

Engenharias, Ciência e Tecnologia

**Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)**

TY HELMET SAFETY

Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)

Engenharias, Ciência e Tecnologia

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia [recurso eletrônico] / Organizador
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-084-1

DOI 10.22533/at.ed.841193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume I apresenta, em seus 10 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão de Sistemas, Processos Produtivos e Qualidade em Serviços relacionados à engenharia de produção nas áreas de gestão da produção, processos produtivos e, Gestão de Operações e Serviços.

As áreas temáticas de Gestão de Sistemas, Processos Produtivos e Qualidade em Serviços, tratam de temas relevantes para a Gestão da Produção. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam gerir de uma forma mais otimizada conhecimentos e estudos na área de processos produtivos, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão de Sistemas e Processos Produtivos, e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

ANÁLISE DO BALANÇO DE MASSA E DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS DO PÓ NA SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO

João Pedro Alves de Azevedo Barros

José Teixeira Freire

DOI 10.22533/at.ed.8411931011

CAPÍTULO 2 18

APLICAÇÃO DA INTERMITÊNCIA NO PROCESSO DE SECAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM LEITO DE JORRO

Ronaldo Correia de Brito

Rodrigo Béttega

José Teixeira Freire

DOI 10.22533/at.ed.8411931012

CAPÍTULO 3 34

COBERTURAS DE SOLO E TELAS FOTOSSELETIVAS NO CULTIVO DA ALFACE EM BOA VISTA, RR

Taline Katlen de Oliveira Nunes

João Luiz Lopes Monteiro Neto

João Vitor Paiva Cabral

José de Anchieta Alves de Albuquerque

Eltton da Silva Dias

Luiz Guilherme Carvalho Zborowski

Rannyonara Oliveira Rodrigues

Brito Luis Dresch

DOI 10.22533/at.ed.8411931013

CAPÍTULO 4 40

EFEITO DOS AGENTES ENCAPSULANTES NAS ISOTERMAS DE SORÇÃO DE MICROCÁPSULAS DE EXTRATO DE URUCUM (BIXA ORELLANA)

Caroline Pereira Moura Aranha

Caio Francisco Valente Serra

Vânia Regina Nicoletti Telis

DOI 10.22533/at.ed.8411931014

CAPÍTULO 5 51

LEITO BIFÁSICO NA REAÇÃO DE APATITA NA FABRICAÇÃO DE FERTILIZANTES

Fabrcio Gomes Menezes Porto

José Roberto Delalibera Finzer

Roberto Mattioli Silva

DOI 10.22533/at.ed.8411931015

CAPÍTULO 6 61

MUDAS DE MARACUJAZEIRO-AMARELO PRODUZIDAS EM DIFERENTES AMBIENTES E SUBSTRATOS

Roberto Tadashi Sakazaki
João Luiz Lopes Monteiro Neto
Wellington Farias Araújo
Carlos Abanto-Rodríguez
Rafael Souza Coimbra e Silva
Taline Katlen de Oliveira Nunes
Sonicley da Silva Maia
Beatriz Sayuri Campaner Sakazaki

DOI 10.22533/at.ed.8411931016

CAPÍTULO 7 67

PRODUÇÃO DE MILHO VERDE EM CONSÓRCIO COM CROTALARIA JUNCEA SOB DIFERENTES DOSAGENS DE N EM TRANSIÇÃO AGROECOLÓGICA EM RORAIMA

Juliano Jonas Sábio de Melo
Hipólito Ribas Pereira
Maria Edjane Matias Silva
Edmilson Evangelista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.8411931017

CAPÍTULO 8 73

REDUÇÃO DE COR ICUMSA DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR PELA UTILIZAÇÃO DE BENTONITA COMO CLARIFICANTE

Sarah Arvelos
Ananda Cristina Coelho Ribeiro
Heitor Otacílio Nogueira Altino

DOI 10.22533/at.ed.8411931018

CAPÍTULO 9 88

LOGÍSTICA REVERSA: UM LEVANTAMENTO SOBRE O PÓS-VENDA DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COM COMERCIANTES DO BAIRRO CAPIM MACIO, NA CIDADE DO NATAL-RN

Glauber Henrique Borges de Oliveira Souto
Claudiane da Silva
Janayne Thayane de Souza Toscano

DOI 10.22533/at.ed.8411931019

CAPÍTULO 10 94

QUALIDADE DA ÁGUA CONSUMIDA EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA ÁREA RURAL DE CERRITO ALEGRE, 3^o DISTRITO DE PELOTAS/RS

Catiúscia Weinert Mizuschima
Jocelito Saccol de Sá
Marília Guidotti Corrêa

DOI 10.22533/at.ed.84119310110

SOBRE O ORGANIZADOR 108

ANÁLISE DO BALANÇO DE MASSA E DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS DO PÓ NA SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO

João Pedro Alves de Azevedo Barros

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Pós-Graduação em Engenharia
Química
São Carlos – São Paulo

José Teixeira Freire

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Pós-Graduação em Engenharia
Química
São Carlos – São Paulo

RESUMO: Apesar das vantagens e estudos apresentados na literatura sobre a secagem de pastas em leito de jorro, essa técnica pode ser inviabilizada devido ao processo de aglomeração, acúmulo e instabilidades no leito. Esses problemas operacionais podem afetar a eficiência da secagem e alterar a distribuição do tamanho das partículas, dificultando o controle dessas variáveis. Neste contexto, este capítulo tem como finalidade apresentar um estudo de caso sobre o balanço de massa em um leito de jorro cônico - cilíndrico, determinando a massa do material elutriado com adição de um filtro. O tamanho das partículas em função da temperatura do ar e vazão da pasta alimentada também foi analisada. A porcentagem de massa elutriada ficou entre 2 e 8%, enquanto o acúmulo no leito foi em média de 29%. A distribuição do tamanho das partículas foi

influenciada significativamente pela vazão da pasta, mostrando que as maiores partículas foram do material acumulado ($20 - 92 \mu\text{m}$), as menores retidas no filtro ($2 - 5 \mu\text{m}$) e as intermediárias recuperadas no ciclone ($8 - 21 \mu\text{m}$). Foi constatado instabilidade do processo de secagem, principalmente quando atingida a capacidade máxima do equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: Leito de jorro, tamanho da partícula, balanço de massa, elutriação e aglomeração.

ABSTRACT: Despite the advantages and studies presented in the literature on the drying of paste in spouted bed, this technique may be unviable due to the process of agglomeration, accumulation and instabilities in the bed. These operational problems can affect drying efficiency and change the particle size distribution, making it difficult to control these variables. In this context, this chapter aims to present a case study on mass balance in a conical-cylindrical spouted bed, determining the mass of the elutriated material with the addition of a filter. The particle size as a function of air temperature and paste feed flow rate was also analyzed. The percentage of elutriated mass was between 2 and 8%, while the accumulation in the bed was on average 29%. The particle size distribution was significantly influenced by the feed flow rate, showing that the largest particles were from the

accumulated material (20 - 92 μm), the smallest particles retained in the filter (2-5 μm) and the intermediate recovered in the cyclone (8 - 21 μm). It was observed instability of the drying process, especially when the maximum capacity of the equipment was reached.

