

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

João Pedro Alves de Azevedo Barros

**ACÚMULO, ELUTRIAÇÃO E RECUPERAÇÃO DO PRODUTO NA SECAGEM DE
PASTA EM LEITO DE JORRO**

São Carlos
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

João Pedro Alves de Azevedo Barros

**ACÚMULO, ELUTRIAÇÃO E RECUPERAÇÃO DO PRODUTO NA SECAGEM DE
PASTA EM LEITO DE JORRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

São Carlos
2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE JOÃO PEDRO ALVES DE AZEVEDO BARROS APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 09 DE MARÇO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:


José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar


Maria do Carmo Ferreira
UFSCar


Gustavo Nakamura Alves Vieira
UNESP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTO

Acima de tudo a Deus que me deu força, determinação e os meios necessários para realizar o mestrado. A minha família que amo muito, principalmente a minha mãe Euvalda Alves de Azevedo por ter me ajudado e apoiado em todas as etapas da minha vida. Ao meu pai Joaquim Lima de Barros por ter me incentivando a fazer o mestrado e aos meus irmãos, Lucas e João Vitor, pelo companheirismo e união.

Agradeço ao meu orientador José Teixeira Freire pela dedicação em me orientar nessa importante fase e aos professores Fábio Bentes Freire e Maria do Carmo Ferreira.

A todos meus amigos do Centro de Secagem, tanto pela ajuda em experimentos e discussões, quanto aos inesquecíveis momentos. Obrigado pela grande amizade turma.

Agradeço também ao DEQ/UFSCar e ao departamento de controle ambiental pela ajuda com os laboratório e equipamentos.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

RESUMO

Um dos equipamentos que vem se destacando principalmente na secagem de pastas e soluções é o leito de jorro. Nesse tipo de equipamento alguns fatores que podem inviabilizar a sua utilização são problemas operacionais causados pelo processo de aglomeração e acúmulo de material dentro do leito. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal quantificar a porcentagem de massa acumulada no leito (Ac), recuperada no ciclone (R) e elutriada para o filtro (E). Como objetivo secundário, foi investigado o efeito da adição do filtro na queda de pressão no leito e identificado como a granulometria do pó se modifica em função das condições operacionais do processo. Para atingir os objetivos propostos, foram realizados experimentos de secagem em leito de jorro convencional, sendo a alimentação de pasta feita com suspensão de carbonato de cálcio (5%). Alterando as condições operacionais de vazão de pasta alimentada (10, 20 ou 30 mL.min⁻¹) e temperatura do ar (80, 90 ou 100°C), foram coletados dados para realizar um balanço de massa global na secagem. Resultados iniciais mostraram que a utilização do filtro no sistema de secagem não acarretou alterações significativas na curva característica do leito de jorro, mas causou um aumento da perda de carga, tanto inicial quanto ao longo do processo. Para a secagem de pasta ficou evidente que o aumento da vazão de pasta acarretou no aumento da instabilidade do leito, sendo que a capacidade máxima foi atingida para 30 mL.min⁻¹, podendo operar com 90 e 100°C. Mas foi ultrapassada para 80°C devido à baixa recuperação de produto no ciclone, alta umidade do produto e grande variação nos dados obtidos. O material acumulado ficou em torno de 23 a 34% e o elutriado apresentou valores entre 2 a 8%, enquanto o produto recuperado foi de 11 a 53%. O planejamento experimental proposto (DFC) mostrou que tanto a temperatura do ar de entrada quanto vazão de pasta alimentada influenciam diretamente no processo, mas somente para o acúmulo a temperatura foi significativa. Os resultados mostraram que o aumento da vazão de pasta tem efeito negativo na R (%) e na E (%), enquanto o aumento da temperatura teve efeito positivo. A granulometria do pó foi fortemente influenciada pela vazão de pasta, aumentando o tamanho das partículas com o aumento da vazão de pasta alimentada, abrangendo tamanhos em toda a faixa analisada (0,05 a 550 µm). Como esperado, partículas maiores ficaram acumuladas no leito, as intermediárias recuperadas no ciclone e as menores retidas no filtro. Com os resultados desse trabalho foi possível ter um maior entendimento sobre a secagem em leito de jorro, tanto para a eficiência e perdas do processo, quanto para a granulometria do produto que se altera com o processo de aglomeração.

PALAVRAS-CHAVE: secagem; leito de jorro; acúmulo; elutriação; granulometria.

ABSTRACT

One of the equipment that has been highlighting mainly in the drying of pastes and solutions is the spouted bed. In this type of equipment some factors that can make it impossible to use are operational problems caused by the process of agglomeration and accumulation of material inside the bed. In this way, the main objective of this work was to quantify the percentage of mass accumulated in the bed (Ac), recovered in the cyclone (R) and elutriated to the filter (E). As a secondary objective, we investigated the effect of the addition of the filter on the drop in pressure in the bed and identified how the powder granulometry modifies as a function of the process operating conditions. In order to reach the proposed objectives, drying experiments were carried out in a conventional spouted bed, and the paste feed was made with calcium carbonate suspension (5%). Changing the operating conditions of the paste feed flow (10, 20 or 30 mL.min⁻¹) and air temperature (80, 90 or 100°C), data were collected to perform a global mass balance in the drying. Initial results showed that the use of the filter in the drying system did not lead to significant changes in the characteristic curve of the spouted bed, but caused an increase in the initial and in the course of the process. For paste drying it was evident that the increase in paste feed flow resulted in increased bed instability, with the maximum capacity reached 30 mL.min⁻¹, being able to operate at 90 and 100°C. But it was surpassed to 80°C due to the low recovery of product in the cyclone, high humidity of the product and great variation in the obtained data. The accumulated material was around 23 to 34% and the elutriate presented values between 2 to 8%, while the recovered product was 11 to 53%. The proposed experimental design (FCC) showed that both the incoming air temperature and the paste feed flow directly influenced the process, but only for the accumulation was the temperature significant. The results showed that the increase in paste feed flow has a negative effect on R (%) and E (%), while the increase in temperature had a positive effect. The grain size of the powder was strongly influenced by the paste flow, increasing the particle size with the increase of the paste feed flow, covering sizes throughout the analyzed range (0.05 to 550 µm). As expected, larger particles were accumulated in the bed, the intermediate recovered in the cyclone and the smaller ones retained in the filter. With the results of this work it was possible to have a better understanding of the drying in the spouted bed, both for the efficiency and losses of the process, and for the granulometry of the product that changes with the agglomeration process.

KEYWORDS: drying; spouted bed; accumulation; elutriation; granulometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Secagem de pasta em leito de jorro com ciclone.	11
Figura 2.1 – Regimes de fluidização em função da velocidade e pressão do leito, representando a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).	16
Figura 2.2 – Diagrama de Geldart para fluidização de partículas.	17
Figura 2.3 – Transição de Fase (A) e Diagrama de regime (B) em função do aumento da velocidade do fluido. Parâmetros: Grão de Trigo; $d_p = 3,2 \times 6,4 \text{ mm}$, $D_e = 15,2\text{cm}$ e $D_i = 1,25\text{cm}$	17
Figura 2.4 – Secador leito de jorro com alimentação.	18
Figura 2.5 – Curva característica de um Secador Leito de Jorro. Dados: $d_p = 3,6\text{mm}$, $D_e = 15,2\text{cm}$, $D_i = 1,27\text{cm}$, $\gamma = 60^\circ$	20
Figura 2.6 – Processo de recobrimento das partículas e formação do produto (pó).	23
Figura 3.1 – Sistema de secagem.	31
Figura 3.2 – Vista lateral do atomizador de duplo fluido.	32
Figura 3.3 – Psicrómetro montado na saída do sistema de secagem.	34
Figura 4.1 – Queda de pressão em função da velocidade do ar no leito.	41
Figura 4.2 – Queda de pressão em função da velocidade do ar somente dos inertes, para diferentes cargas de inerte.	42
Figura 4.3 – Queda de pressão das partículas em função da velocidade do ar para 4 kg de inerte.	44
Figura 4.4 – Temperatura na saída (A) e umidade relativa (B) na saída do leito em função do tempo de operação.	45
Figura 4.5 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação.	46
Figura 4.6 – Queda de pressão total em função da velocidade do ar no leito.	47
Figura 4.7 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	48
Figura 4.8 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	49
Figura 4.9 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	50
Figura 4.10 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$	50

Figura 4.11 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 20 mL.min ⁻¹	51
Figura 4.12 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 30 mL.min ⁻¹	52
Figura 4.13 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 10 mL.min ⁻¹	53
Figura 4.14 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 20 mL.min ⁻¹	54
Figura 4.15 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 30 mL.min ⁻¹	54
Figura 4.16 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de 10 mL.min ⁻¹	55
Figura 4.17 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de 20 mL.min ⁻¹	55
Figura 4.18 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de 30 mL.min ⁻¹	56
Figura 4.19 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de secagem para as repetições (Rep 1, 2 e 3) do experimento a 10 mL.min ⁻¹ e 100°C.....	58
Figura 4.20 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para diferentes vazões de alimentação na temperatura de 90°C.	59
Figura 4.21 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de secagem para os experimentos a 20 mL.min ⁻¹	59
Figura 4.22 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para vazões de alimentação de 30mL.min ⁻¹	60
Figura 4.23 – Gráfico de Pareto para os valores de R (%).	64
Figura 4.24 – Gráfico de Pareto para os valores de Ac (%).	64
Figura 4.25 – Gráfico de Pareto para os valores de E (%).	65
Figura 4.26 – Superfície de resposta da R (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.	66
Figura 4.27 – Superfície de resposta da Ac (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.	67
Figura 4.28 – Superfície de resposta da E (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.	68

Figura 4.29 – Distribuição do tamanho das partículas do material acumulado para vazão de pasta de 10 mL.min ⁻¹ a 100°C.	69
Figura 4.30 – Distribuição do tamanho das partículas da D _{Ac} (A), D _R (B) e D _E (C) para vazão de pasta de 10 mL.min ⁻¹ . Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).	70
Figura 4.31 – Distribuição do tamanho das partículas da D _{Ac} (A), D _R (B) e D _E (C) para vazão de pasta de 20 mL.min ⁻¹ . Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).	71
Figura 4.32 – Distribuição do tamanho das partículas da D _{Ac} (A), D _R (B) e D _E (C) para vazão de pasta de 30 mL.min ⁻¹ . Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).	72
Figura 4.33 – Aglomerado no leito para vazão de 30mL.min ⁻¹ de pasta na temperatura de 90°C. A) Aglomeração de pasta-inerte-produto; B) Aglomeração de produto seco.	75
Figura 4.34 – Distribuição do tamanho das partículas da amostra inicial.	76
Figura 3.35 – Adimensional da umidade absoluta (A) e temperatura do ar (B) na saída do leito de jorro para vazão de pasta de 30 mL.min ⁻¹ e 100°C.	78
Figura 4.36 – Recuperação do produto em função do tempo de operação com intermitência.	79
Figura 4.37 – Temperatura do ar (A) e Umidade Relativa (B) na saída do leito na operação com intermitência.	80
Figura 4.38 – Recuperação do produto em função do tempo de operação com 4 ciclos de intermitência.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados do balanço de massa e tamanho médio das partículas.	28
Tabela 3.1 – Descrição dos componentes do sistema.	33
Tabela 3.2 – Planejamento experimental para os ensaios realizados.	40
Tabela 4.1 – Parâmetros da curva fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes cargas de inerte.	43
Tabela 4.2 – Parâmetros fluidodinâmicos para o leito de jorro.	44
Tabela 4.3 – Umidade do produto em base úmida (%) no final do processo (70 minutos).....	52
Tabela 4.4 – Dados da umidade absoluta e relativa do ar.	57
Tabela 4.5 – Média e desvio padrão das respostas do planejamento experimental utilizadas no processo de secagem.	61
Tabela 4.6 – Efeitos estimados e valor de p-valor para $\alpha = 0,05$	62
Tabela 4.7 – Análise de variância (ANOVA).	66
Tabela 4.8 – Média e desvio padrão do Span.	73
Tabela 4.9 – $D_{4,3}$ das condições operacionais utilizadas no processo de secagem.	73
Tabela 4.10 – Média e desvio padrão da massa de CaCO_3 para secagem com intermitência.....	78
Tabela 4.11 – Comparação entre o processo de secagem contínuo e intermitente.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ac	Porcentagem de massa acumulada no leito	[%]
C _s	Concentração de sólidos totais	[% m/m]
d _p	Diâmetro da partícula inerte	[mm]
d _{4,3}	Diâmetro médio	[μm]
D _{Ac}	Diâmetro do pó acumulado no leito	[μm]
D _c	Diâmetro da coluna cilíndrica do leito de jorro	[m]
D _E	Diâmetro do pó retido no filtro	[μm]
D _i	Diâmetro de entrada do ar	[m]
D _R	Diâmetro do pó recuperado no ciclone	[μm]
d _{v90}	Tamanho de partícula a partir do qual 90% do volume das partículas encontrasse abaixo deste valor.	[μm]
d _{v50}	Tamanho de partícula a partir do qual 50% do volume das partículas encontrasse abaixo deste valor.	[μm]
d _{v10}	Tamanho de partícula a partir do qual 10% do volume das partículas encontrasse abaixo deste valor.	[μm]
E	Porcentagem de massa elutriada	[%]
H	Altura do leito de partículas inertes	[m]
H _c	Altura do cilindro	[m]
m _{CaCo3}	Massa de carbonato de cálcio	[g]
M _c	Massa coletada	[g]
M _{FF}	Massa final do filtro	[g]
m _{H2O}	Massa de água	[g]
M _{IF}	Massa inicial do filtro	[g]
M _{parede}	Massa retida na parede interna do leito de jorro	[g]
M _{pf}	Massa final das partículas inertes	[g]
M _{pi}	Massa inicial das partículas inertes	[g]
P	Porcentagem de perda no processo	[%]
Q	Vazão volumétrica de ar	[m ³ .min ⁻¹]
R	Porcentagem de massa recuperada no ciclone	[%]
U	Velocidade do ar	[m.s ⁻¹]
U _{ad}	Umidade adimensional	[-]

