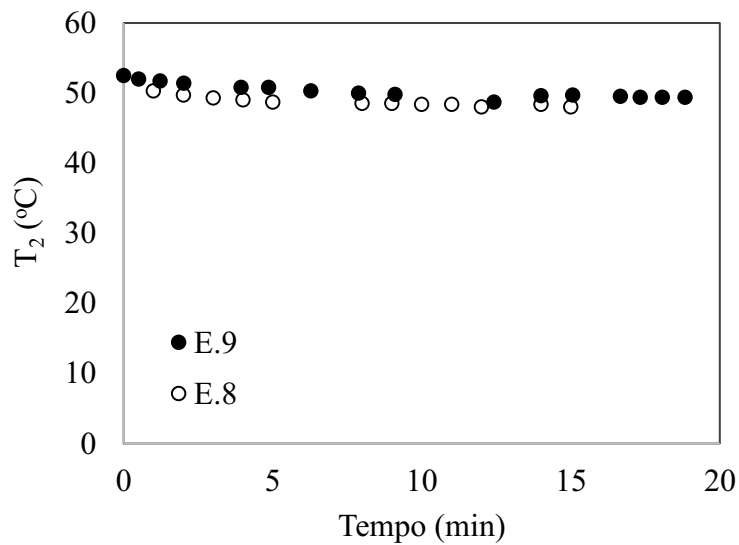
Tabela 12 - Resultado dos desvios relativos para cada correlação empírica estudada.

Correlação	Sh (E.8)	DR (%)	Sh (E.9)	DR (%)
Uemaki e Kugo ² (1967)	0,223	970,16	0,227	873,27
Kmiec ² (1975)	0,375	1629,42	0,377	1450,29
Kmiec e Kucharski ² (1993)	0,277	1104,13	0,279	974,95
El-Naas et al. ² (2000)	1,134	4931,83	1,157	4450,47
Kmiec, England e Ludwinska (2009)	0,005	-78,3	0,008	-69,2

A Figura 7 apresenta os valores de temperatura do ar de saída em função do tempo de processo. É possível notar uma leve diminuição na temperatura de saída do ar nos primeiros 4 a 5 minutos de processo e, após este intervalo de tempo, a temperatura se manteve relativamente constante e próxima de 50 °C. Além disso, as temperaturas do ar de saída dos experimentos E.8 e E.9 não apresentaram grandes diferenças entre si, o que era esperado pois os experimentos foram realizados sob mesmas condições operacionais. Pode-se atribuir aos processos condições de regime estacionário em relação a temperatura.

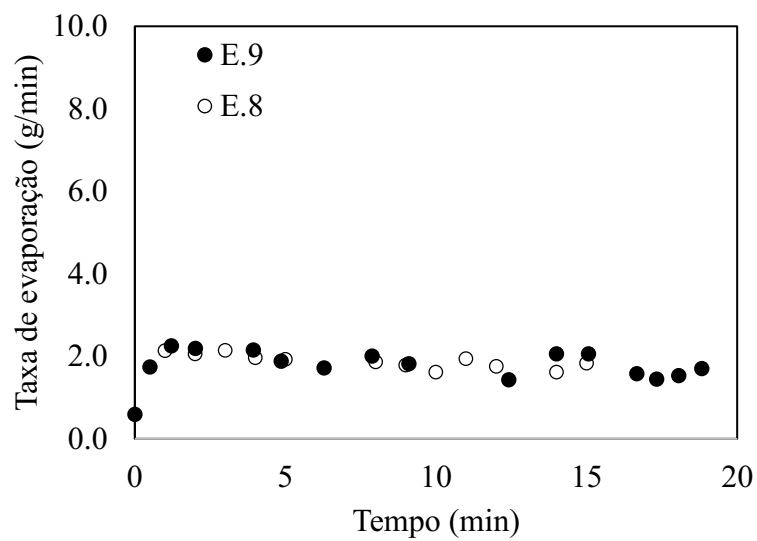
O comportamento da taxa de evaporação da água em função do tempo é ilustrado pela Figura 8. Como era previsto, a taxa de evaporação da água aumentou nos primeiros minutos de processo até a estabilização, um pouco abaixo de 2 g/min. Assim como para a temperatura do ar de saída, pode-se atribuir aos processos condições de regime permanente em relação a taxa de evaporação para os ensaios E.8 e E.9.

Figura 8 - Temperatura do ar de saída em função do tempo de processo.



Fonte: Braga, 2014

Figura 9 - Taxa de evaporação da água em função do tempo de processo.