KEYWORDS: Spouted bed, particle size, mass balance, elutriation and agglomeration.

1 | INTRODUÇÃO

O processo de secagem tem como principal finalidade a redução da umidade para aumentar o tempo de preservação de produtos alimentícios. Neste contexto, a secagem de pastas e soluções em leito de jorro vem sendo muito discutido na literatura, por apresentar como vantagem altas taxas de transferência de calor e massa. Outra vantagem que torna essa técnica promissora para produtos termicamente sensíveis é que a temperatura média dos inertes apresenta menor temperatura do que a do ar de secagem (FREIRE et al., 2012; SOUZA; OLIVEIRA, 2005). Contudo, o leito de jorro apresenta algumas limitações, tanto de projeto quanto das condições operacionais, as quais podem afetar diretamente a eficiência do processo de secagem.

Apesar do pó produzido no leito de jorro apresentar qualidade que atenda aos requisitos comerciais, essa técnica de secagem é pouco eficiente na taxa de produção de pó, possuindo limitação da vazão da pasta alimentada (PASSOS et al., 1997). Quando operado em altas vazões de alimentação de pasta, este equipamento pode sofrer o processo de aglomeração e acúmulo de material no leito, os quais levam a problemas operacionais, como instabilidade no jorro, variação da queda de pressão e aglomeração de partículas-pasta-produto, podendo causar o colapso do jorro (ALMEIDA, 2009; PASSOS et al., 1997).

Desta forma, o processo de secagem em leito de jorro não possuiu controle sobre a qualidade do produto formado e das perdas do processo principalmente pela elutriação e acúmulo de pó. Esses fenômenos podem ser afetados diretamente pelo processo de aglomeração das partículas.

Nesse contexto, e buscando disseminar informações mais detalhadas sobre a granulometria, acúmulo e elutriação do pó, o presente capítulo teve como finalidade relatar a experiência dos autores na secagem de pasta em leito de jorro, analisando o balanço de massa global e do tamanho do pó.

2 | DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM

Agglomeração de partículas pode ser definida como o processo de aumento do tamanho das partículas que se juntam ou se ligam umas com as outras, obtendo um agregado com uma estrutura porosa e com tamanho maior que o inicial (SCHUCHMANN,

1995). Dessa forma, partículas mais úmidas são mantidas juntas por forças de atração interpartículas, e assim esse agregado tem tamanho maior que o valor real da partícula (CUNHA; MAIALLE; MENEGALLI, 2000). O processo de aglomeração de finas partículas sólidas é usado em algumas circunstâncias para melhorar as propriedades do pó (dispersão, solubilidade, manuseio, etc), como é o caso da indústria alimentícia que utiliza essa técnica em produtos instantâneos (café, leite e cacau) (CARIĆ, 2003; SCHUCHMANN, 1995; SCHUBERT, 1993). A aglomeração destas partículas ocorre com a formação do pó devido os mecanismos de secagem e atrito que acontecem dentro do leito de partículas. Entretanto, a aglomeração pode ser prejudicial em outros processos, causando problemas operacionais e de instabilidade, sendo um deles a secagem de pasta em leito de jorro com partículas inertes.

O processo de secagem no leito de jorro inicia-se com a dispersão da pasta sobre o leito de partículas inertes, posteriormente com a formação do filme líquido, ocorre a evaporação da água através dos processos simultâneos de transferência de calor por condução e convecção. Na etapa de secagem do filme líquido, ocorre a redução gradual das pontes líquidas (minimizando a adesão sólido-pasta) até um ponto crítico onde o filme se torna sólido e frágil. Em consequência da alta taxa de circulação dos inertes, o filme é quebrado por choque mecânico através das colisões entre os inertes, transformando-o em pó, o qual é arrastado pelo ar para fora do secador (FREIRE et al., 2012). O pó gerado é arrastado e separado da fase gasosa no ciclone, entretanto uma pequena quantidade de partículas é elutriada pelo gás para a atmosfera ou retido com adição de um filtro na saída do sistema.

Altas taxas de cisalhamento no filme são alcançadas devido ao intenso atrito entre as partículas inertes, favorecendo a quebra e remoção do pó (COSTA JR. et al., 2006; DOTTO; SOUZA; PINTO, 2011). Este atrito interno pode levar a formação de uma ampla faixa de granulométrica e também de geometria do pó.

As etapas de secagem do filme (alimentação de pasta, formação do filme, secagem do filme, quebra e remoção do pó) devem ocorrer simultaneamente para que um processo estável seja alcançado. Entretanto, para altas vazões de alimentação, o filme não é seco adequadamente e a umidade do pó pode ser mais elevada, favorecendo o processo de aglomeração. Em consequência desse fato, poderia causar o aumento do tamanho do pó, acúmulo de material no leito e aglomeração de partícula-pasta-produto, podendo levar a instabilidade e colapso do jorro (ALMEIDA, 2009; PASSOS et al., 1997; STRUMILLO, 1987). Nesse caso específico, seria necessário maior tempo de residência do material dentro do leito, contudo esse parâmetro é influenciado por fatores como o tipo de pasta, sua reologia, ligação com a superfície do inerte e as taxas de atrição partícula-partícula e partícula-parede.

Na Figura 1, observa-se uma representação esquemática das etapas do processo de secagem em leito de jorro, verificando a presença da aglomeração e acúmulo da pasta com as partículas inertes e com a parede do equipamento.