UA_e	Umidade absoluta de equilíbrio	[-]
UA_0	Umidade absoluta inicial	[-]
$UA_{(t)}$	Umidade absoluta no tempo	[-]
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização	[m.s ⁻¹]
U_{mj}	Velocidade de mínimo jorro	[m.s ⁻¹]
UR_t	Umidade relativa no tempo	[%]
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	[%]
W_s	Vazão de suspensão alimentada	[g.min ⁻¹]
X_s	Fração mássica de água no sólido coletado no ciclone	[-]
γ	Ângulo do cone	[°]
α	Nível de significância	[-]
θ	Tempo de processo	[min]
ΔP	Queda de pressão	[Pa]
ΔP_m	Queda de pressão máxima	[Pa]
ΔP_j	Queda de pressão mínima para jorro estável	[Pa]
ΔP_t	Queda de pressão no tempo	[Pa]
$\Delta P_{t=0}$	Queda de pressão no tempo zero	[Pa]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	O processo de secagem	14
2.2	Regime de fluidização	15
2.3	Secador tipo leito de jorro.....	18
2.3.1	Fluidodinâmica de um secador leito de jorro.....	19
2.3.2	Características do leito de jorro	21
2.4	Secagem de pasta	22
2.4.1	Fenômenos envolvidos na secagem em leito de jorro.....	23
2.4.2	Forças interpartículas	24
2.5	Acúmulo e elutriação de produto dentro do leito de jorro	25
2.5.1	Estudos realizados na área	27
2.5.2	Barret e Fane (1990)	27
2.5.3	Souza (2003)	28
2.5.4	Silva (2016).....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Unidade experimental	31
3.1.1	Inertes.....	35
3.1.2	Filtro.....	35
3.2	Alimentação de pasta no leito	35
3.3	Procedimento experimental	36
3.3.1	Caracterização fluidodinâmica.....	36
3.3.2	Condições operacionais.....	37
3.3.3	Análise granulométrica do pó	37
3.4	Balanço de massa.....	38

3.5	Planejamento experimental.....	39
3.6	Testes preliminares	40
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	41
4.1	Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro.....	41
4.2	Capacidade máxima evaporativa	45
4.3	Secagem de Pasta.....	47
4.3.1	Recuperação do produto.....	48
4.3.2	Umidade do produto.....	50
4.3.3	Temperatura e Umidade do ar na saída.....	53
4.3.4	Queda de pressão no leito de jorro.....	57
4.3.5	Análise estatística do balanço de massa.....	61
4.4	Distribuição granulométrica	69
4.5	Secagem com intermitência	77
5	CONCLUSÕES.....	83
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
	APÊNDICE: DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ABSOLUTA E RELATIVA DO AR NA SAÍDA DO SISTEMA POR CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICOS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda do mercado que utiliza o processo de secagem, é necessário reduzir custos de operação e aquisição, melhorando e garantindo sempre a qualidade dos produtos. O processo de secagem é utilizado principalmente para elevar a resistência dos produtos ao ataque de bactérias e fungos que se proliferam na presença de alta umidade (evita também algumas reações de oxidação) e facilitar o transporte e armazenamento, pois reduz significativamente seu peso e volume.

Desta forma, novas técnicas estão sendo desenvolvidas com o intuito de aperfeiçoar as condições operacionais, melhorar as características do produto final e diminuir custos, uma vez que grande parte da energia da indústria é destinada a operação de secagem.

Dentre as diversas técnicas utilizadas atualmente, se destaca principalmente na secagem de pastas e soluções, o secador tipo leito de jorro (Figura 1.1). Entretanto a melhor escolha para o tipo de tecnologia de secagem está atrelada às propriedades dos componentes envolvidos, características do material e condições operacionais.

O processo de secagem em leito de jorro se baseia pela passagem ascendente de ar quente em uma coluna cônica-cilíndrica com partículas inertes, onde a pasta alimentada é dispersa sobre um leito de partículas inertes. Desta forma, ocorre a secagem dessa pasta e a formação do pó (produto), que é arrastado pela corrente de gás e separado pelo ciclone.

Figura 1.1 – Secagem de pasta em leito de jorro com ciclone.



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2005.

Essa técnica apresenta grandes vantagens em relação a outros secadores, apresentando custos iniciais e de operação bastante favoráveis, além disso, sua utilização para secagem de grãos e pastas/soluções apresenta grande flexibilidade e proporciona altas taxas de transferência de calor e massa devido ao alto grau de mistura e contato entre partículas e fluido. Contudo, o leito de jorro pode ser restritivo quanto a sua ampliação e problemas operacionais (instabilidade do jorro, aglomeração de partículas e acúmulo), dificultando sua ampla utilização na indústria.

Vários trabalhos são encontrados na literatura relatando os efeitos fluidodinâmicos e de transferência de calor e massa no processo de secagem em leito de jorro. Entretanto é complexa a sua completa descrição, pois depende do tipo de pasta, concentração e vazão de alimentação, vazão e temperatura do gás de entrada e queda de pressão no sistema, dentre outras características. Caso não haja um bom controle dessas variáveis, o regime de jorro pode sofrer modificações, devido a aglomerações de partículas-partículas e partículas-inerte, queda de temperatura do leito e acúmulo, podendo causar o colapso do jorro e o fim do processo de secagem.

Contudo, poucos estudos consideram as características do acúmulo e os efeitos da aglomeração no processo, sendo quase sempre desprezada nas considerações para desenvolver modelos e simulações. Isto pode trazer implicações na precisão da sua operacionalidade. Para tentar evitar a aglomeração e o acúmulo, pode-se utilizar uma vazão e temperatura do gás de entrada maior que o necessário para realizar a secagem, levando a gastos de recursos desnecessários, ou utilizar vazões baixas na alimentação de pasta, o que ocasiona baixas taxas de produção.

Além das condições operacionais influenciarem nesses fatores, também está relacionado com as perdas do processo, ou seja, a redução do rendimento. Um dos fatores que eleva as perdas é a elutrição do produto.

Desta forma o aumento da vazão de ar, temperatura e vazão de alimentação, pode agravar o arraste de pó, sendo necessário adicionar um filtro no final do processo para coletar a massa de produto perdida por arraste.

Quando um filtro não é colocado após o ciclone para coletar e quantificar a massa perdida pelo arraste isto dificulta o completo balanço de massa no sistema. Sendo assim, não é possível saber a exata eficiência de secagem e formação de pó, pois uma parte da massa é perdida juntamente com o ar no ciclone. Para que possa realizar um balanço de massa global

no processo é necessário quantificar essa massa e saber quais são os fatores que levam a esse araste de partículas do pó.

Desde 1980 o Centro de Secagem (CS) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UFSCar vem pesquisando sobre leito de jorro e suas aplicações industriais. Dessa forma, dando continuidade aos trabalhos desenvolvidos no CS, esse estudo tem como objetivo quantificar a massa de produto que fica retido no leito (acumulado), perdida pela elutriação (retida no filtro) e a recuperada no ciclone, determinando assim a eficiência do processo, em função da temperatura do ar e da vazão de alimentação de pasta. Como objetivos específicos foi analisado a influência da granulometria do pó gerado na secagem em leito de jorro em função das condições operacionais de temperatura do ar e vazão de pasta alimentada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de secagem

Nas indústrias de alimentos o processo de secagem é um dos métodos mais antigos para preservar os alimentos e aumentar o tempo de duração para consumo. Tem como vantagem a redução do peso para transporte e reduzir os requisitos de segurança alimentar nas embalagens (menor atividade microbiológica), que são benefícios importantes no mercado (OKOS, 1992; SIMAL et al., 2000).

Apesar de rudimentar, o primeiro método de secagem era a exposição ao sol. Esse método sofreu grandes mudanças, pois não era adequado para aplicação em larga escala. Desta forma, a secagem artificial vem para sanar esse problema. Os primeiros indícios de secagem artificial de alimentos surgem no século XVIII, trazendo grandes benefícios para a população (VEGA-MERCADO et al., 2001; TOĞRUL; PEHLIVAN, 2004), uma vez que a redução da umidade do produto propicia a inibição de processos metabólicos de microrganismos patogênicos (CHRIST, 2006), e a redução de reações químicas (VEGA-MERCADO et al., 2001) tendo com o resultado final a preservação do produto e o aumento da validade.

Normalmente o processo de secagem é realizado por uma corrente de ar quente, onde ocorre a evaporação da água contida no material. Esse processo ocorre de duas formas: pela transferência de calor (energia térmica fornecida pelo gás) e o aumento da pressão de vapor da água devido ao aumento de temperatura local (SPITZNER NETO, 2001). Esse processo requer uma grande quantidade de energia da fonte quente, sendo considerado extremamente energético (SILVA, 2016), podendo chegar a somente 25 e 50% de eficiência energética e em alguns casos alcançando valores próximos a 10% (JUMAH et al., 2006).

Existem vários métodos de secagem, cada um deles apresentando seus benefícios para cada tipo de processo. Mas a seleção do melhor secador deve ser baseada na matéria prima, produtos intermediários, especificações e características do produto final (VEGA-MERCADO et al., 2001; SILVA, 2016). Desta forma, várias técnicas têm sido aprimoradas ao longo do tempo para melhorar a eficiência de secagem, diminuindo custos, melhorar a qualidade do produto, aumentar capacidade de processamento e aproveitamento energético. Esses fatores contribuíram para o desenvolvimento de novas técnicas, sendo umas das mais promissoras apresentadas na literatura é a secagem em leito de jorro. Essa técnica foi observada devido um

problema em um leito fluidizado, ou seja, o regime de fluidização mudou e proporcionou maiores taxa de circulação dos inertes (GISHLER; MATHUR, 1954).

2.2 Regime de fluidização

A fluidização ocorre quando um fluido ascendente atua sobre um leito de partículas, mantendo este suspenso. Os estudos desenvolvidos sobre fluidização têm grande importância em diversas áreas do conhecimento, sendo que uns dos parâmetros importantes são a velocidade do fluido, porosidade e pressão (SILVA, 2003).

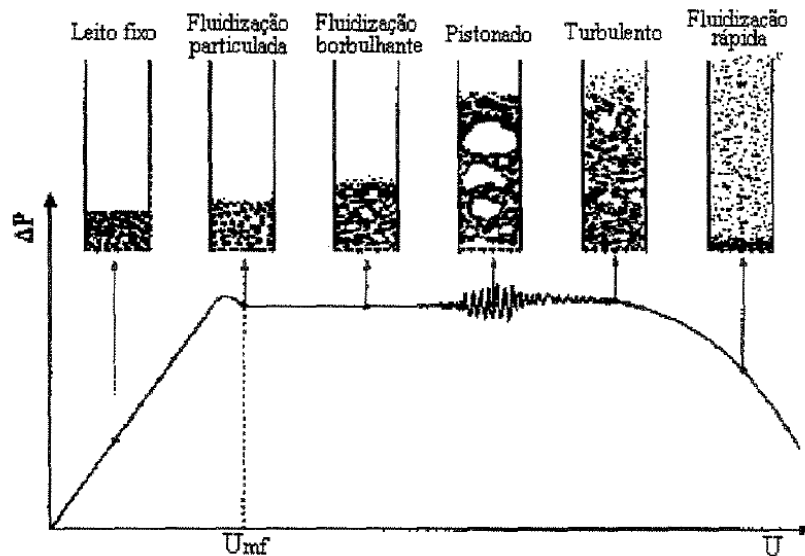
Quando um gás é distribuído na base de uma coluna que contém partículas sólidas, diferentes regimes fluidodinâmicos podem surgir de acordo com as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, tamanho médio, forma e massa específica), das características do fluido (viscosidade dinâmica e massa específica) e também das condições operacionais do secador (temperatura e vazão do fluido, altura efetiva e diâmetro do equipamento) (CREMASCO, 2012). Assim, quando a velocidade é aumentada, a fluidodinâmica muda e o perfil do movimento das partículas na coluna também.

Grace (1984) relatou que esses regimes variam desde uma velocidade quase nula do gás e uma velocidade mínima de fluidização (leito fixo ou empacotado), onde quase não se tem movimentação das partículas e o fluido escoar pelos seus interstícios, até uma fluidização rápida (transporte pneumático), onde a velocidade do gás está muito acima da mínima de fluidização, ultrapassando a velocidade terminal das partículas, ocorrendo o transporte para fora do leito.

Quando a força exercida pelo gás se iguala com o peso das partículas, ocorre a elevação da porosidade do leito e assim a movimentação das partículas, caracterizando a velocidade mínima de fluidização (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Entre o regime de leito fixo e o de fluidização rápida, tem outros regimes como: fluidização particulada, borbulhante, pistonada e turbulenta, como pode ser observado na Figura 2.1.

Devido a passagem de ar pelo leito de partículas, ocorre o aumento da pressão até atingir a U_{mf} , a partir dessa velocidade a pressão do leito permanece praticamente constante com o aumento da velocidade do ar. Contudo quando se atinge valores muito acima da U_{mf} pode-se observar um comportamento de leito pistonado ou também chamado de borbulhante, onde bolhas de ar são formadas causando variação na pressão (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Regimes de fluidização em função da velocidade e pressão do leito, representando a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).



Fonte: GRACE, 1984.

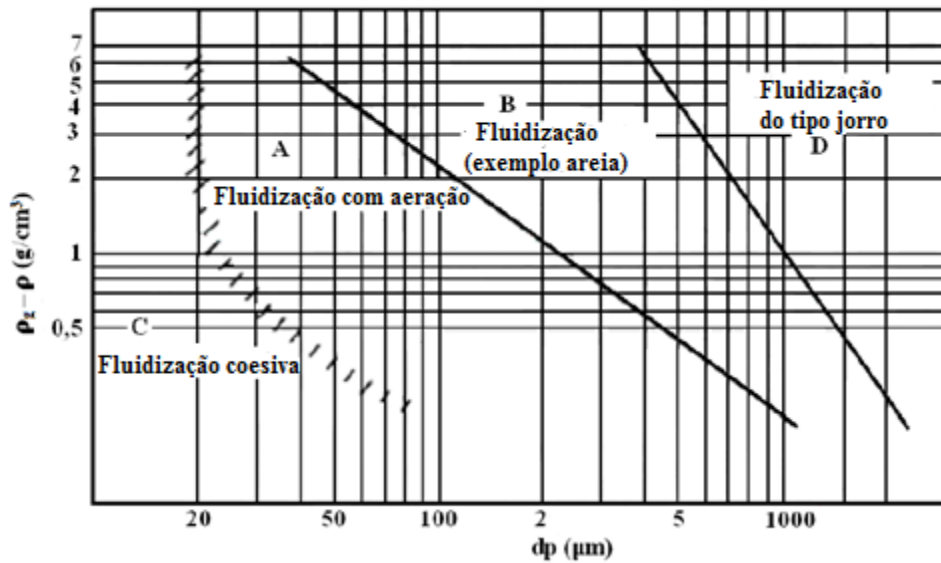
Shilton e Niranjana (1993) concluíram que o leito fluidizado é uma das técnicas de secagem mais promissoras para o processamento de alimentos particulados, mas para uma pequena faixa de diâmetro de partícula (entre 1,0 e 3,5 mm), entretanto essa técnica é limitada quando se trabalha com partículas maiores.