Fonte: Braga, 2014

Júnior (2003) realizou um estudo do processo de secagem em leitos fluidizado e vibro-fluidizado. Utilizando-se partículas de alumina (com diâmetros médio de 0,003 m) e sílica-gel (com diâmetro médio de 0,0025 m), analisou-se a influência da altura do leito de partículas e do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico de ambos os leitos. Além disso, similarmente a este trabalho, o coeficiente de transferência de massa foi determinado para os leitos fluidizados e vibro-fluidizados, utilizando-se da metodologia proposta por Kmiec (1975).

Avaliou-se diferentes valores de vazão mássica de ar (0,044, 0,047 e 0,045 kg/s) e, no caso do leito vibro-fluidizado, valores de energia vibracional (0, 0,5, 1 e 1,5). A energia vibracional é caracteriza por um número adimensional que relaciona a vibração do leito com a aceleração gravitacional. O autor obteve valores médios de coeficiente de transferência de massa por convecção de 0,00055 m/s, quando se empregou a alumina. Para a sílica-gel, a média dos valores do coeficiente de transferência de massa por convecção foi de 0,00036 m/s. Constatou-se que os valores do coeficiente de transferência de massa por convecção foram pouco influenciados pelo adimensional de vibração do leito.

A altura do leito foi fixada em 13,5 cm. Os experimentos foram conduzidos empregando-se ar úmido com umidade relativa variando entre 75 a 95%. Os resultados demonstraram um aumento na transferência de massa por um fator de 1,9 a 3,8 quando se compara o uso de sólidos empacotados com o sólidos não-empacotados no leito fluidizado. Os valores do coeficiente de transferência de massa k_m foram de, aproximadamente 0,00016 m/s para sólidos não empacotados, 0,00027 m/s para bolas de alumínio sílica com 12.7 mm de diâmetro, 0,00031 m/s para bolas de alumínio sílica com 25.7 mm de diâmetro 0,00032 m/s para agregado de argila com 12 mm de diâmetro e 0,00057 m/s para bolas de alumínio sílica com 6.35 mm de diâmetro. Portanto o uso do leito fluidizado se mostrou como uma alternativa promissora para otimizar a transferência de massa entre ar úmido e partículas sólidas de sílica-gel, areia de olivina, silicato de alumínio e argila expandida

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos da análise dos aspectos energéticos e da transferência de calor e massa provenientes do processo de secagem de misturas de leite concentrado com polpa de amora preta em leito de jorro cônico-cilíndrico, foi possível concluir que:

- As curvas fluidodinâmicas foram construídas, foi possível determinar a velocidade de jorro mínimo para o polipropileno e para o poliestireno, comparando-se as velocidades notou-se um valor maior para o poliestireno devido à sua maior massa específica pois, de acordo com a literatura, uma maior massa específica resulta em uma maior velocidade de jorro mínimo;
- A maior eficiência energética e um menor consumo específico ocorreram para o Ensaio 3, o qual foi realizado empregando uma vazão de alimentação da pasta de 4 ml/min, temperatura do ar de entrada de 60 °C, temperatura de entrada da pasta de 25 °C, pressão de atomização de 20 psig e temperatura ambiente de 25 °C. Uma maior vazão de alimentação e uma menor temperatura para o ar de entrada resultaram em um maior aproveitamento de energia pelo sistema. A energia térmica foi em grande parte empregada para a evaporação da água, evidenciando assim a maior eficiência para o ensaio em questão;
- Uma maior temperatura do ar de entrada não aumentou a quantidade de água evaporada da pasta, contudo, o aumento da temperatura diminuiu a eficiência energética do sistema, uma vez que parte da energia térmica se dissipou com o ar de saída do equipamento;
- O aumento na vazão de alimentação da pasta aumentou a massa de água transferida para o ar e nos casos onde não houve um aumento na energia fornecida ao sistema a eficiência energética também aumentou;
- A forma de alimentação da pasta, ou seja, por atomização por gotejamento não influenciou no desempenho energético do processo;
- A quantidade de energia térmica fornecida ao sistema pode ser consideravelmente reduzida por meio da recirculação do ar de saída;
- As correlações da literatura analisadas neste trabalho para o cálculo do número de Nusselt e do número de Sherwood apresentaram grandes divergências quando comparados aos resultados experimentais, o que pode ser justificado pelas

condições específicas (faixas de validade) empregadas no desenvolvimento de cada correlações;

- A temperatura do ar de saída do secador e a vazão de evaporação da água permaneceram relativamente constantes após poucos minutos do início dos processos de secagem.

Por fim, elaboraram-se as seguintes sugestões para aumentar a eficiência energética do sistema: emprego de vazões de alimentação mais altas, pois mostrou-se em nosso estudo que a variável com maior impacto na taxa de evaporação de água foi a vazão de alimentação; a utilização de um isolante térmico no equipamento, evitando assim a perda de energia pelas paredes do sistema.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BRAGA, M. B.; ROCHA, S. C. S.; HUBINGER M. D. **Produção de leite-polpa de amora em pó em leito de jorro: análise do processo e caracterização do pó**, XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 2016.