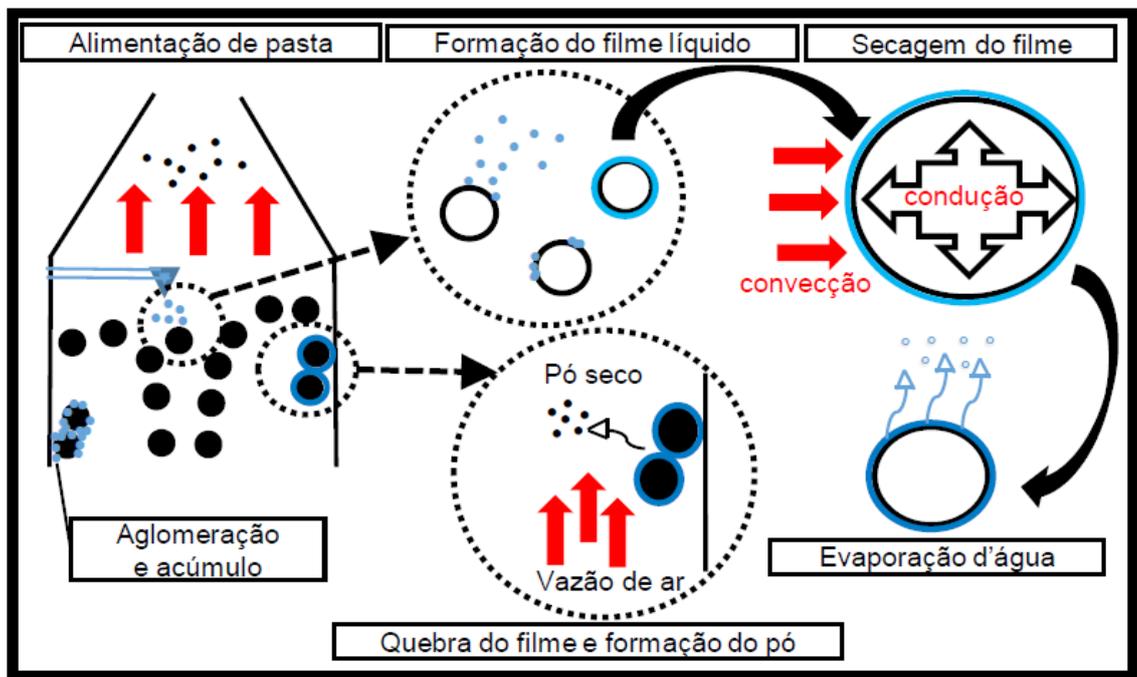


Figura 1: Etapas do processo de secagem de pasta em leito de jorro.

O acúmulo de pasta dentro do leito ocorre quando a taxa de remoção do pó é menor que a taxa de recobrimento das partículas inertes, ou seja, entra mais massa de sólidos pela alimentação do que sai pelo arraste de pó devido ao ar de secagem. A eficiência da secagem depende da taxa de remoção de pó e está diretamente relacionada com a temperatura e vazão do gás de entrada, dentre outros parâmetros. Estas duas variáveis governam a transferência de calor e a taxa de circulação dos inertes, respectivamente. Enquanto que a taxa de alimentação de pasta e a massa de inerte influenciam na remoção do filme e estabilidade do leito de jorro, mas todos esses parâmetros estão diretamente relacionados com o acúmulo e elutrição do pó (PASSOS; MUJUMDAR, 2000).

3 | ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO BALANÇO DE MASSA E DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS DO PÓ NA SECAGEM DE PASTA EM LEITO DE JORRO.

O leito de jorro pode ser uma alternativa muito promissora em relação a outras técnicas de secagem de pastas, mas apesar dos estudos recentes na área ainda resta muito a ser explorado. Apesar desses fatores, essa técnica apresenta problemas de aglomeração e acúmulo de material no leito, além de instabilidade que podem levar ao colapso do jorro. Nesse tipo de secagem um parâmetro pouco estudado é o material elutriado, sendo seus dados escassos na literatura. A significância deste parâmetro no processo poderia ser utilizada em modelos físico-matemáticos que desprezam a perda de pó pela elutrição, auxiliando na sua precisão.

No intuito de melhorar a compreensão do processo de secagem de pastas em

leito de jorro, utilizou-se de um estudo de caso onde os autores realizaram um balanço de massa global determinado o material elutriado com a adição de um filtro. Também foi analisada a distribuição do tamanho das partículas do pó do produto acumulado no leito, coletado no ciclone e no elutriado. Através desses dados foi possível realizar uma discussão quantitativa desses parâmetros frente às variáveis do processo (temperatura do ar e vazão de pasta).

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Unidade Experimental

O presente trabalho foi desenvolvido no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os experimentos foram realizados em um leito de jorro cônico – cilíndrico (construídos de peças de aço inox e unidas por flanges) acoplado a um ciclone e uma saída para coleta do material elutriado no filtro, como mostra a Figura 2. O fornecimento de ar foi realizado por um soprador (7,5 cv) e aquecido por um aquecedor com potência de 2581W. Vale destacar que o filtro foi feito de tecido tricoline (100% algodão), sendo confeccionado com comprimento de 68 cm e diâmetro de 13,5 cm, possuindo assim uma área superficial de coleta de aproximadamente 2880 cm².

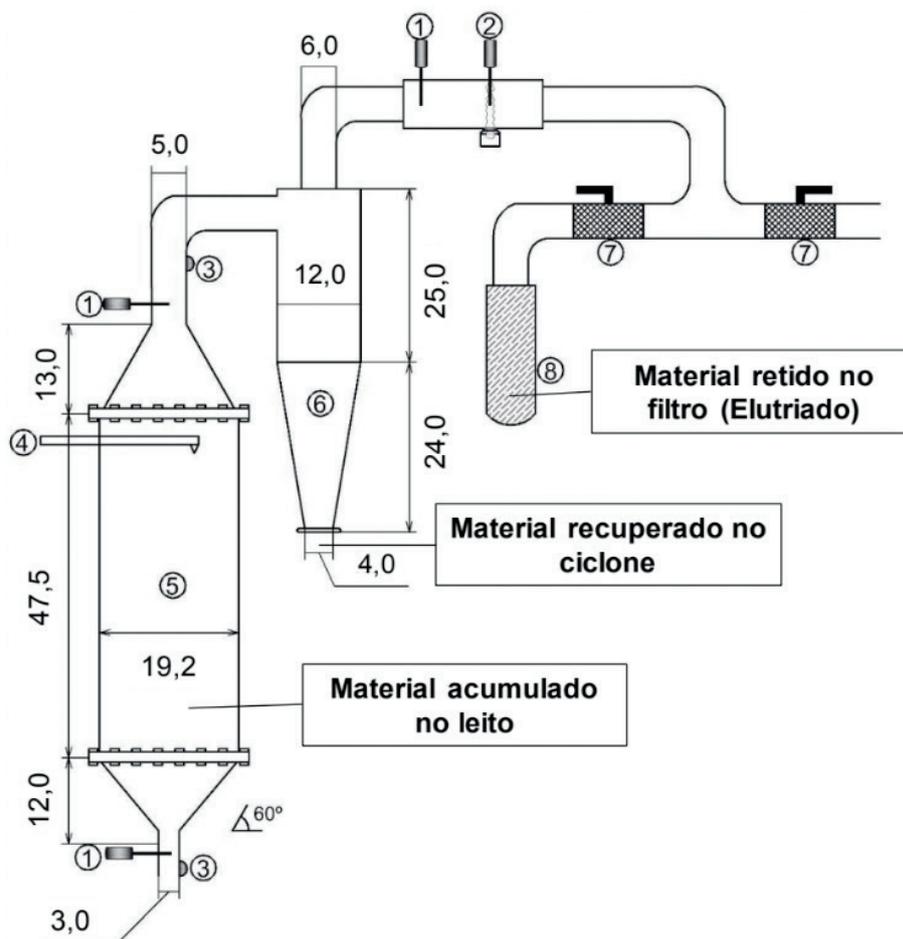


Figura 2: Sistema de secagem de pasta. Legenda: 1 - Termopar (Tipo T); 2 - Termopar de bulbo úmido; 3 - transdutor de pressão; 4 - atomizador de solução/pasta; 5 - leito de jorro; 6 - ciclone (Laplace); 7 - Válvulas (esfera de 2 "); 8 - Filtro.