Foi proposto por Geldart (1986) um diagrama que relaciona diâmetro médio das partículas com a diferença entre a densidade da partícula e do fluido (gás), chegando ao resultado que para se atingir a fluidização do tipo jorro é necessário um tamanho mínimo de partículas classificadas como grupo D, representado na Figura 2.2. As partículas desse grupo possuem diâmetros maiores que os demais e são mais densas, com isso a fluidização convencional com esse tipo de partículas favorece a formação de caminhos preferenciais, acarretando baixa mistura de sólidos (SANTANA, 2011). Desta forma a fluidização normalmente não é a melhor opção para partículas do grupo D, sendo recomendado o leito de jorro para melhorar o contato fluido-sólido (CHRIST, 2006; SANTANA, 2011).

A mudança do leito fixo para o leito de jorro é um fenômeno que depende de vários parâmetros como velocidade do fluido, características das partículas (como mencionado anteriormente pelo diagrama de Geldart), do fluido e configurações geométricas do equipamento (SANTANA, 2011; ADEODATO, 2003). Essa transição pode ser visualizada na Figura 2.3 (A) e qualitativamente pelo diagrama representado graficamente da altura do leito em função da velocidade do gás (B). Nota-se que existe uma altura máxima do leito para

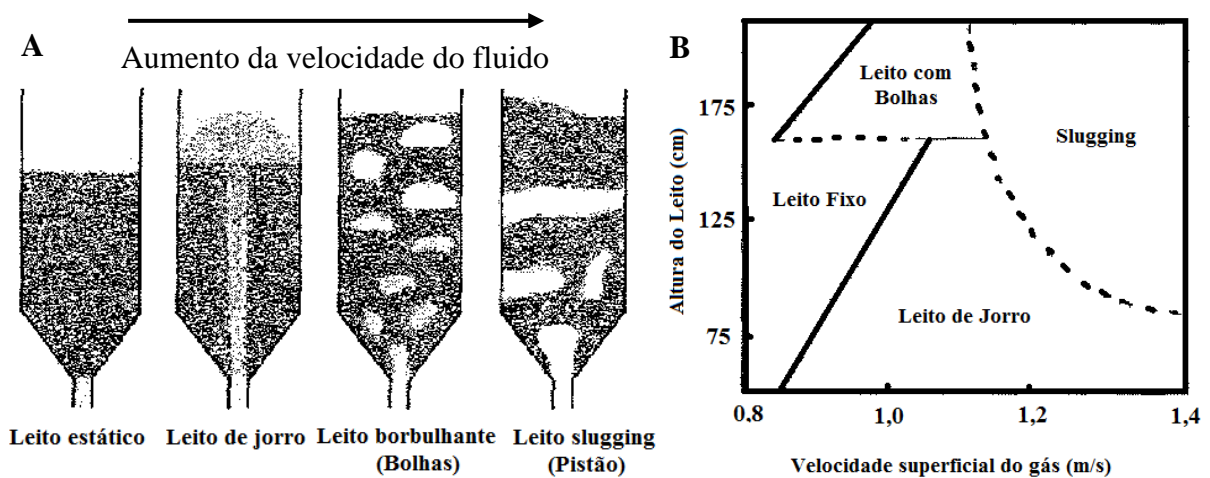
ocorra o regime de jorro, posteriormente o aumento da velocidade do ar não influenciará na mudança do regime para jorro novamente. Desta forma, na secagem em leito de jorro não se utiliza altura do leito de partículas muito elevada, pois o regime tende a atingir o leito borbulhante ou slugging que não é recomendado, pois apresenta diversos problemas de instabilidade, dificultando a secagem (MATHUR; EPSTEIN, 1974; SANTANA, 2011).

Figura 2.2 – Diagrama de Geldart para fluidização de partículas.



Fonte: GELDART, 1986.

Figura 2.3 – Transição de Fase (A) e Diagrama de regime (B) em função do aumento da velocidade do fluido. Parâmetros: Grão de Trigo; $d_p = 3,2 \times 6,4$ mm, $D_e = 15,2$ cm e $D_i = 1,25$ cm.



Fonte: Adaptado de MATHUR e EPSTEIN, 1974.

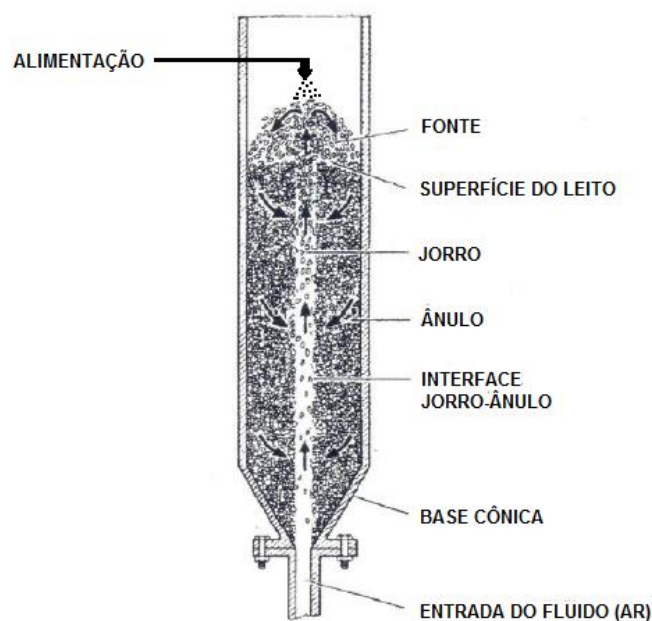
2.3 Secador tipo leito de jorro

O funcionamento de um leito de jorro tem o mesmo princípio do fluidizado, entretanto ele opera com partículas maiores e trabalha acima da velocidade mínima de fluidização. O fluido utilizado normalmente é um gás, sendo que na prática é utilizado principalmente ar aquecido (CHRIST, 2006).

O equipamento é constituído basicamente por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica, onde ar é inserido na parte inferior vertical do secador, através de uma única entrada reduzida em relação ao diâmetro do leito (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A caracterização do leito de jorro se dá com uma vazão de ar suficiente para que ocorra o arraste pneumático das partículas, nessas condições as partículas atingem o topo do leito e forma uma fonte, assim as partículas são desaceleradas até atingirem a velocidade terminal e caem, retornando a superfície do ânulo. A fonte forma uma curva parabólica que tem aglomeração e colisão de sólidos, tornando o jorro praticamente homogêneo devido à alta rotatividade e mistura (CHRIST, 2006). Para secagem de pastas e soluções, o comportamento das partículas é semelhante, mas ocorre a alimentação na parte superior, como demonstrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Secador leito de jorro com alimentação.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

Como representando na Figura 2.4, o leito de jorro tem algumas divisões referentes ao tipo de movimento das partículas inertes sendo as três principais: ânulo, que corresponde a um movimento contracorrente em relação ao fluido, sendo esse movimento lento; jorro, onde existe o canal preferencial de escoamento do fluido, levando as partículas para o topo; a fonte representa a parte na qual as partículas recebem o filme da alimentação e por ação da gravidade cai nas laterais ou paredes do secador (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Contudo devido a presença da pasta e a formação de um filme líquido, forças interpartículas podem surgir e causar problemas operacionais no leito de partículas.

2.3.1 Fluidodinâmica de um secador leito de jorro

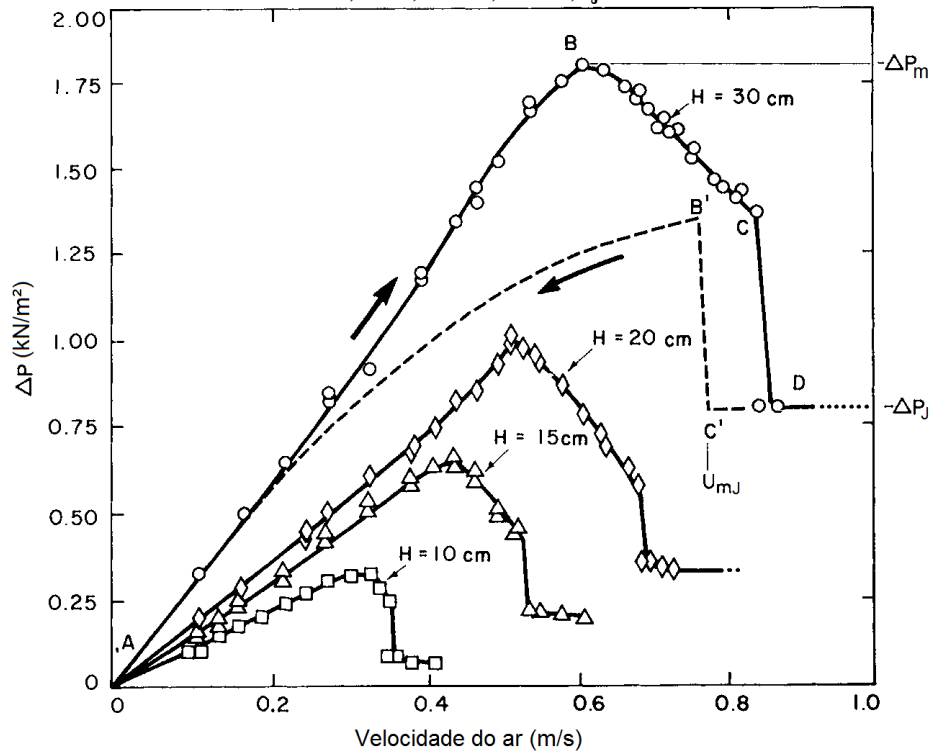
A operação e monitoramento de secadores são difíceis devido a grande complexidade fluidodinâmica do leito de jorro. Até o início dos anos 80 não se considerava a influência da pasta na fluidodinâmica, pois considerava-se a secagem sem a presença da pasta (ALMEIDA, 2009). Entretanto um estudo realizado por Pham (1983) com sangue animal comprovou que essa suposição era errônea, demonstrando ainda que com determinadas vazões de alimentação ocorria a formação de zonas estagnadas, impedindo a movimentação das partículas e assim influenciando nas condições operacionais.

Nos secadores tipo leito de jorro os parâmetros fluidodinâmicos de interesse para projeto e operação do equipamento são: velocidade mínima de jorro (U_{mj}); queda de pressão máxima (ΔP_m); queda de pressão mínima para um jorro estável (ΔP_j) (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Esses parâmetros auxiliam para evitar o arraste das partículas para fora do leito, formação de um jorro estável e para que não ocorra o colapso do jorro. Sendo esses determinados a partir de uma curva característica do equipamento, como mostrado na Figura 2.5.

Na Figura 2.5 são mostrados os pontos de velocidade mínima de jorro, pressão máxima e mínima das partículas no leito. Com o início da entrada de ar no ponto A, o sistema se comporta como um leito fixo. Posteriormente com o aumento da vazão de ar, ocorre o aumento da pressão de forma quase linear até o ponto B (ponto de máxima pressão). O aumento constante de pressão se dá pelo aumento da resistência do leito ao escoamento do fluido, por haver a formação de um canal no centro e a compactação de partículas no topo. Quando esse canal se torna longo o suficiente, ocorre uma expansão do leito e redução da pressão, até o ponto C. Com o aumento da vazão de ar ocorre uma brusca queda de pressão

devido à desobstrução do canal (Ponto D, que corresponde ao ponto de mínima pressão de um jorro estável). Nesse ponto o aumento da vazão de ar não influencia na queda de pressão, mas ocasiona a elevação da fonte e o transporte das partículas inertes caso a velocidade do ar seja muito alta (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Figura 2.5 – Curva característica de um Secador Leito de Jorro. Dados: $d_p=3,6\text{mm}$, $D_c=15,2\text{cm}$, $D_i=1,27\text{cm}$, $\gamma=60^\circ$.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

Após a formação do jorro e se houver diminuição da velocidade do ar de entrada, a queda de pressão ficará constante, até que atinja a velocidade mínima de jorro (Ponto C'), onde se caracteriza a menor quantidade de movimento transferido pelo fluido, ou seja, a menor vazão de ar para se manter um jorro estável. Continuando com a redução da vazão de ar, ocorre um aumento da pressão, atingindo o ponto B', que indica o colapso ou término do jorro.

No processo inverso (redução da vazão) o ponto de máxima pressão é menor que a máxima pressão com inserção de ar, isso se deve ao fato que não há mais a necessidade de energia extra para empurrar as partículas e ocorrer a formação do jorro. Depois do ponto B', a redução da pressão cai gradualmente de acordo com a redução da vazão de ar.

2.3.2 Características do leito de jorro

Para a operação com leito de jorro se utiliza uma porcentagem acima da velocidade mínima de jorro, de modo a garantir jorro estável. Desta forma, mesmo que ocorram perturbações na operação de secagem, não ocasionará instabilidade e/ou colapso do jorro. Alguns autores trabalham entre 15 e 30% acima da velocidade mínima de jorro na secagem de pastas e soluções, assim mesmo com a presença da pasta no leito não ocorrerá o colapso do jorro em condições normais (ALMEIDA, 2009; VIEIRA, 2015).

Outras comparações foram feitas com a perda de carga no leito e a temperatura/vazão de ar em um leito de jorro, obtendo resultados satisfatórios para operação e controle. A perda de carga está diretamente relacionada com a temperatura, entretanto essa relação é pequena. Isso se deve ao aumento da viscosidade do gás de secagem, devido ao aumento da temperatura. Assim, com um gás mais viscoso a tensão de cisalhamento entre gás e partículas aumenta, acarretando em uma maior perda de carga no leito (CORRÊA, 2000). Contudo as variações na perda de carga em relação a temperatura só são significativas para valores muito altos.

A velocidade mínima de jorro também está relacionada com a altura do leito e com o diâmetro da coluna cilíndrica (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Esse fato pode ser verificado na Figura 2.5, onde o aumento da altura do leito (H) ocasiona maior valor da U_{mj} , pois é necessária maior vazão de ar, tendo como consequência maior perda de carga no leito (maior resistência do ar devido o peso das partículas). Esse resultado também foi comprovado no estudo de Rodrigues (1993). Entretanto o diâmetro de entrada do ar, não exerce nenhuma influência na U_{mj} (MATHUR; EPSTEIN, 1974), mas estudos comprovam que a razão entre o diâmetro de entrada do gás e diâmetro inferior da base cônica deve estar entre 0,50 e 0,83. Uma vez que abaixo dessa faixa causa queda de pressão e a formação de zonas mortas no leito (causando problemas de circulação de sólidos) e acima dessa faixa acarreta instabilidade do regime de jorro (OLAZAR et al., 1992).