KMIEC, A.; ENGLART, S.; LUDWINSKA, A. **Mass Transfer During Air Humidification in Spouted Beds**. Norwida Str.4/6, Poland, 2008.

BRAGA, M. B.; ROCHA, S. C. S. **Secagem de pasta alimentícia em leito de jorro: avaliação dos aspectos energéticos e produção**. 1454-1463. 10.5151/ENEMP2015-SE-364, 2015.

ENGLART, S.; KMIEC, A.; LUDWINSKA, A. **Heat Transfer in Sprayed Spouted Beds**. Norwida Str.4/6, Poland, 2009.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

KUROZAWA, L. E. **Estudos dos processos de hidrólise enzimática e secagem por atomização para obtenção de hidrolisado proteico de frango em pó**, Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2009.

SPITZNER NETO, P.I. **The influence of paste feed on the minimum spouting velocity**, Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, 2001

MASTERS, K. **Spray drying handbook**, Fourth Ed., Halstead Press, New York, 1985

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

DLOUHY, J. **Heat and mass transfer in spray drying**, (S.l.), 1957.

PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. **Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles**. Powder Technology. v. 110, p. 222-238, 2000

PASSOS, M. L; MASSARANI, G; FREIRE, J.T; MUJUMDAR A,S; **Drying of pastes in spouted beds of inert particles**, New York, 1997

MARKOWSKI, A.S. **Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer**, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1992

MEDEIROS, U. K. L. **Drying of pastes in spouted beds: influence of the paste composition on the material retention in the bed**. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo: UNICAMP, SBEQ, FAPESP, CAPES, 2004. v. C. p. 1529-1536.

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**, Ottawa 1983

SCHNEIDER, T.; BRIDGEWATER, J. **The stability of wet spouted beds**, New York 1993

BACELOS, M. S.; SPITZNER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M.; FREIRE, J. T. **Analysis of drying of pastes in spouted beds**. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo. UNICAMP, SBEQ, FAPESP, CAPES, 2004.

BACELOS, M. S.; SPITZNER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M; FREIRE, J. T. **Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes**, Drying Technology, 23:3, 427-453, New York, 2005.

GUERRERO, M.; ALBERT, C.; PALOMER, A.; GUGLIETTA, A;. **Drying in pharmaceutical and biotechnological industries**, London, 2003.

OLIVEIRA, W.P.; FREIRE, J. T. **Estudo da secagem de pastas em leito de jorro, Tópicos Especiais em Sistemas Multiparticulados** São Carlos, primeira edição, 1998. Cap. 3, p. 79-118

PATEL, K.; BRIDGEWATER, J; BAKER, C. G. J.; SCHNEIDER T. **Spouting behavior of wet solids**, Washington, 1986

LEE, J.; DRUST, R. W.; WROLSTAD, R. E. **Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by pH differential method: collaborative study**. Journal of AOAC International, v.88, n. 5, p. 1269-1278, 2005.

REYES, A. **Secagem de suspensões em leito de jorro cônico**, Tese (Doutorado em Engenharia Química), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993

FREITAS L.A.P. & FREIRE J.T. (1993): **Heat Transfer in Spouted Beds**, Drying Technology: An International Journal, 11:2, 303-317

BRITO, R.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, J., T. **Aplicação da Intermitência na Secagem de Alumina em Leito de Jorro: Análise da Homogeneidade do Meio**, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2018.

COSTA, R.G. **Secagem de polpa de açaí em leito de jorro: Influência das variáveis operacionais no desempenho do processo e na qualidade do produto**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015

BROWN, S.L. **Hydrodynamics and Transient Heat Transfer Characteristics in Fluidized and Spouted Bed**, Blacksburg, Virginia, 2012

WALSTRA, P. GEURTS, T.J. NOOMEN, A. JELLEMA, A. BOEKEL, MARTINUS. **Dairy Technology-Principles of Milk Properties and Processes**, New York : Marcel Dekker inc., 1999.

WACHIRAPHANSAKUL, S., DEVAHASTIN, S., **Drying kinetics and quality of soy residue (Okara) dried in a jet spouted bed dryer**. Drying Technology, 2005.

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

GOLSHAN, SHAHAB, YAMAN, ONUR & KOKSAL, MURAT, KURAH, GORKEM & ZARGHAMI, REZA, MOUSTOUFI. **A New Correlation for Minimum Spouting Velocity for Conical Spouted Beds Operating with High Density Particles**. Experimental Thermal and Fluid Science. 2018.