3.1.2 Materiais

A pasta utilizada foi uma suspensão de carbonato de cálcio PA (Min. 99,0%), com concentração percentual em massa de 5,0% (m/m). Essa concentração foi escolhida de acordo com estudo realizado por Almeida (2009), o qual identificou que enquanto a concentração de 3% diminui a queda de pressão e a concentração mais elevada (9%) provocava um aumento na variável, em valores intermediários (5%), ambos os comportamentos foram observados.

A pasta foi mantida em mistura homogênea por agitador mecânico e transportada para o interior do leito de jorro por uma bomba dosadora. Um compressor foi utilizado para atomizar a pasta dentro do leito (pressão de atomização aplicada de 3 PSI), sendo feita na parte superior da coluna cilíndrica, acima da região da fonte.

Quatro quilos de partículas esféricas de vidro, com diâmetro médio de 2,18 mm, foram utilizados em cada experimento. A densidade real dos inertes foi estimada por picnometria a gás hélio apresentando valor de 2,512 g.mL⁻¹ (SILVA; FREIRE; FREIRE, 2015).

3.1.3 Procedimento Experimental

Para atingir o objetivo desse trabalho foram realizados experimentos com vazão de pasta de 10 e de 30 mL.min⁻¹ e temperaturas do ar na entrada de 80, 90 e de 100°C.

Após iniciada a vazão de ar e estabelecido o jorro, o aquecedor foi ligado na temperatura do ar de entrada (80, 90 ou 100°C) e aguardava-se até que o sistema entrasse em regime permanente. Posteriormente, a alimentação de pasta de 10 ou 30 mL.min⁻¹ foi iniciada por 70 minutos contínuos e durante esse período foi realizado a coleta de dados. O tempo de operação foi determinado por ensaios preliminares, sendo limitado pelo aumento da pressão devido a formação de torta no filtro. Todo o material coletado dentro do leito foi para estufa a 105°C por 24 horas para determinar a massa seca. A massa retida no ciclone foi coletada a cada 10 minutos e posteriormente colocada em estufa para determinar a massa seca. Por outro lado, a massa retida no filtro foi considerada como a diferença entre a massa seca final e inicial do filtro. Ao final da operação o equipamento foi desligado, fez-se a última coleta no ciclone e mediu-se a massa das partículas inertes, obtendo-se o acúmulo de pasta presente nos inertes, juntamente com a massa retida nas paredes interna do equipamento.

Os dados operacionais foram coletados por uma placa de aquisição de dados, com intervalo de cinco segundos. A umidade absoluta foi calculada a partir das temperaturas de bulbo úmido e seco, sendo calculado posteriormente a umidade adimensional de acordo com a Eq. 1. Onde $UA_{(t)}$ é a umidade do ar de acordo com o tempo, UA_0 é a umidade inicial, e UA_e é a umidade em equilíbrio dinâmico.

$$U_{ad} = \frac{UA_{(t)} + UA_e}{UA_0 + UA_e} \quad (1)$$

3.1.3.1 Cálculo do balanço de massa

Com os dados obtidos nos experimentos de massa seca coletada no ciclone (M_{colet}), massa seca acumulada no leito (M_{ac}) e massa seca elutriada/retida no filtro (M_{E}), foi possível realizar o balanço de massa na secagem. Para isso, foi calculado a porcentagem de massa recuperada no ciclone (R), da acumulado no leito (Ac), elutriada (E) e perda (P) por meio das Equações 2, 3, 4 e 5, respectivamente. A massa adicionada na alimentação do equipamento (massa teórica), foi utilizada como referência e determinado pela vazão mássica da alimentação (W_s), concentração de sólidos (C) e o tempo de operação (θ). Para determinar a W_s , foi necessário obter a densidade da pasta por picnometria líquida, obtendo valor de $1,030 \pm 0,001 \text{ g.mL}^{-1}$.

$$R = \frac{M_{\text{colet}}}{W_s * C * \theta} * 100 \quad (2)$$

$$Ac = \frac{M_{\text{ac}}}{W_s * C * \theta} * 100 \quad (3)$$

$$E = \frac{M_{\text{E}}}{W_s * C * \theta} * 100 \quad (4)$$

$$P = 100 - R - Ac - E \quad (5)$$

3.2.3.2 Caracterização da Unidade Experimental

Para obter dados operacionais como vazão de ar, foi necessário realizar a curva fluidodinâmica do equipamento seguindo metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). As curvas fluidodinâmicas do leito de jorro foram realizadas utilizando carga de 4,0 kg de partículas de vidro, variando a vazão do gás de entrada até a formação do jorro e posteriormente sua redução gradual.

3.1.4 Análise do Diâmetro do Pó

Para análise das amostras, foi utilizado o medidor de tamanho de partícula, Mastersizer MicroPlus 2000 (Malvern), baseado em difração a laser com escala de medida entre 0,05 a 550 μm . A leitura de cada amostra no equipamento foi feita em tréplica e para este trabalho utilizou-se a média.

O diâmetro médio volumétrico ponderado ($d_{4,3}$) foi calculado usando a Eq. 6 (JINAPONG; SUPHANTHARIKA; JAMNONG, 2008), onde o parâmetro ni representa

o número de partículas de diâmetro d_i .

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (6)$$

As leituras realizadas no equipamento assumem que as partículas são esferas perfeitas. Assim, ao se converter o volume da partícula (de forma desconhecida) para o volume de uma esfera, obtém-se um diâmetro equivalente de uma esfera perfeita (sem irregularidades na superfície). Nesse contexto, vale destacar que o pó produzido nesse tipo de equipamento apresenta geometria na forma de lascas devido ao atrito dos inertes. Nos casos em que a pasta atomizada é seca antes de atingir os inertes, a geometria se aproxima mais de uma esfera, como é o caso do processo em spray-drying (SOUZA, 2003). Assim, erros nas medidas podem ser obtidos ao ser considerado a simplificação de esfera perfeita para geometria real do pó.

3.2 Resultados e Discussão

3.2.1 Caracterização Fluidodinâmica

As curvas fluidodinâmicas obtidas pela metodologia descrita por Mathur e Epstein (1974) apresentaram boa reprodutibilidade devido à sua sobreposição, como mostrado na Figura 3. Obtendo-se assim os parâmetros fluidodinâmicos de velocidade mínima de jorro (U_{mj}), queda de pressão do jorro estável (ΔP_j) e queda de pressão máxima (ΔP_{max}).