Outra propriedade que tem grande importância nesse tipo de equipamento são as características das partículas inertes utilizadas no leito, sendo as principais a densidade, esfericidade e diâmetro. O diâmetro médio das partículas está diretamente relacionado com a velocidade mínima do jorro e também com a densidade do leito (LEU; PAN, 2004; SAN JOSÉ et al., 2005).

2.4 Secagem de pasta

A primeira aplicação da secagem de pastas e soluções em leito de jorro foi feita na antiga União Soviética por Reger e colaboradores em 1967, para a produção de lascas de tintas. Posteriormente os estudos dessa técnica ampliaram no meio acadêmico, aumentando as aplicações da secagem em leito de jorro, principalmente no setor da indústria de produtos químicos, farmacêuticos e alimentícios.

A alimentação de pasta no leito de jorro é normalmente realizada na parte superior do cilindro no intuito de facilitar a aeração, transferência de calor e evita a aglomeração das partículas (SOUZA; OLIVEIRA, 2005; PASSOS et al., 1997). Quando a alimentação é feita no topo da coluna (centro da região da fonte), pode atingir uma taxa de recuperação de produto entre 50 e 85%, mas quando alimentada na base da coluna fica entre 25 e 68% (SOUZA, 2003).

A composição química da pasta está atrelada com o bom funcionamento do leito de jorro. No estudo realizado por Nascimento (2013) pode ser verificado que a presença de gordura na pasta auxilia na circulação dos inertes, atuando como lubrificantes e assim agindo de maneira positiva sobre o sistema. No estudo de Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993) foi verificado por experimentos que a presença de gordura na composição da pasta acarretou redução do acúmulo e aumento da recuperação do produto. Contudo a presença de fibras não causou influência na produção de pó, enquanto a presença de açúcares dificulta a remoção do filme de pasta seca (OCHOA-MARTINEZ et al., 1993; MEDEIROS et al., 2002).

No estudo realizado por Fernandes (2005) concluiu que a temperatura da alimentação de pasta não é significativa, pois sua vazão é muito inferior a vazão de ar que entra no leito e assim não oferece nenhuma melhora na eficiência energética do leito de jorro. Alguns autores estudaram o efeito da temperatura e umidade de saída com influência no funcionamento do jorro, e concluíram que existe um valor mínimo de temperatura do gás de saída para que as partículas não se aglomerem e assim causando o colapso do jorro (REGER et al., 1967).

A vazão de pasta/solução tem grande influência nas propriedades do produto final, principalmente na umidade, granulometria e forma do pó formado. Contudo na secagem em leito de jorro não se consegue obter um bom controle da forma e da granulometria do pó gerado, como a que é obtida no processo em *spray-dryer* (REYS, 1993).

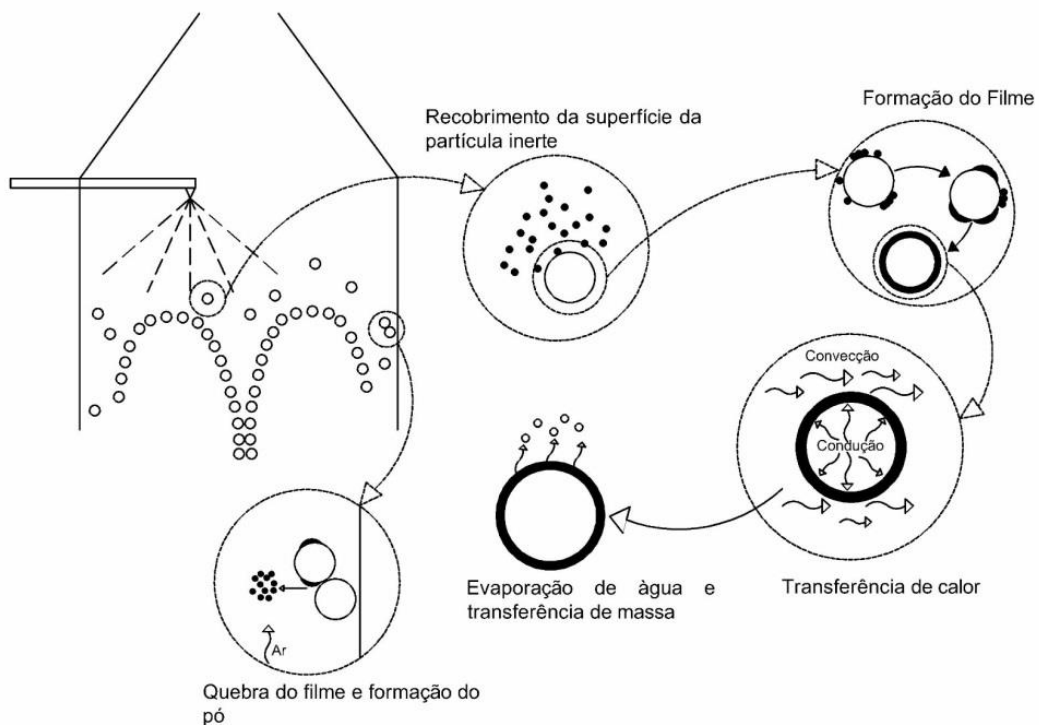
As características da pasta possuem grande importância no processo de secagem, pois podem causar alterações na formação do filme, secagem e formação do pó.

2.4.1 Fenômenos envolvidos na secagem em leito de jorro

A secagem se baseia na redução do teor de umidade da pasta/solução devido o transporte de água de uma fase líquida (pasta/solução) para a fase gás. Para que ocorra a evaporação de forma eficiente, necessita-se de uma área de troca térmica (área de secagem) maior. No leito de jorro, são utilizadas partículas inertes para aumentar significativamente a área de contato entre as fases. Estudo realizado por Marreto e colaboradores (2009) demonstraram que a taxa de evaporação de água por unidade de volume do secador em um leito de jorro é maior que o *spray-dryer*.

Na Figura 2.6 ilustra o processo de formação do filme, que se inicia na etapa de alimentação da pasta. A pasta é dispersa sobre os inertes na forma de gotejamento ou por atomização, liberando pequenas partículas de pasta. Estas aderem a superfície do inerte formando um filme líquido e através da condução de calor pelo inerte pré-aquecido e pela convecção do ar de secagem, ocorre a evaporação da água e assim a secagem do filme. Devido a solidificação do filme, ocorre mudanças na reologia desse filme. Nessa etapa está presente a transferência de calor e massa simultaneamente.

Figura 2.6 – Processo de recobrimento das partículas e formação do produto (pó).



Fonte: elaborado pelo autor.

Devido a intensa movimentação dentro do leito, ocorre atrito entre as partículas inertes e entre essas com a parede do cilindro, transformando o filme sólido em um pó fino.

O pó formado é arrastado pela corrente de gás até o ciclone, onde ocorre a separação da fase sólida da gasosa. Entretanto, uma pequena fração das partículas do pó é arrastada pelo gás (pó elutriado), saindo na parte superior do ciclone. Caso não haja nenhum equipamento na saída para filtrar o ar e reter as partículas, esse pó será lançado para fora do sistema.

As partículas do pó formadas no leito de jorro, possuem geometria variada, mas normalmente são na forma de flocos irregulares e finos (MARKOWSKI, 1992), sem porosidade interna (MARKOWSKI, 1993). O tamanho pode apresentar diâmetro médio inferior a $1,0 \times 10^{-4}$ m (STRUMILLO et al., 1983; ALMEIDA, 2009). Esse pó gerado possui granulometria desconhecida, pois existem poucos estudos na literatura que abordam com detalhes a distribuição granulométrica do produto formado no leito, recuperado no ciclone e elutriado, durante o processo de secagem.

As propriedades físicas do pó formado são de grande importância para a qualidade do produto final e na operação do jorro, pois caso ocorra a formação de partículas líquidas ou pegajosas, pode ocorrer uma interrupção da circulação dentro do jorro causado pelo acúmulo de produto e, se não controlado, poderá levar ao colapso do jorro (CUNHA et al., 2000).

2.4.2 Forças interpartículas

O estudo e conhecimento da atuação das forças interpartículas são de extrema importância para se conhecer a fluidodinâmica da operação em leito de jorro (ALMEIDA, 2009). Durante o processo de secagem pode ocorrer a aglomeração de partículas-pasta-produto, acarretando em um desequilíbrio no leito de partículas quando em quantidade significativa.

Os principais problemas no leito de jorro para secagem de pasta estão relacionados com a instabilidade do regime de jorro, a formação de aglomerados e o pó aderido às paredes do leito, causando acúmulo de material no leito (PASSOS et al., 1997).

Devido às forças de ligação entre partículas e um material ligante ou mesmo por forças interpartículas, ocorre uma mudança na superfície do material particulado, favorecendo o aumento da partícula. Esse fenômeno é chamado de processo de aglomeração, que basicamente modificam partículas pequenas e transformam em maiores (SILVA, 2003).

Esse tipo de aumento na superfície da partícula nem sempre é uniforme. Kleinbach e Riede (1995) realizaram uma classificação para três tipos de recobrimento: tipo A, é o recobrimento perfeito com recobrimento integral e espessura uniforme; Tipo B tem a diferença de não apresentar espessura uniforme; Tipo C é diferente do tipo B, pois somente algumas partículas apresentam imperfeições na camada de recobrimento.

As principais forças que atuam no processo de aglomeração são as forças na sinterização, por reação química, ligações com suspensões de alta viscosidade, pontes líquidas e cristalização de substâncias dissolvidas, forças moleculares, forças eletrostáticas, forças magnéticas e forças de valência (PIETSCH, 1997). No estudo realizado por Spitzner Neto (2001), foi concluído que, dependendo da forma como as partículas inertes se interagem com a pasta, podem ocorrer ligações pela força de coesão/adesão ou viscosas, considerando a primeira de maior importância para secagem de pastas em leito de jorro.

A altura da fonte do jorro também é influenciada pelas forças interpartículas, uma vez que em leito secos ou úmidos a altura da fonte é proporcional com a vazão de gás, entretanto em leitos secos é possível manter o leito estável com baixa altura da fonte, enquanto que no leito úmido isso não é possível (sendo necessária uma maior vazão de ar e assim maior altura da fonte) (ALMEIDA, 2009). Esse fato é justificado pela presença das forças interpartículas com o maior volume de líquido, sendo que em baixas porcentagens de líquidos (onde o filme é muito fino) as pontes líquidas são fracas e atuam como “lubrificantes”, facilitando a movimentação das partículas no leito. Entretanto quando a porcentagem de líquido está acima do valor limite (filme mais espesso), as pontes líquidas são fortes, dificultando a circulação das partículas (SANTANA et al., 1997).

Desta forma, as forças interpartículas afetam o leito de jorro e modificam condições de processo, podendo causar desde pequenas modificações (aumento da umidade do produto formado, diminuição da temperatura, etc) até os casos mais extremos (aglomeração demasiada de pasta-produto-partículas), causando a interrupção do jorro.

2.5 Acúmulo e elutriação de produto dentro do leito de jorro

Schneider e Bridgewater (1989) relataram que devido à presença de pasta no leito e o início do processo de aglomeração, se verificava instabilidade no leito que ocasionava problemas operacionais. Esses autores concluíram que umidade relativa do ar em torno de 80% pode tornar o jorro instável. Esse fato foi justificado quando ocorreu o aumento da vazão

de alimentação, que por sua vez ocasiona o aumento do peso do leito e a diminuição da sua temperatura média. Com uma temperatura inferior, a transferência de massa é comprometida, reduzindo-se a evaporação de água e acarretando acúmulo de produto no leito.

De tal forma, para se evitar o acúmulo de produto dentro do leito, é necessário que o regime estacionário seja atingido, ou seja, a taxa de recuperação do pó seja constante. Para isso, a taxa de recobrimento das partículas inertes (formação do filme) deve ser igual à taxa de remoção do filme seco (produto). Para que tal equilíbrio seja atingido, é necessário que as partículas inertes tenham uma quantidade mínima de colisões entre si e entre o inerte com a parede do secador. Essas colisões são influenciadas principalmente pela taxa de transferência de calor, pelo fluxo das partículas, pela energia de colisão entre as partículas inertes e pela massa de pasta por massa de inerte (BARRET; FANE, 1989).

Quando se aumenta a temperatura do gás de entrada, favorece-se a redução do teor de umidade do produto, deixando o filme seco e quebradiço, facilitando que o filme seja transformado em pó (devido ao atrito) e arrastado pela corrente de ar. A redução da umidade também dificulta a aglomeração entre produto e inertes, juntamente com produtos que ficam aderidos nas paredes do secador. Além da temperatura, a redução da vazão de ar implica em maior aglomeração do produto e assim maior acúmulo de pó na parede, sendo esses resultados obtidos por Souza (2003). Resultados parecidos foram encontrados por Cunha et al. (1998), que afirmam que o aumento da vazão de pasta favorece a aglomeração de partículas inertes com a pasta e também as próprias forças de adesão dificultam o movimento do jorro, causando sua interrupção.

O material acumulado dentro do leito também está diretamente relacionado com a maior concentração da pasta. Isso modifica as características do produto final (aumento no teor de umidade) e reduz a eficiência de recuperação do pó gerado (FERREIRA et al., 2000). Observações realizadas por Morris (1990) mostraram que não só a concentração da pasta, mas mudanças nas propriedades físicas da pasta durante o processo, podem causar aglomeração das partículas no interior, levando ao seu colapso.

Dessa forma, o material acumulado dentro do leito é difícil de ser entendido e até mesmo equacionado, sendo que a maioria dos trabalhos com modelagem desprezam a ocorrência do acúmulo dentro do secador, como os estudos de Almeida (2009), Freire et al. (2009) e Nascimento (2013). Apesar de esses autores apresentarem resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais, a hipótese que não ocorra o acúmulo pode não ser verdadeira, principalmente quando utilizados vazões de alimentação de pasta elevada

(VIEIRA, 2015). Sem o acúmulo de pasta no leito, não haveria forças interpartículas devido a presença de película de pó, como já relatado por Spitzner Neto (2001) e Medeiros et al. (2002).

2.5.1 Estudos realizados na área

Os trabalhos encontrados na literatura de maior relevância para esse estudo foram o de Barret e Fane (1990), Souza (2003) e Silva (2016), pois nesses foi considerado o acúmulo de pó dentro do leito, enquanto que não foi encontrado nenhum estudo sobre o material elutriado pelo ciclone na secagem em leito de jorro. A falta de dados do material elutriado se dá pela dificuldade em obter os dados, uma vez que é necessário a adição de um filtro na saída do ciclone para coleta da massa elutriada. Desta forma é possível fechar o balanço de massa global do sistema de secagem.

2.5.2 Barret e Fane (1990)

No estudo desenvolvido por Barret e Fane (1990), foi constatado que a razão de acúmulo aumenta com elevadas vazões de suspensão, baixa vazão de ar e também da temperatura de secagem, sendo que as características da pasta alimentada e das partículas inertes também exercem influência sobre o acúmulo.

A vazão de ar está relacionada com os coeficientes de transferência de calor e massa (taxa de secagem) e também com a energia das colisões, pois o aumento da vazão de ar elevada a circulação das partículas dentro do leito.

Foi observado que o acúmulo de material no leito é inicialmente alto, reduzindo ao longo do experimento de secagem até atingir o regime permanente e assim o acúmulo tende para um valor nulo. Contudo quando em altas vazões de alimentação de pasta o sistema não atinge o equilíbrio e o acúmulo aumenta em função do tempo de operação. Esse fato ocorre devido a maior quantidade de pasta no sistema, aumentando a espessura do filme (devido a maior massa depositada na superfície) e também a quantidade de partículas recobertas.

De tal forma, a chance de algumas partículas serem novamente recobertas aumenta, sem que o filme já depositado tenha sido retirado. Esse efeito indesejável de duplo recobrimento da partícula inerte já foi discutido por Nascimento (2013), apresentando como consequência a redução da temperatura e tornando a película pegajosa, devido a sua maior umidade. Esses fenômenos favorecem ainda mais o aumento do acúmulo de pasta no leito.

2.5.3 Souza (2003)

Souza (2003) estudou a secagem de extrato de *Bauhinia fortificada* em leito de jorro em função das variáveis do processo. Dentre os diversos parâmetros estudados, os de maior relevância para este trabalho foram: recuperação, elutriação e acúmulo do produto. Entretanto não foi quantificado a massa elutriada, sendo determinada somente pela diferença entre o total alimentado pelo material acumulado e recuperado.

A taxa de recuperação do produto foi em média de 58,3% e 78,2% para temperatura do gás de entrada de 80 e 150°C, respectivamente. Com esses dados mostrou-se que para a faixa de temperatura do ar analisada, causou influência na recuperação do produto, como pode ser observado na Tabela 2.1. Foi observado que para baixos valores da alimentação (15 a 75% da relação entre a vazão de alimentação e a capacidade máxima evaporativa) ocorre pouco acúmulo, média de 8,8% e 6,5% para 80 e 150°C, respectivamente. Entretanto para valores acima de 75% da vazão de alimentação, a taxa de acúmulo aumenta significativamente, 18,5% e 11,8% para 80 e 150°C, respectivamente. Esses resultados demonstram que o aumento da temperatura e a redução da vazão de alimentação limita o acúmulo de produto dentro do secador. Para a taxa de elutriação, foi observado maior valor para temperatura de 80°C (média de 30,5%), do que para 150°C (média de 17,5%). Contudo as perdas do processo estão inseridas nesse valor, assim pode ser que nas temperaturas mais elevadas causem menores perdas.

Outro dado importante analisado por esse autor foi o diâmetro do produto coletado no ciclone. Entretanto como pode ser observado na Tabela 2.1, o diâmetro médio das partículas não apresentou nenhuma relação com a temperatura do ar ou com a razão da vazão de alimentação, mas teve elevado valor de desvio padrão.

Tabela 2.1 – Resultados do balanço de massa e tamanho médio das partículas.

T_{ge} (°C)	$W_s/W_{máx}$ (%)	R (%)	Ac (%)	E (%)	dp_{po} (μ m)*
80	15	54,37	16,33	29,30	17,1 \pm 14,7
80	45	73,56	6,29	20,15	22,3 \pm 15,9
80	75	50,83	3,73	45,44	9,7 \pm 8,0
80	100	54,37	18,51	27,12	6,8 \pm 5,0
150	15	70,35	3,84	25,81	11,7 \pm 10,9
150	45	78,44	2,20	19,36	21,8 \pm 26,0
150	75	84,13	1,34	14,53	19,2 \pm 14,8
150	100	79,99	11,78	8,23	9,95 \pm 10,2

Fonte: Souza, 2003.

2.5.4 Silva (2016)

Silva (2016) teve como objetivo analisar os fenômenos de transferência de momento, calor e massa no processo de secagem de carbonato de cálcio em leito de jorro com partículas inertes de vidro. Foram realizados experimentos com perturbações e intermitência na vazão de alimentação de pasta, propondo e indicando adaptações nos modelos existentes na literatura.

Os resultados mostraram que a vazão mássica de sólidos coletado no ciclone era sempre inferior a vazão mássica de pó teórico (presente na composição da pasta), apresentando valores entre 26 e 46% de recuperação de produto no ciclone. Esse fato foi justificado pelo acúmulo de pó no leito, sendo observado para todas as condições experimentais. Nos ensaios realizados, foi observado uma tendência do aumento da taxa de produção de pó somente nas vazões de pasta elevadas ($15 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$), enquanto que para $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ não teve uma influência direta.

Nos experimentos com intermitência da vazão de alimentação, verificou-se que quando interrompida a alimentação de pasta uma quantidade de sólidos ainda era coletada na saída do ciclone, esse fato foi justificado como sendo o pó acumulado dentro do leito e quando interrompeu a alimentação de pasta o leito restaurou seu potencial de evaporação de água, assim eliminando o pó dentro do leito pela vazão de ar. Entretanto para vazões de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (100°C) o sistema começou a apresentar instabilidade antes do tempo de operação (1 hora), tendendo ao colapso do jorro.

Outro estudo que deve ser levado em consideração é o de Dantas (2013), pois utilizou do modelo CST para representar o processo de secagem com intermitência em leito de jorro. Foi observado que quando utilizado vazão de alimentação elevada, necessitou operar em condições de maior temperatura do ar para atingir melhor produção de pó. Enquanto que a eficiência de recuperação do produto era maior durante o período em que a alimentação da suspensão era interrompia. Esse fato também foi observado por Vieira (2015). O modelo de Dantas (2013) considerou o acúmulo de pasta dentro do leito e nas paredes internas do equipamento, verificando que baixas temperaturas e menores tempos de intermitência favorecem o aumento do acúmulo.

No estudo desenvolvido por Vieira (2015), foi constatado que pequenas quantidades de pasta auxiliam na movimentação das partículas, pois assim o ar escoar através do ânulo (cuja porosidade é menor que a região do jorro e fonte). Para vazões elevadas, foi observado que as partículas agregaram na região anular, formando uma crosta e desta forma

interrompendo a movimentação das partículas, causando instabilidade e o colapso do jorro, devido ao grande acúmulo de pasta.

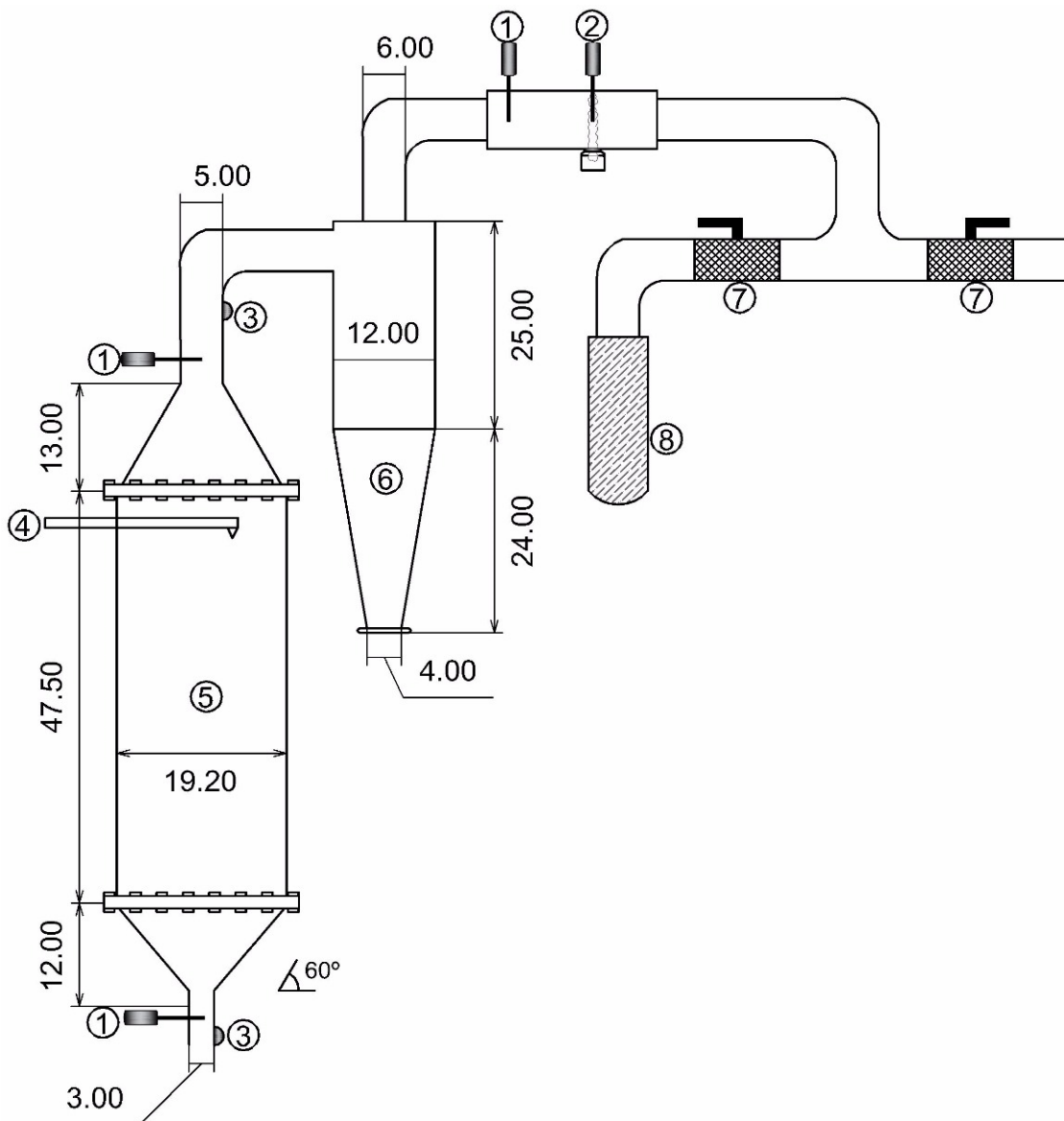
Apesar desses estudos, poucos abordam com detalhes o balanço de massa global, incluindo o material elutriação no ciclone e a influência desses parâmetros com as condições operacionais. Com dados mais precisos poderia ajudar no desenvolvimento de modelos mais realistas para secagem em leito de jorro e um melhor entendimento do processo de secagem, permitindo que novos estudos sejam desenvolvidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Unidade experimental

A unidade experimental utilizada é apresentada na Figura 3.1, com a descrição dos principais componentes e dimensões em centímetros.

Figura 3.1 – Sistema de secagem. Legenda: 1 – Termopar (Tipo T); 2 – Termopar de bulbo úmido; 3 – Medidor de pressão; 4 – Atomizador de pasta/solução; 5 – Leito de jorro; 6 – Ciclone (Laplace); 7 – Válvulas (esfera 2"); 8 – Filtro.



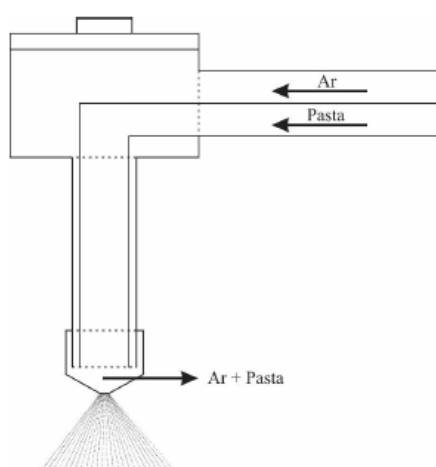
O fornecimento de ar foi proveniente de um soprador de 7,5 HP de potência, sendo sua corrente controlada pelo inversor de frequência, mas também existe duas válvulas tipo gaveta para o controle manual da vazão de ar formando um sistema *by-pass*. A vazão de ar da linha era determinada por um medidor de vazão (Placa de orifício) que utilizava a equação de calibração pré-ajustada, como descrita na Tabela 3.1. A equação relaciona a diferença de pressão entre dois pontos da placa com a vazão de ar, sendo proposta por Corrêa (2000). As medidas de pressão da placa de orifício e do leito (item 3 – Fig. 3.1) foram realizadas usando transdutores de pressão (Alimentados por uma fonte DC) e foram verificados com medidor padrão tubo em U.

Posteriormente, o ar foi aquecido por um trocador de calor com três resistências que estão conectadas ao módulo de potência tiristorizado, fazendo a regulagem da potência por sinais de corrente elétrica. Na Tabela 3.1 são descritos em detalhes todos os equipamentos utilizados para o processo de secagem.

A tubulação de aço carbono que conduzia o ar do soprador até a câmara de secagem, possui 2 in de diâmetro nominal e isolamento térmico de gesso e alumínio corrugado.

A alimentação da pasta foi realizada na parte superior da coluna cilíndrica (item 4 na Figura 3.1) por uma bomba dosadora (calibrada a vazão de alimentação antes de iniciar os experimentos com proveta graduada de 50 mL) até o bico de atomização (Figura 3.2) onde ocorreu a mistura da pasta com o ar do compressor a 3 psi. Para evitar entupimentos e precipitação do CaCO_3 , um agitador mecânico foi utilizado para tornar a mistura homogênea durante todo os experimentos.

Figura 3.2 – Vista lateral do atomizador de duplo fluido.



Fonte: SILVA, 2016.