Todos os ensaios foram realizados em tréplica e com temperatura do ar de entrada de aproximadamente $30 \pm 2^\circ\text{C}$. Contudo, segundo Silva et al. (2015) a variável temperatura do ar não causa influência significativa nos dados operacionais, desta forma, os parâmetros podem ser utilizados para os ensaios a 80, 90 e 100°C . Para suprir a uma possível resistência do filtro no processo, utilizou-se velocidade do ar em 30% acima da velocidade mínima de jorro. Assim, para os experimentos realizados neste trabalho, foi utilizada vazão do ar de entrada de $1,43 \pm 0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

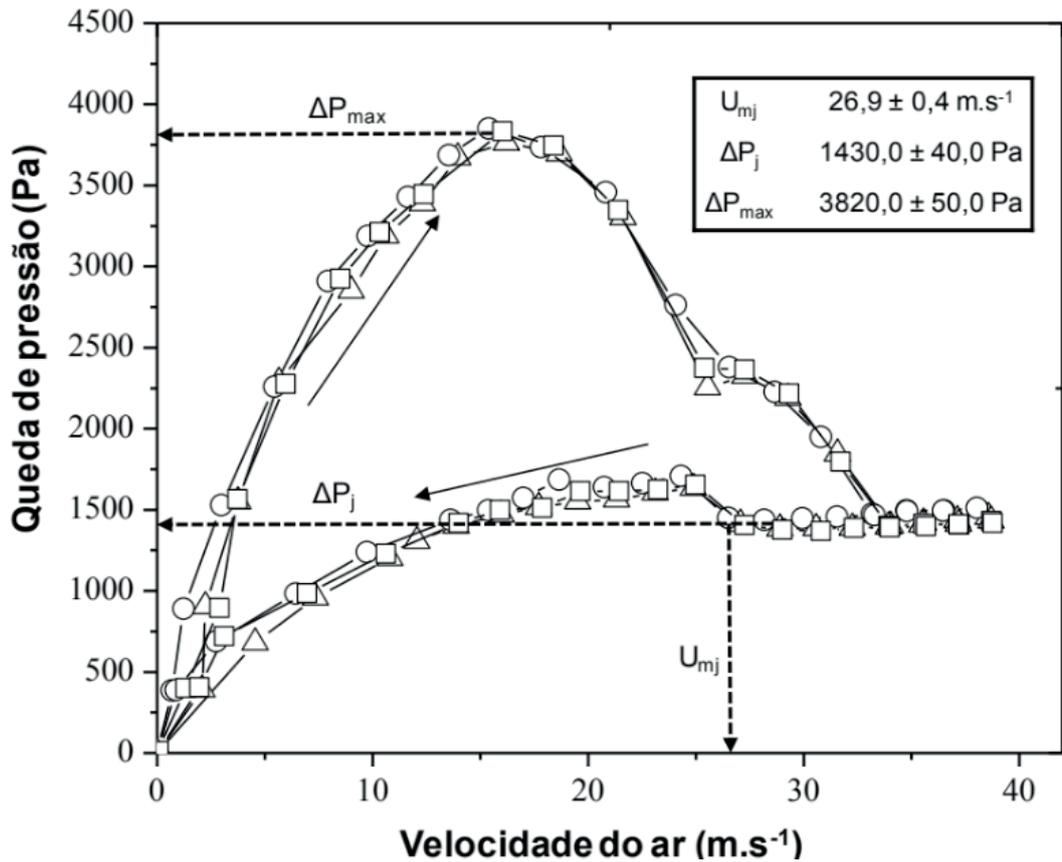


Figura 3: Queda de pressão das partículas no leito em função da velocidade do ar.

3.2.2 Umidade do Produto e do Ar de Saída

O teor de umidade do pó é um importante parâmetro de qualidade na secagem de pastas e soluções. Valores de umidade abaixo de 5% reduzem significativamente os riscos de degradação microbológica e química, proporcionando maior estabilidade física e química. Neste trabalho, o teor de umidade do pó foi inferior a 5% e não variou significativamente durante o processo de secagem (Figuras 4A e 4B). Valores semelhantes foram obtidos por Nascimento et al. (2013) para secagem de carbonato de cálcio, e por Almeida et al. (2010) e Freire et al. (2012) para secagem de uma ampla variedade de pastas.

No entanto, na maior vazão de pasta (30 mL.min^{-1}), o teor de umidade do produto variou significativamente ao longo do processo (Figura 4B), devido à instabilidade dinâmica observada no secador nessa vazão de alimentação. Para altas taxas de alimentação, as partículas são revestidas com um filme mais espesso e um tempo de secagem mais longo é necessário. Se o tempo de residência for muito curto, uma nova camada de revestimento pode ser depositada sobre a superfície da partícula antes da remoção completa da camada anterior, de modo que a remoção de umidade é menos eficaz. Isso contribui para o aumento da aglomeração do produto e maior teor de umidade do pó (MARKOWSKI, 1992). Desta maneira, pode-se inferir que para vazão de pasta de 30 mL.min^{-1} e temperatura de 80°C essa combinação excedeu a

capacidade de secagem do equipamento.

A Tabela 1 mostra os valores médios e desvios padrão para o teor de umidade do produto no final do processo de secagem, quando em estado estacionário. Pode-se observar que para vazão de 30 mL.min⁻¹, o aumento da temperatura do ar de 80 para 100°C causou uma redução no teor médio de umidade do pó próximo de 70%. Enquanto que para menores vazões de pasta esse fato não foi observado, podendo-se inferir que a temperatura do ar é mais significativa para o processo próximo da capacidade máxima do equipamento do que para capacidades mais baixas. A vazão de pasta também apresentou influência nos valores de umidade do produto, sendo que para maior vazão e menor temperatura, foi observado umidade do produto próximo de 7%. Souza e Oliveira (2005) obtiveram resultados semelhantes ao operar próximo à capacidade máxima de secagem, com um teor médio de umidade de aproximadamente 9%.

Vazão de pasta	80°C	90°C	100°C
10 mL.min ⁻¹	0,40±0,04	0,35±0,04	0,40±0,10
30 mL.min ⁻¹	7,00±2,00	2,00±2,00	2,00±2,00

Tabela 1: Conteúdo de umidade do produto (base úmida) no final do processo (70 minutos).

As Figuras 4 C e D mostram a umidade adimensional do ar medidas na saída do ciclone em função do tempo, para diferentes temperaturas de operação. Pode-se observar que houve um aumento abrupto da umidade do ar nos primeiros minutos de secagem, devido à inserção da pasta no leito. À medida que o tempo aumentou e a dinâmica de secagem estabilizou, o sistema atingiu um estado estacionário.

A umidade adimensional foi menor em uma vazão de pasta de 10 mL.min⁻¹ (Figura 4C), comparada às vazões de 30 mL.min⁻¹ (Figura 4D), sugerindo que a capacidade máxima de secagem não havia sido atingida em 10 mL.min⁻¹. Não foi observada influência significativa da temperatura na umidade relativa do ar para vazões de 10 mL.min⁻¹. No entanto, um efeito da temperatura pode ser visto para uma de 30 mL.min⁻¹.

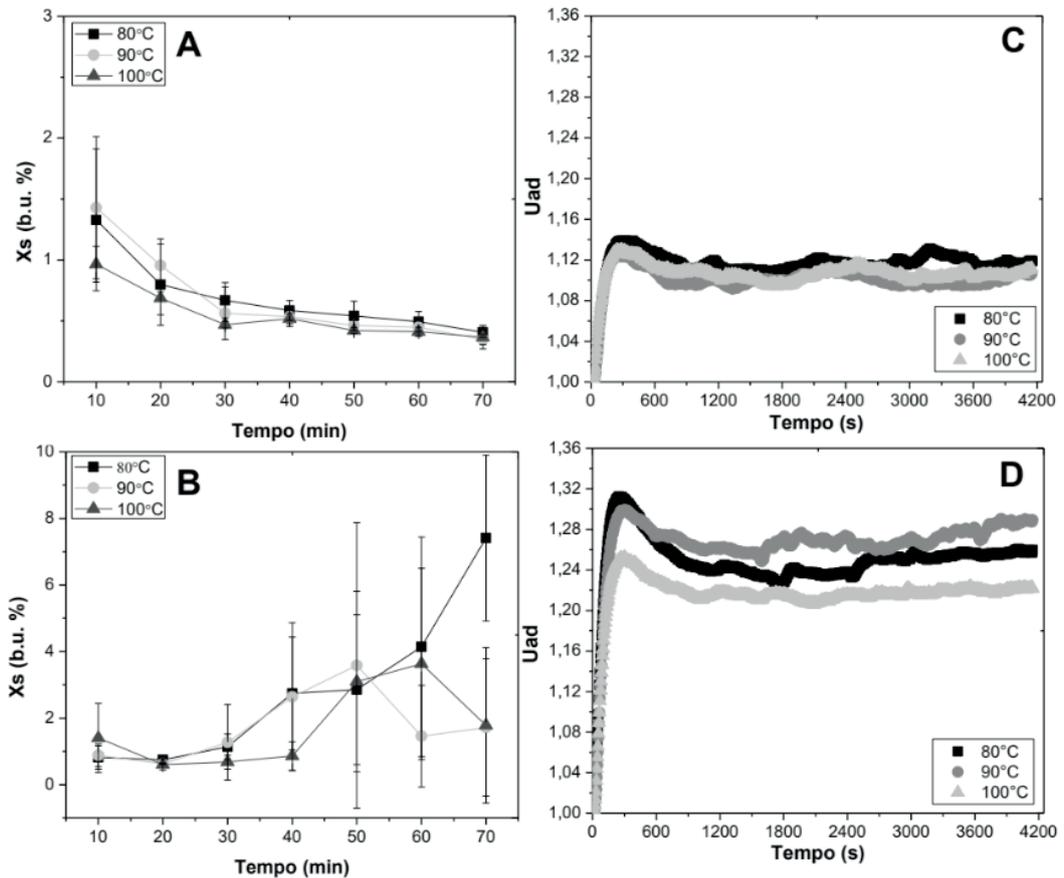


Figura 4: Teor de umidade do pó (base úmida) em função do tempo de secagem (Legenda: A - 10mL.min⁻¹; B - 30mL.min⁻¹) e umidade do ar adimensional em função do tempo de secagem (Legenda: C - 10mL.min⁻¹; D - 30mL.min⁻¹).

3.2.3 Análise do Balanço de Massa Global

Para efeito de comparação nesse tópico foram retirados os valores obtidos de 80°C, pois mesmo para 10 mL.min⁻¹ os desvios padrões foram os maiores nos experimentos, pois o secador estava fora de sua região boa de operação.

O processo de secagem de pasta na temperatura de 80°C foi considerado insuficiente para realizar uma secagem com estabilidade e baixa variação dos resultados. Esse resultado pode ser justificado pelo fato da condição de menor temperatura (80°C), o potencial de secagem foi menor e assim a taxa de remoção e evaporação de água seria inferior quando comparado com 90 e 100°C. Assim, a maior quantidade de água no leite dificulta a remoção do filme sólido acarretando maior acúmulo. Com o filme ainda úmido, uma nova camada de pasta recobri o filme novamente, podendo favorecer a aglomeração com outra partícula inerte na mesma condição. O aglomerado de pasta-produto-inerte começa a aumentar de tamanho, sendo depositado na região de menor movimentação, diminuindo assim a eficiência de secagem pela menor taxa de circulação dentro do leito. Resultado similar foi obtido por Vieira et al. (2013) utilizando o mesmo equipamento, mudando o inerte (2 kg de polietileno) e a pasta (leite bovino UHT), para a mesma vazão de 30 mL.min⁻¹, chegando à conclusão que para essa vazão causa instabilidade e colapso do leito de partículas.

Na Tabela 2 são apresentados os dados do balanço de massa global realizado no leito de jorro. Observa-se que a porcentagem acumulada no leito possui valor muito próximo para as mesmas temperaturas e vazões de alimentação, aproximadamente 29%. Foi verificado por Souza (2003) um efeito entre a redução da porcentagem acumulada em função do aumento da temperatura do gás de entrada, alcançando redução entre 36 a 77% quando utilizada temperatura mais elevada. Contudo essa redução no acúmulo pode ter sido observada porque o autor utilizou uma maior variação entre as temperaturas do gás de entrada (150 e 80°C).

Temperatura do ar	Vazão de pasta	R (%)	Ac (%)	E (%)	P (%)
90	10	47,0±2,0	30,0±2,0	5,0±2,0	18,0±2,0
90	30	43,0±8,0	33,0±5,0	4,5±0,9	19,0±12,0
100	10	53,0±1,0	26,0±1,0	8,0±1,0	13,0±0,2
100	30	42,0±6,0	27,0±3,0	5,0±2,0	26,0±9,0

Tabela 2: Média e desvio padrão da porcentagem de massa acumulada (Ac), elutriada (E), recuperada (R) e perdida (P) no processo de secagem.

A massa acumulada no leito foi calculada pela soma da massa contida nos inertes no final da secagem e da massa retida na parede do equipamento. Entretanto, a massa retida nos inertes representa a maior parte do acúmulo, próximo de 80 e 86% (90 e 100°C, respectivamente) para 10 mL.min⁻¹, enquanto que para vazão de 30 mL.min⁻¹ foi próximo de 70% para 90 e 100°C.