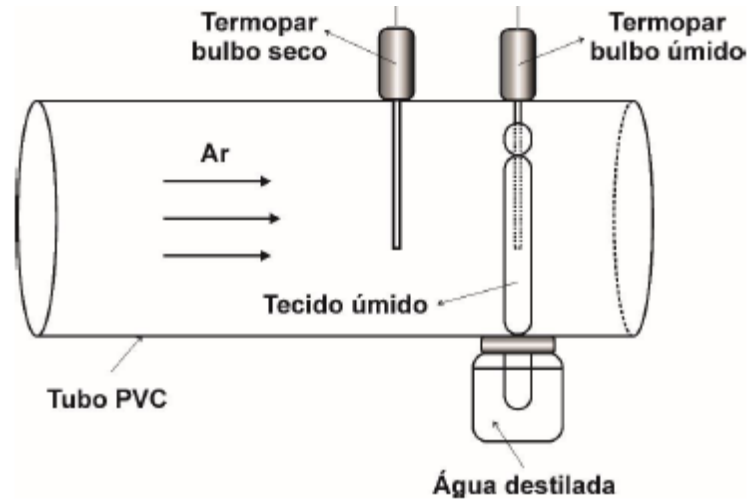
Tabela 3.1 – Descrição dos componentes do sistema.

Componente	Modelo	Fabricante	Dados gerais
Leito de jorro	–	Oficina DEQ – UFSCar	Hc = 47,5 cm; D _c = 19,2 cm; Di = 3,0 cm; γ = 60°; Aço inox.
Aquecedor (Trocador de calor)	–	Oficina DEQ – UFSCar	Potência de 2581W e três resistências elétricas: 25 Ω, 25 Ω e 50 Ω.
Módulo de potência Tiristorizado	Tiristherm TH 3021A/25	THERMA	Controla a potência do aquecedor por sinais de comando entre 4 – 20mA.
Soprador	WEB	WEB Motores	Potência de 7,5 HP; trifásico; 220V; 3480rpm; 60Hz.
Agitador mecânico	713	Fisatom	Realiza a mistura da suspensão de carbonato de cálcio.
Transdutor de pressão	–	AutoTran	Faixa de medição de 0-5 psi, sinal de saída de 1-5 V e com alimentação de 12-24 V.
Compressor	0523-V4-6180CX	Gast	Utilizado para atomizar a pasta dentro do leito após sua mistura.
Placa de orifício	–	Oficina DEQ - UFSCar	Calibrado por Corrêa (2000): $Q \text{ (m}^3\text{/min)} = 0,2764 \sqrt{\Delta P \text{ (cmH}_2\text{O)}}$.
Bomba de alimentação	7518-10	Masterflex	Bomba dosadora peristáltica.
Inversor de frequência	WEB - CFW 700	Vectrue Inverter	Atua sobre o soprador regulando a rotação do motor elétrico de acordo com a frequência de corrente alternada de 0-60Hz comandada por um sinal de 0-20mA.
Fonte DC	Smar PS302		Alimenta os transdutores de pressão.
Placa de aquisição de dados	National Instruments	cDAQ-9178	Converte sinais analógicos em digitais.

A temperatura do ar de entrada e saída do leito foram mensuradas por termopares tipo T, como representado na Figura 3.1 (item 1). Para realizar a medição da temperatura de bulbo úmido (item 2 – Figura 3.1), foi utilizado um psicrômetro montado após o ciclone. A ponta do termopar de bulbo úmido foi enrolada em um tecido (gaze) que ficava sempre umedecida devido ao recipiente de água, como representado na Figura 3.3. Antes de iniciar os experimentos, o tecido era molhado com água destilada e quando este ficava sujo devido a adesão do pó era feita a troca por um novo.

A calibração dos termopares foi feita através de um poço de calibração marca Block Calibrator DB-35L (utilizou 70°C como padrão), onde a média das medidas dos termopares e o desvio padrão foi de aproximadamente $69,4 \pm 0,4^\circ\text{C}$.

Figura 3.3 – Psicrómetro montado na saída do sistema de secagem.



Fonte: SILVA, 2016.

Todos os sistemas de medidas (Temperaturas, queda de pressão e vazão de ar) estão conectados ao módulo condicionador de sinais (Lynx), constituído por três módulos (NI 9213, NI 9205 e NI 9265). Esses módulos enviam sinais para a placa de aquisição de dados e este encaminha para um microcomputador que possui o software LabVIEW 2011 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). O software permite acesso à placa que realiza a interface entre o processo e o hardware, assim é possível captar e converter sinais digitais em analógicos, podendo realizar-se o tratamento dos dados para obter informações importantes do processo, como umidade absoluta e relativa (De acordo com os cálculos psicrométricos dispostos no anexo A). A aquisição dos dados pela placa foi realizada com intervalo de 5 segundos.

A umidade absoluta foi utilizada posteriormente para calcular o adimensional da umidade (U_{ad}), no intuito de corrigir possíveis variações do sistema, sendo utilizada a Equação 3.1, onde $U_{A(t)}$ é a umidade do ar no tempo, U_{A0} sendo a umidade inicial e U_{Ae} a umidade no equilíbrio dinâmico.

$$U_{ad} = \frac{U_{A(t)} + U_{Ae}}{U_{A0} + U_{Ae}} \quad (3.1)$$

3.1.1 Inertes

As esferas de vidro têm sido utilizadas no processo de secagem em leito de jorro, apresentando vantagens em relação a outros materiais, principalmente em relação a ampla faixa de temperatura de operação sem causar danos às partículas. Desta forma, foram utilizadas partículas inertes de vidro fabricadas pela Potters Industrial Ltda.

Foi realizada uma análise granulométrica das partículas inertes através de peneira vibratória. Foram utilizadas partículas que passaram pela peneira de 10 mesh (2,00 mm) e foram retidas na peneira de 8 mesh (2,36 mm), apresentando diâmetro médio de 2,18 mm.

A densidade das partículas já foi determinada por outros autores do Centro de Secagem, para o mesmo lote de partículas de vidro. Desta forma, a densidade real foi estimada por picnometria a gás hélio apresentando valor de $2,512 \text{ g.mL}^{-1}$ (SILVA, 2016).

Após os experimentos e coleta de dados, as partículas inertes foram lavadas e deixadas submersas por 24 horas em água e posteriormente secas para iniciar o próximo experimento com a maior similaridade possível.

3.1.2 Filtro

Testes iniciais foram necessários para determinar qual o melhor tecido para utilizar como filtro (tricoline e cambraia). Foram confeccionados filtros tipo “bag” com comprimento de 68 cm e diâmetro de 13,5 cm, possuindo assim uma área superficial de coleta de $2882,52 \text{ cm}^2$. Os resultados de queda de pressão no leito ao longo do experimento e massa retida no filtro foi melhor para o tecido tricoline (100% algodão). Após escolhido o tecido, foi realizado testes para identificar se o mesmo filtro poderia ser reutilizado nas réplicas após serem lavados com água.

3.2 Alimentação de pasta no leito

A pasta utilizada foi uma suspensão de carbonato de cálcio (CaCO_3) P. A. (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), onde identificou que a concentração de 3% diminui a queda de pressão e concentração mais elevada (9%) aumenta, enquanto para valores intermediários (5%) ambos os comportamentos são observados. Essa

suspensão também foi escolhida pelo fato que o carbonato de cálcio é muito fácil de manusear e preparar, apresentando poucos problemas operacionais e de fácil secagem no leito de jorro, como já foi observado em outros estudos no Centro de Secagem da UFSCar.

A suspensão de carbonato de cálcio usada nos ensaios foi preparada utilizando uma balança (marca Toledo e modelo 9094C/5). A suspensão ficou completamente agitada durante todo o processo de alimentação do leito (considerado como uma mistura homogênea) e foi determinado em cada ensaio a densidade aparente da suspensão por picnometria líquida, assim como a concentração de sólidos de acordo com a Equação 3.2.

Para a densidade foi utilizado um picnômetro de 50 mL previamente calibrado com água destilada. Foi determinada a massa do picnômetro vazio e posteriormente com a suspensão. A diferença em massa foi dividida pelo volume do picnômetro, obtendo-se assim a densidade em g.mL^{-1} . Os valores médios de densidade e da concentração da pasta nos ensaios foram respectivamente de $1,030 \pm 0,001 \text{ g.mL}^{-1}$ e $4,8 \pm 0,2\%$.

$$C_s \left(\% \frac{m}{m} \right) = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{CaCO}_3} + m_{\text{H}_2\text{O}}} * 100 \quad (3.2)$$

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Caracterização fluidodinâmica

Inicialmente foi realizada a caracterização fluidodinâmica (sem filtro) de acordo com metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974), que utiliza o gráfico de queda de pressão das partículas no leito (Equação 3.3) em função da velocidade do ar para determinar parâmetros operacionais como velocidade mínima de jorro (U_{mj}), queda de pressão do jorro estável (ΔP_j) e queda de pressão máxima (ΔP_m). E assim pode-se calcular a vazão de operação para realizar o processo de secagem, sabendo que o bocal tipo Venturi na entrada do leito de jorro, possui diâmetro de 2,94 cm. Posteriormente também foi investigado o efeito da adição do filtro ao final do sistema, verificando as mudanças nas condições operacionais.

$$\Delta P_{\text{partículas}} = \Delta P_{\text{total}} - \Delta P_{\text{branco}} \quad (3.3)$$

Onde ΔP_{branco} corresponde a queda de pressão do leito sem as partículas, $\Delta P_{\text{partículas}}$ refere-se à queda de pressão devida às partículas inertes contidas no leito e ΔP_{total} é a queda de

pressão total (leito vazio e as partículas). Todos os dados foram coletados na rotina de aquisição do LabVIEW 2011.

A velocidade de operação foi entre 15 e 30% acima da velocidade mínima de jorro, definida com base em experimentos preliminares. Não foi necessário realizar experimentos variando a temperatura do gás na entrada no leito, e colocar como variável na equação do branco. No estudo de Bitti (2012), foi comprovado através de dados experimentais, que a passagem de ar no teste do branco (leito vazio) não varia de forma significativa em função da temperatura. Almeida (2009) também verificou que a influência da temperatura sobre a queda de pressão das partículas não é significativa.

3.3.2 Condições operacionais

Após a obtenção da curva fluidodinâmica foi realizada uma série de experimentos preliminares para determinar as melhores faixas de operação do jorro, principalmente em relação à vazão de alimentação de pasta, temperatura de operação e vazão de ar, pois esses parâmetros são os que mais influenciam no acúmulo de pó dentro do leito, uma vez que a vazão de ar está limitada pela velocidade mínima de jorro.

Os principais parâmetros determinados nos testes preliminares são a vazão máxima de pasta para que o jorro não entre em colapso, tempo de operação para entrar em regime permanente, perda de carga devido a presença do filtro e a possibilidade de se reutilizar os filtros nas réplicas.

Foi analisado, de acordo com a pressão do leito, se seria necessária a troca do filtro (ou sua limpeza) durante cada experimento, caso a perda de carga fosse muito alta.

Como comprovado por Souza (2003) a temperatura e vazão de alimentação estão relacionadas com o diâmetro das partículas que saem do jorro e esses parâmetros influenciam diretamente na quantidade de pó que será arrastado pela corrente de gás na saída do ciclone. Assim foi verificada a influência das condições operacionais sobre a granulometria do pó acumulado no leito, recuperado no ciclone e retido no filtro.

3.3.3 Análise granulométrica do pó

Para o pó gerado na secagem do carbonato de cálcio em leito de jorro, foi determinada a distribuição granulométrica e o diâmetro médio volumétrico ponderado, sendo mensurados

pelo método de difração a laser (Mastersizer MicroPlus 2000 – Malvern), com escala de medida entre 0,05 a 550 μm . As amostras foram dispersas em água destilada para leitura no equipamento. O diâmetro médio volumétrico ponderado ($d_{4,3}$) foi calculado pela Equação 3.4 (JINAPONG et al., 2008). A variável n_i refere-se ao número de partículas de diâmetro d_i .

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i \times d_i^4}{\sum n_i \times d_i^3} \quad (3.4)$$

O span representa a largura da distribuição das partículas na amostra, sendo calculada pela Equação 3.5. Os valores de d_v correspondem ao diâmetro de uma esfera com volume equivalente ao da partícula (BOWEN, 2002), no qual para o d_{v50} metade do volume das partículas está abaixo desse valor. Os diâmetros d_{v10} e d_{v90} , definem as partículas com 10 e 90% vol. são menores que esse valor, respectivamente.

$$\text{Span} = \frac{d_{v90} - d_{v10}}{d_{v50}} \quad (3.5)$$

Para as amostras coletadas no ciclone a cada 10 minutos, foi utilizada a sexta coleta para fazer a análise do tamanho da partícula. Pois foi considerado que nesse tempo de 60 min de operação o pó gerado no ciclone não está sob efeito das condições iniciais de recobrimento das partículas inertes.

3.4 Balanço de massa

Para realizar o balanço de massa no sistema, foi necessário determinar a massa seca do material retido em cada região. Para tal, o material recuperado no ciclone foi coletado a cada 10 minutos e seco em estufa a 105°C/24h. A umidade do produto em base úmida foi determinada pela Equação 3.6.

$$X_s = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CaCO}_3}} * 100 \quad (3.6)$$

Ao final de cada experimento a massa retida no filtro e acumulada dentro do leito (aderida nas partículas inertes e na parede da tubulação) foi seca pelo mesmo procedimento para obter a massa seca.

Foi realizado um balanço de massa global no sistema de secagem, de acordo com as Equações 3.7 a 3.10 para determinar a porcentagem de massa recuperada no ciclone (R), acumulada no leito (Ac), retida no filtro (E) e perdida no processo (P), tendo como referência a massa teórica adicionada no sistema pela vazão de alimentação de pasta.

Para determinar a Ac (%) foi subtraído a massa final (M_{pf}) da massa inicial (M_{pi}) de partículas inertes, acrescida da massa aderida na parede (M_{parede}) da câmara de secagem, como na Equação 3.8. A E (%) foi obtida pela diferença de massa final e inicial do filtro, de acordo com a Equação 3.9. Contudo a soma da R (%), Ac (%) e E (%) não é 100%, ou seja, existe perdas no sistema, que foi determinada pela Equação 3.10.

$$R (\%) = \frac{M_c (1 - X_s)}{W_s * C_s * \theta} * 100 \quad (3.7)$$

$$Ac (\%) = \frac{(M_{pf} - M_{pi}) + (M_{parede})}{W_s * C_s * \theta} * 100 \quad (3.8)$$

$$E (\%) = \left(\frac{M_{FF} - M_{IF}}{W_s * C_s * \theta} \right) * 100 \quad (3.9)$$

$$P (\%) = (100 - R - Ac - E) \quad (3.10)$$

3.5 Planejamento experimental

Foi investigado o efeito da temperatura do ar de entrada (80, 90 e 100°C) e da vazão de pasta alimentada (10, 20 e 30 mL.min⁻¹) sobre a resposta percentual da massa recuperada (R), acumulada (Ac) e elutriada (E) no processo de secagem do carbonato de cálcio. Para tal, foi utilizado um delineamento composto central de face centrada (DFC), com três réplicas e três pontos centrais (PC), totalizando 27 experimentos. O planejamento experimental foi realizado em dois fatores (temperatura e vazão) e três níveis. O nível alto foi representado pela variável codificada +1 (100°C ou 30 mL.min⁻¹), o nível baixo por -1 (80°C ou 10 mL.min⁻¹) e o ponto central representado por 0 (90°C ou 20 mL.min⁻¹), como dispostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Planejamento experimental para os ensaios realizados.