Para a porcentagem de massa recuperada no ciclone (R) não foi observado um efeito direto com a temperatura ou com a vazão de alimentação (Tabela 2), entretanto observa-se que o aumento da vazão de pasta favoreceu o aumento do desvio padrão no processo, mostrando aparente instabilidade na secagem.

Os resultados obtidos para R (%) apresentaram valores aproximados entre 42 e 53%. Este resultado pode ser considerado satisfatório quando comparados com outros autores que obtiveram recuperação de produto entre 40 e 48% (DOTTO; SOUZA; PINTO, 2011), enquanto Braga et al. (2016) obteve média de 43,5% na secagem de pasta em leito de jorro. Já Souza (2003) obteve valor médio de recuperação de 60,4%.

A massa elutriada apresentou valor médio próximo de 5%, com exceção do experimento com 10 mL.min⁻¹ e 100°C que foi aproximadamente de 8%. Foram levantadas duas hipóteses quanto a esse resultado: A força de arraste entre a partícula (pó) e o fluido (gás) foi maior para valores mais altos de temperatura, uma vez que esse aumento na temperatura acarreta aumento da viscosidade do gás e assim o aumento do coeficiente de arraste. Dessa forma, valores maiores de temperatura do gás propiciam maior massa elutriada de pó; A segunda hipótese é devido a massa da partícula em relação a quantidade de água presente, pois como mostrado na Figura 4 (A-B) inicialmente a média da umidade do pó é menor para temperatura de 100°C.

Esse fato pode facilitar a elutriação por ter-se partículas mais leves. Todavia, não foi quantificada a umidade do pó que é elutriado, assim pode ser que as partículas elutriadas na condição de 100°C apresentem uma umidade inferior para vazão de 10 mL.min⁻¹ do que aquela apresentada na Figura 4 (umidade do pó no ciclone). Para a maior vazão de alimentação (30 mL.min⁻¹) não foi observado o mesmo efeito de aumento da porcentagem elutriada em relação a temperatura. Podendo ser justificado pela maior quantidade de água contida na partícula (maior umidade no pó como mostrado na Figura 4) e assim o efeito da força de arraste seja minimizado pela força peso da partícula.

O estudo realizado por Souza (2003), apresentou uma porcentagem elutriada de 30,5 e 17,5%, respectivamente, para temperaturas do ar de entrada de 80 e 150°C, mas esses valores não foram medidos, apenas determinados pela diferença entre a massa adicionada ao sistema e a massa acumulada e recuperada no sistema. Assim seu valor foi superestimado quando comparado com os dados desse trabalho. Contudo, esse autor relatou que o processo de elutriação do pó no ciclone está relacionado com vários parâmetros que torna sua análise complexa, como a umidade e vazão do ar, diâmetro de corte do ciclone, posição do sistema de alimentação, umidade do produto e diâmetro da partícula.

A perda de massa percentual (P) está relacionada principalmente com o depósito de massa que fica aderida na tubulação. Este fato está relacionado com a umidade do material, pois para vazão mais alta (30 mL.min⁻¹) é observado maiores valores e também maiores desvios, como apresentado na Tabela 3.

3.2.4 Análise da Distribuição do Tamanho do Pó

Como esperado, as maiores partículas foram encontradas para o material acumulado no leito (D_{Ac}), com tamanhos intermediários para o produto no ciclone (D_R), e os menores tamanhos para as partículas que foram elutriadas e retidas no filtro (D_E), como mostra a Tabela 3.

O diâmetro do D_R apresentou variação em função da vazão de pasta, observando aumento das partículas nas temperaturas de 90 e 100°C. Contudo, as partículas apresentaram valores médio entre 8 e 21 μm . O aumento na vazão de pasta favoreceu o aumento do desvio padrão, mostrando que o processo ficou menos estável. Apesar dessa variação, pode-se verificar que para vazões de pasta próximas de 10 mL.min⁻¹ foi possível ter um maior controle da qualidade do produto em relação ao tamanho das partículas.

O material acumulado apresentou diâmetro de partícula significativamente maior que o D_R e D_E o que poderia ser explicado pela aglomeração de partículas no leito, sendo mais suscetíveis as forças de interação interpartículas. Valores menores de D_{Ac} (aproximadamente 28, 25 e 21 μm) foram obtidos para uma vazão de alimentação de 10 mL.min⁻¹, em comparação com 30 mL.min⁻¹ (70, 68 e 92 μm). Este fato sugere que

na condição de 10 mL.min⁻¹ ocorre menor processo de aglomeração e assim menor tamanho das partículas, tanto pela menor espessura do filme (vazão de pasta inferior) quanto pela menor umidade do pó.

Observando as partículas de tamanho D_E , pode dizer que essas partículas ficaram em uma faixa entre 2 e 5 μm . Para D_E não foi observado uma relação direta com a vazão de pasta ou com a temperatura, esse fato pode estar atrelado ao tamanho do pó, uma vez que somente as partículas mais finas são arrastadas, não sendo influenciadas por outros fenômenos (umidade e aglomeração das partículas por exemplo).

Temperatura do ar (°C)	Vazão de pasta (mL.min ⁻¹)	D_R (μm)	D_{Ac} (μm)	D_E (μm)
80	10	10,50±0,40	28,00±9,00	4,00±1,00
80	30	8,00±2,00	70,00±11,00	2,00±0,30
90	10	9,00±1,00	25,00±3,00	5,00±2,00
90	30	19,00±5,00	68,00±4,00	4,90±0,70
100	10	8,60±0,40	20,70±0,90	2,80±0,08
100	30	21,00±2,00	92,00±3,00	5,00±2,00

Tabela 3: Diâmetro da partícula ($d_{4,3}$) para as condições de operação utilizadas na secagem.

Os resultados apresentados podem ser mais claramente observados na Figura 5, apresentando a distribuição do tamanho das partículas para 10 e 30 mL.min⁻¹. Como já mencionado anteriormente o aumento da vazão de 10 para 30 mL.min⁻¹ favoreceu o aumento da fração de partículas de maior tamanho, fato esse facilmente observado na Figura 5-B para o D_{Ac} .

De modo geral, para o tamanho das partículas formadas no leito de jorro (D_{Ac} e D_R), estas dependem da temperatura e da vazão de pasta, mas existem outros fatores que podem estar atrelados a formação do pó como é o caso do atrito entre as partículas inertes entre si e com a parede do equipamento, o processo de aglomeração que ocorre dentro do leito e também dos mecanismos de secagem (convecção e/ou condução). A influência desses parâmetros também está relacionada com a forma dessas partículas, pois dependendo das condições do processo parte da pasta atomizada no topo do leito pode ser seca antes de atingir as partículas inertes por um processo similar ao spray-drying, como relado por Souza e Oliveira (2005).

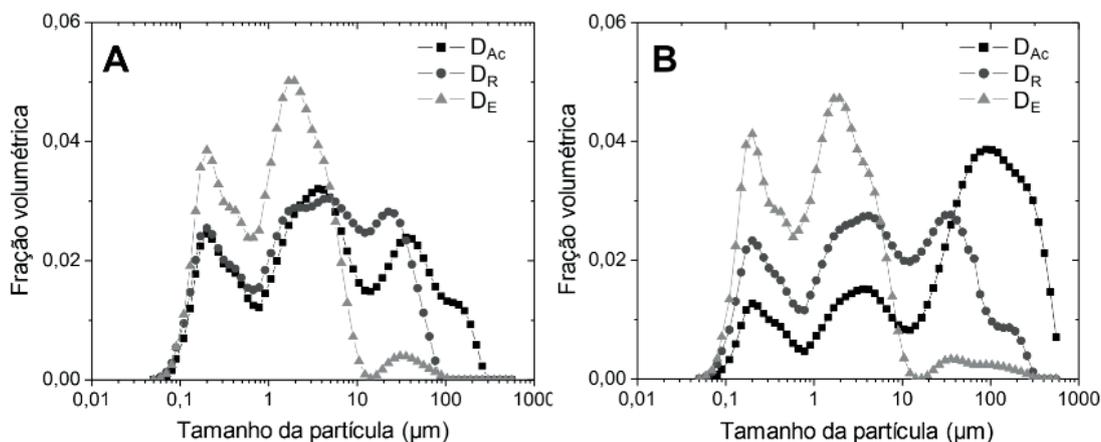


Figura 5: Fração volumétrica em função do tamanho das partículas para temperatura de 100°C. Legenda: 10 mL.min⁻¹ (A) e 30 mL.min⁻¹ (B).

As partículas utilizadas para preparar a solução de carbonato de cálcio, que foi alimentada no leito, possuíam diâmetro $d_{4,3}$ de $2,53 \pm 0,04 \mu\text{m}$. Esse resultado é muito importante, pois pode-se verificar que houve aumento no tamanho das partículas no leito (D_{Ac}) e coletada no ciclone (D_R), mas houve redução para o pó retido no filtro (D_E). Esse resultado está relacionado com a formação do filme na superfície das partículas inertes e posterior transformação deste em pó pelo atrito das partículas. Uma vez que nessas etapas ocorrem mudanças nas propriedades reológicas do filme, implicando na mudança do tamanho e da forma do pó. Assim ocorre a formação de partículas pequenas no leito que são rapidamente elutriadas, enquanto outras partículas são formadas com diâmetro superior e podem se aglomerar com outras, aumentando o seu tamanho.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou os principais resultados dos experimentos realizados no estudo de caso sobre balanço de massa e tamanho das partículas na secagem em leito de jorro. O estudo realizado, mostrou que através da adição do filtro no final do processo foi possível quantificar a porcentagem elutriada no processo, obtendo valores entre 5 e 8%. Foi observado, pelos dados do processo, que houve aglomeração e instabilidade, principalmente quando o equipamento estava próximo a sua capacidade máxima de secagem. O tamanho final das partículas depende significativamente do valor da alimentação da pasta. As maiores partículas foram do material acumulado (20 – 92 μm), as menores retidas no filtro (2 – 5 μm) e as intermediárias recuperadas no ciclone (8 – 21 μm).

Os dados aqui apresentados são de grande importância para se ter um melhor entendimento do processo de aglomeração e também da distribuição do tamanho das partículas. Entretanto novos estudos nesta área são incentivados para que no futuro

possa se controlar tanto o tamanho como a distribuição de tamanho das partículas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da Secagem de Pastas em Leito de Jorro**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 165p. (Tese de Doutorado), 2009.

ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. **Transient Analysis of Pasty Material Drying in a Spouted Bed of Inert Particles**, *Drying Technology*, v. 28, p. 330–340, 2010.

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**, Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza – CE, 2016.

CARIĆ, M. **Milk powders: Types and manufacture and physical and functional properties of milk powders**. In H. Roginski, J. W. Fuquay, & P. F. Fox (Eds.), *Encyclopedia of dairy sciences* (p. 1869–1880). New York: Academic Press, 2003.

COSTA JR., E. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.; PASSOS, M. L. **Spouted Beds of Inert Particles for Drying Suspension**, *Drying Technology*, v. 24, n. 3, p. 315-325, 2006.

CUNHA, R. L.; MAIALLE, K. G.; MENEGALLI, F. C. **Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality**, *Powder Technology*, n. 107, p. 234-342, 2000.

DOTTO, G. L.; SOUZA, V. C.; PINTO, L. A. A. **Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality**, *Food Science and Technology*, v. 44, p.1786-179, 2011.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. **A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium**, *Drying Technology*, v. 30, n. 4, p. 330-341, 2012.

JINAPONG, N.; SUPHANTHARIKA, M.; JAMNONG, P. **Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration**, *Journal of Food Engineering*, v. 84, p. 194–205, 2008.

MARKOWSKI, A. S. **Drying characteristics in a jet – Spouted bed dryer**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 70, p. 938-944, 1992.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Bed**, Academic Press, New York, 1974.

NASCIMENTO, B. S.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. **Moisture prediction during paste drying in a spouted bed moisture prediction during paste drying in a spouted bed**, *Drying Technology*, v. 31, p. 1808–1816, 2013.

PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. **Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles**, *Powder Technology*, v. 110, n. 3, p. 222-238, 2000.

PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling**, *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997.

SCHUCHMANN, H. **Production of instant foods by Jet agglomeration**, *Food Control*, v. 6, n. 2, p.95-100, 1995.

SILVA, C. A. M.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. **Modelagem dinâmica da secagem de pasta em leito de jorro**. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), Anais... São Carlos, UFSCar, p. 540-549, 2015.

SOUZA, C. R. F. **Estudo comparativo da produção de extrato seco de *Bauhinia forficata* Link pelos processos *spray-dryer* e leito de jorro**. Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto/USP, Ribeirão Preto, 180p. (dissertação de mestrado), 2003.

SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. **Spouted bed drying of *Bauhinia forficata* link extract: the effects of feed atomizer position and operating conditions on equipment performance and product properties**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 22, n. 02, p. 239-247, 2005.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1987.

VIEIRA, G. N. A.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. **Modelagem da secagem transiente de pastas em leito de jorro a partir da resposta dinâmica da evaporação de água e da cinética de secagem de pasta**. In: XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), 2013, Maceió - AL. Anais... Universidade Federal de Alagoas, p. 1577-1584, 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro (Processo: 134370/2016-3), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSCar, ao Centro de Secagem (CS) da UFSCar e ao Departamento de Controle Ambiental.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-084-1