Temperatura do ar (°C)	Vazão de alimentação (mL.min⁻¹)
80 (-1)	10 (-1)
80 (-1)	20 (0)
80 (-1)	30 (+1)
90 (0)	10 (-1)
90 (0)	20 (0)
90 (0)	30 (+1)
100 (+1)	10 (-1)
100 (+1)	20 (0)
100 (+1)	30 (+1)

3.6 Testes preliminares

Os testes preliminares foram realizados utilizando diferentes cargas de partículas inertes (2, 4 ou 6 kg), para verificar qual seria mais adequada ao processo, levando em consideração os parâmetros de velocidade mínima de jorro e queda de pressão no leito.

Posteriormente foram obtidos dados para secagem com água, para determinar a capacidade máxima evaporativa do equipamento, estimando desta forma, quais vazões de pasta de carbonato de cálcio poderiam ser utilizadas nos experimentos seguintes. Para tal, foi utilizando água deionizada na alimentação do equipamento e temperatura do ar na entrada do leito de 87°C. Assim que o leito atingisse o regime permanente (temperatura do ar de saída constante), iniciou-se a alimentação com água (10, 20, 30, 35 ou 40 mL.min⁻¹) até que se atingisse um novo regime permanente no leito.

A influência da adição do filtro na saída do ciclone também foi investigado. Foi comparado a queda de pressão do leito vazio com e sem o filtro, sendo analisado também a possibilidade de reutilizar os filtros nas repetições, utilizando somente a lavagem com água.

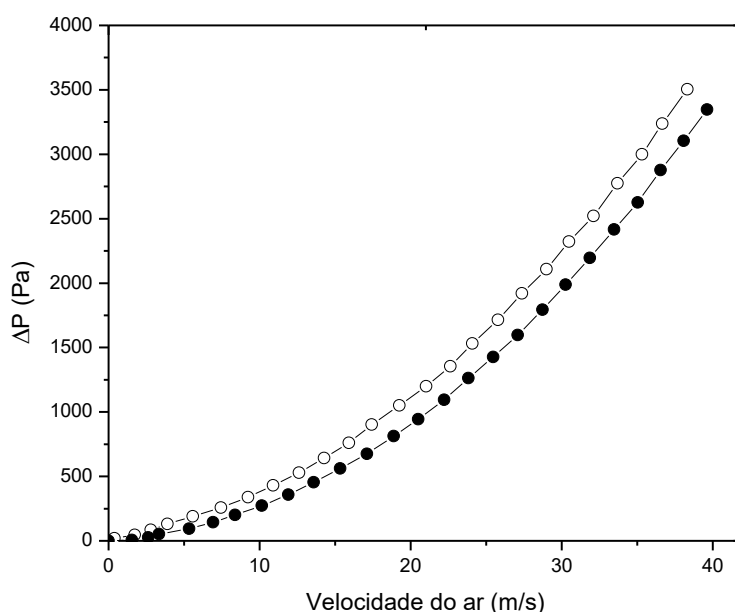
4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste tópico são descritos os principais resultados obtidos durante a realização deste trabalho, juntamente com as respectivas discussões. Inicialmente são apresentados os dados da caracterização fluidodinâmica e assim obter a carga das partículas inertes e a vazão de ar adequadas para realizar a operação de secagem. Os testes preliminares ajudaram a determinar a capacidade máxima evaporativa do equipamento, verificando qual as melhores faixas da vazão de alimentação de pasta e da temperatura do ar. Posteriormente são apresentados os resultados da secagem de pasta e o balanço de massa, juntamente com a análise estatística que auxiliou na discussão dos dados experimentais. Também foi feita a análise da granulometria do pó em função das condições operacionais. Ao final encontram-se os dados com intermitência, utilizado para melhorar o processo de secagem, aumentando a recuperação do produto.

4.1 Caracterização fluidodinâmica do leito de jorro

A caracterização seguiu o procedimento descritos no item 3.3.1, sendo inicialmente realizado o “teste em branco” sem filtro (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Queda de pressão em função da velocidade do ar no leito. Legenda: Queda de pressão do leito sem partículas: sem filtro (●) e com filtro (○).

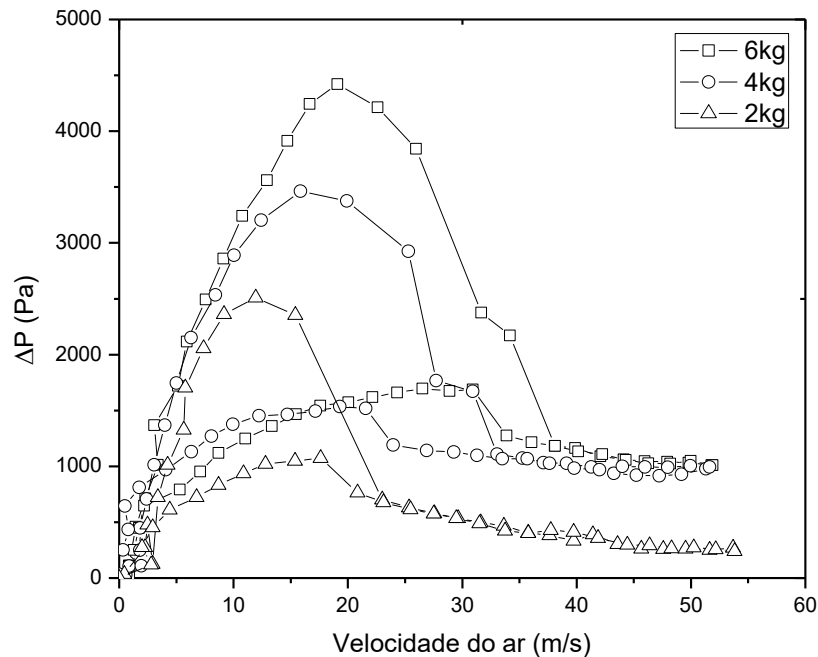


Posteriormente foi determinada a equação da potência (Equação 4.1), referente à curva da queda de pressão do leito vazio pela velocidade do ar ($R^2 = 0,9994$) pelo software Origen 8.0.

$$\Delta P \text{ (Pa)} = 4,39 * U(\text{m.s}^{-1})^{1,8442} \quad (4.1)$$

Outro ensaio foi realizado no intuito de analisar a influência do filtro sobre a queda de pressão no leito, sendo possível verificar que a adição do filtro no sistema de secagem causou maior queda de pressão, como representado na Figura 4.1. Posteriormente, variando a carga de partículas inertes dentro do leito entre 2, 4 ou 6 kg, foram obtidos os dados da queda de pressão das partículas (descontado a pressão do leito vazio, sem o filtro), como representado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Queda de pressão em função da velocidade do ar somente dos inertes, para diferentes cargas de inerte.



Os dados de queda de pressão máxima, do jorro estável e da velocidade mínima de jorro são apresentados na Tabela 4.1. Pode-se observar que houve um aumento aproximado de 49% na queda de pressão máxima no leito quando se dobra a carga de inerte de 2 para 4 kg e aumento de 29% quando se aumenta de 4 para 6 kg. Relações similares são encontrados nos valores para a velocidade mínima de jorro, aumento de 37 e 27% respectivamente. Entretanto,

quando se refere a queda de pressão do jorro estável, o aumento é de 234% quando se eleva de 2 para 4 kg de inerte, mas aumento de somente 2% foi observado ao aumentar a carga dos inertes de 4 para 6 kg. Esse fato é justificado pela menor vazão de ar necessária para manter o jorro estável com 2 kg de partículas. Enquanto que, para 4 e 6 kg, a quantidade de partículas já se torna muito significativa (maior altura do leito de partículas), necessitando de uma maior velocidade do ar para manter o jorro estável. Contudo, a carga de 2 kg preencheu somente a parte cônica do leito de jorro, justificando os dados fluidodinâmico diferente as demais cargas.

Tabela 4.1 – Parâmetros da curva fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes cargas de inerte.

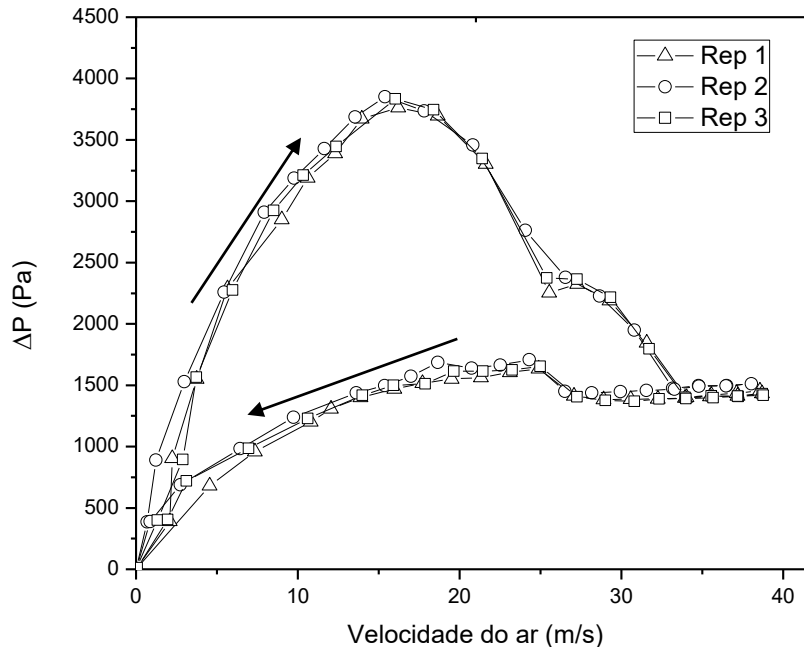
Carga de inerte (kg)	ΔP_m (Pa)	ΔP_j (Pa)	U_{mj} (m/s)
2	2337,5	306,7	19,5
4	3485,6	1024,6	26,8
6	4487,2	1049,9	34,1

O aumento da quantidade de inerte dentro do leito causa o aumento da queda de pressão e da velocidade mínima de jorro, sendo que esses fatos estão de acordo com a literatura (MATHUR; EPSTEIN, 1974; RODRIGUES, 1993; REYES, 1993; SPITZNER NETO, 1997; LEU; PAN, 2004; BITTI, 2012), uma vez que quanto maior a massa de inerte maior a resistência ao escoamento do ar (BITTI, 2012), ou seja, maior será a energia transmitida do ar para as partículas.

De acordo com os resultados das curvas fluidodinâmicas apresentadas na Figura 4.2 e Tabela 4.1, foi escolhida a carga de 4 kg de partículas, pois além de apresentar valor moderado de queda de pressão e velocidade mínima de jorro, tem maior capacidade de secagem devido à área de contato. Esse fato já havia sido comprovado experimentalmente por Bitti (2012) mostrando que o aumento da carga de inerte eleva a capacidade evaporativa de água no leito de jorro e que a maior altura do leito de partículas também aumenta a capacidade de secagem do equipamento (RODRIGUES, 1993; SPITZNER NETO, 2001), contudo existe um valor máximo para altura do leito onde o jorro pode colapsar (SOUZA, 2003).

Para determinar os parâmetros operacionais nessa condição (4 kg de inertes), foram realizadas repetições da caracterização (Figura 4.3) e determinados os dados operacionais, como proposto por Mathur e Epstein (1974), com os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Figura 4.3 – Queda de pressão das partículas em função da velocidade do ar para 4 kg de inerte.



Os dados da Tabela 4.2 foram obtidos na temperatura média de $30,0 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$, contudo a temperatura do ar de entrada não causa grandes mudanças nesses parâmetros, como já relatado por outros autores (ALMEIDA, 2009; BITTI, 2012).

Para suprir a resistência da passagem de ar no filtro causada pela formação da torta durante os experimentos e também devido a presença de pasta no leito, optou-se por utilizar a velocidade do ar para operação em 30% acima da velocidade mínima de jorro. Desta forma, a vazão do ar de entrada utilizada nesse trabalho foi de $1,43 \pm 0,02 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ para todas as condições experimentais.

Tabela 4.2 – Parâmetros fluidodinâmicos para o leito de jorro.

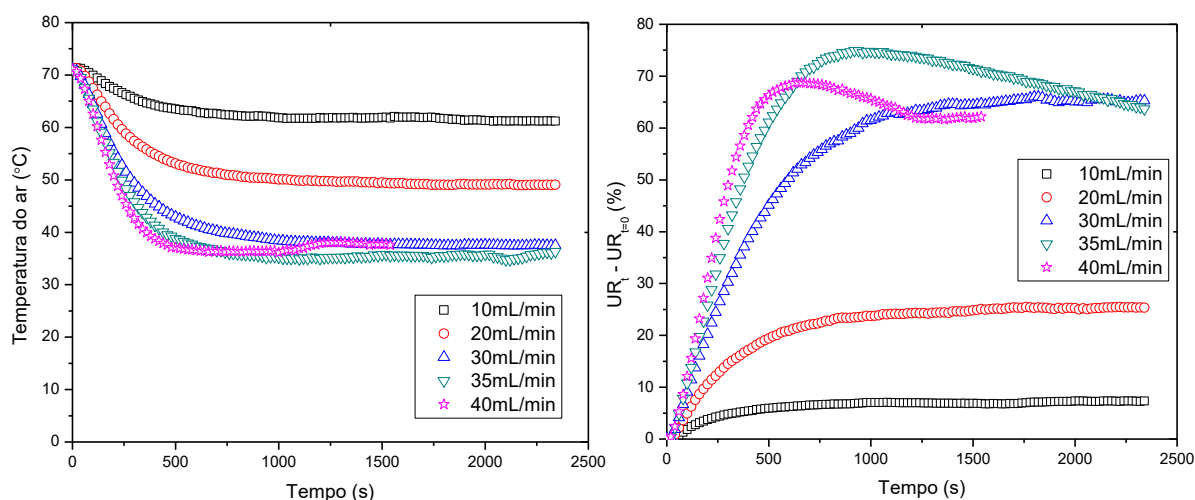
Parâmetro	Média
U_{mj}	$26,9 \pm 0,4 \text{ m.s}^{-1}$
ΔP_m	$3820,0 \pm 50,0 \text{ Pa}$
ΔP_j	$1430,0 \pm 40,0 \text{ Pa}$

4.2 Capacidade máxima evaporativa

Ensaio foram realizados para determinar a capacidade máxima evaporativa do leito de jorro, contudo determinar esse parâmetro com exatidão é um tanto complexo, pois como já relatado por Nascimento (2013) depende de características das partículas inertes (material, massa específica, diâmetro, dentre outras), altura da fonte, vazão e temperatura do ar de entrada, além da composição química da pasta utilizada. Com esses resultados, foi possível ter um indicativo de quais vazões de alimentação poderiam ser utilizadas para secagem de pastas reais e o tempo para atingir o regime permanente, uma vez que relatado por Bitti (2012), o regime permanente depende das condições operacionais utilizadas.

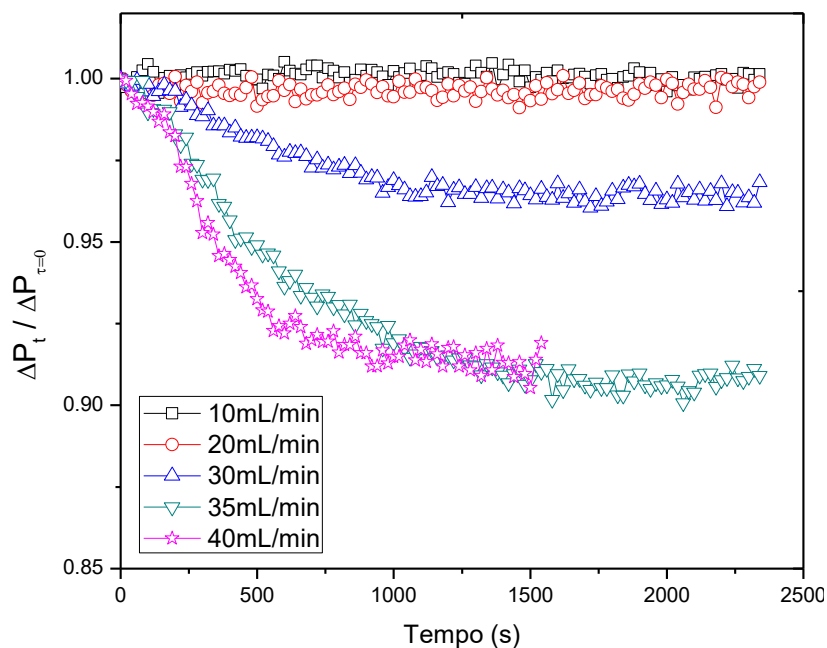
Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão representadas os dados de temperatura de saída, umidade relativa do ar e queda de pressão no leito em função do tempo de operação, para as diferentes vazões de alimentação com água deionizada.

Figura 4.4 – Temperatura na saída (A) e umidade relativa (B) na saída do leito em função do tempo de operação.



Como esperado, houve redução da temperatura do ar na saída, pois parte da energia fornecida pelo ar foi utilizada para evaporar a água, causando assim resfriamento até a saída. O tempo necessário para que o processo entrasse em regime permanente foi de aproximadamente 25 min (1500s), para 10, 20 e 30 mL.min⁻¹, entretanto para vazões de 35 e 40 mL.min⁻¹ houve problemas operacionais. Isso ocorreu devido à grande quantidade de água que estava sendo alimentada, ocorrendo arraste de gotículas de água para o ciclone na vazão de 40 mL.min⁻¹ e interrompendo o processo próximo a 1400s.

Figura 4.5 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação.



Na Figura 4.4 (B) pode ser observado que a umidade do ar aumenta para vazões mais elevadas, chegando ao máximo para vazão de 35 mL.min⁻¹, pois acima dessa vazão já não se consegue realizar o processo de secagem. Assim, para vazão de 40 mL.min⁻¹ não houve aumento da umidade do ar, atingindo o potencial máximo de secagem para esse equipamento.

Mesmo utilizando a água deionizada como uma pasta “ideal”, utilizou-se esses dados operacionais como referência para a secagem da pasta real. Desta forma, foram utilizadas as vazões de alimentação com melhores resultados, sendo de 10, 20 ou 30 mL.min⁻¹, enquanto que a temperatura de entrada do ar foi de 80, 90 ou 100°C.

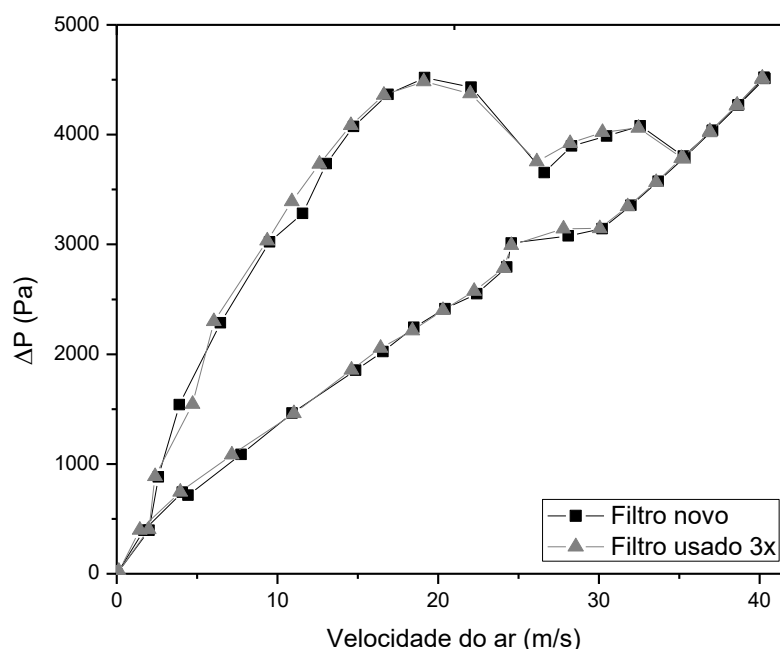
Como representado na Figura 4.5, durante a evaporação de água foi observada a redução da queda de pressão no leito para vazões de 30, 35 e 40 mL.min⁻¹. Esse fato pode ser justificado pela menor porosidade no leito causada pela presença de líquido na região anular, que dificulta a passagem de ar nessa região. Desta forma é favorecido o escoamento de ar pela região central, que oferece menor resistência ao escoamento, reduzindo a queda de pressão. Contudo, para baixas vazões (10 e 20 mL.min⁻¹) esse processo quase não causa efeito na queda de pressão, apresentando comportamento linear ao longo da secagem.

4.3 Secagem de Pasta

Para a secagem com pasta foi testado se os filtros poderiam ser reutilizados nas repetições, sendo que os filtros eram lavados somente com água no final de cada experimento.

Foram obtidos dados de queda de pressão total no leito em função da velocidade do ar utilizando um filtro novo e também um já usado 3 vezes. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre os ensaios realizados, como mostra a Figura 4.6, desta forma o mesmo filtro foi utilizado para as três repetições na secagem com pasta.

Figura 4.6 – Queda de pressão total em função da velocidade do ar no leito.



Durante a secagem de pasta, foi verificado que ocorria a formação de torta no filtro e assim maior resistência à passagem do ar pelo filtro. De tal maneira que, no momento de coleta do pó no recipiente inferior do ciclone, o ar tinha mais facilidade para sair na parte inferior do ciclone do que para vencer a resistência do filtro. Isso causava elevada perda da eficiência de recuperação do produto. Para sanar esse problema foi adicionada outra válvula no sistema de secagem, como mostrado anteriormente na Figura 3.1 (item 7). Assim somente nos instantes de coleta do pó (aproximadamente 10s, sendo considerando a perda de produto nesse tempo desprezível) a segunda válvula era aberta, ocorrendo a passagem do ar normalmente sem grandes perdas no processo.

4.3.1 Recuperação do produto

Nas Figuras 4.7 a 4.9 são representados os valores da porcentagem de produto recuperado no ciclone em função do tempo de operação, calculados com base na Equação 3.7.

Como representado na Figura 4.7, a recuperação do produto nos primeiros minutos da secagem foi baixa, devido a maior aderência da pasta sobre a partícula inerte, que está inicialmente isenta de material na sua superfície. Assim existe um depósito (acúmulo) de pasta no leito devido ao recobrimento das partículas inertes (formação do fino filme).

Posteriormente, a recuperação do produto aumentar, até próximo dos 70%, uma vez que a última coleta (70 min) apresenta um valor maior de recuperação devido ao encerramento do processo e de não haver mais passagem de ar, facilitando a coleta de material. Esse fato já havia sido mencionado por Dantas (2013) e Vieira (2015), que relataram existir uma quantidade de pó retido nos inertes que só pode ser removida quando a alimentação de pasta é suspensa, aumentando assim a recuperação do produto.

Figura 4.7 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

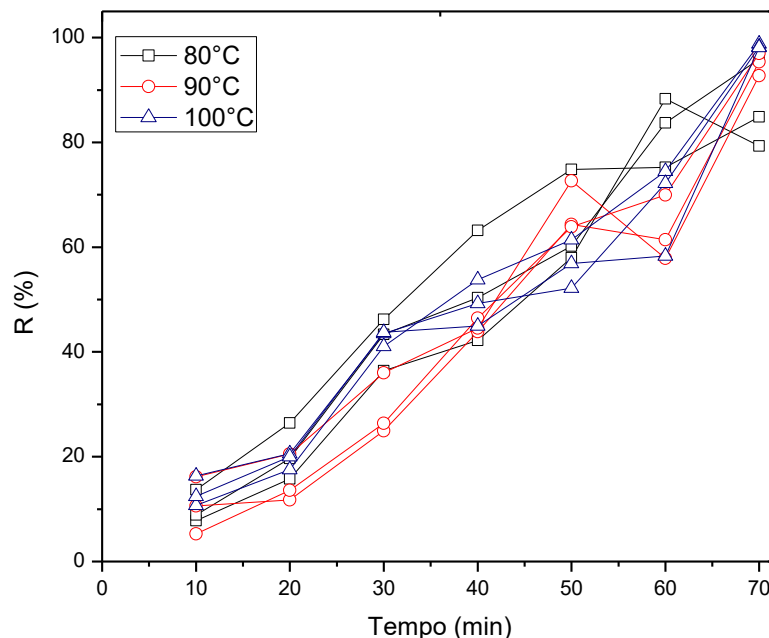
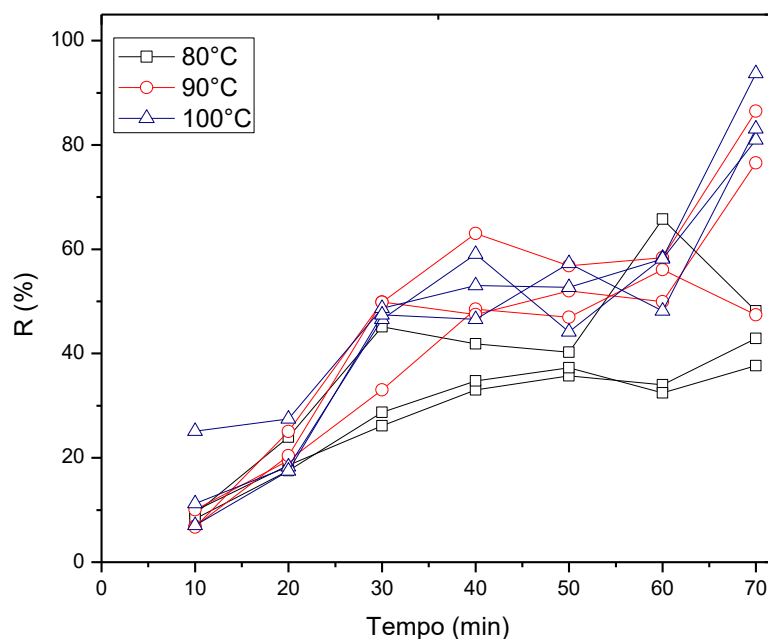


Figura 4.8 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 20 mL.min⁻¹.

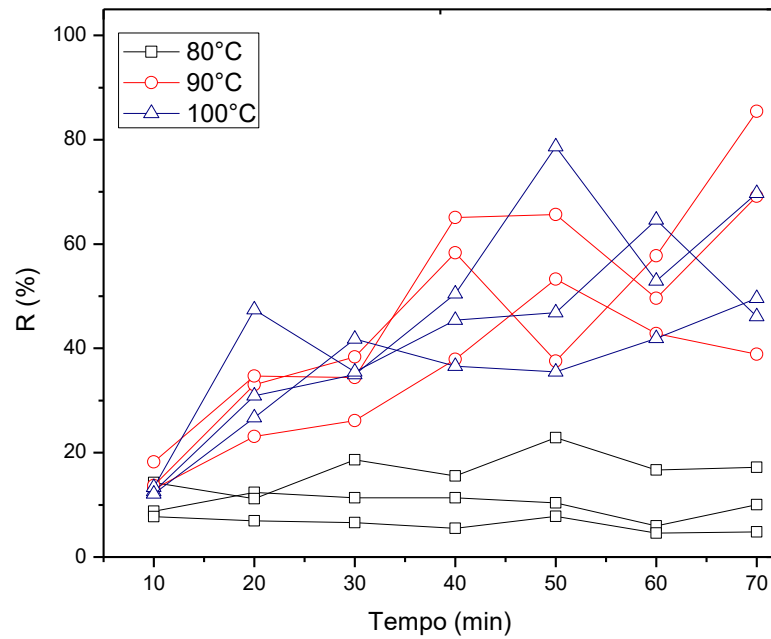


A vazão de pasta se mostrou significativa para o processo, sendo que o aumento da vazão de pasta reduziu a recuperação de produto, alcançando valores próximos de 50% para 20 mL.min⁻¹ (Figura 4.8). Enquanto 30 mL.min⁻¹ apresentou valores próximos (para 90 e 100°C), mas maior variação dos dados experimentais, como pode ser observado na Figura 4.9.

Pode ser observado que para vazão da alimentação de 10 mL.min⁻¹ não foi verificada nenhuma influência da temperatura do ar de secagem sobre a recuperação do produto. Enquanto que para vazão de 20 mL.min⁻¹ observa-se uma tendência da recuperação do produto ser inferior na temperatura do ar de 80°C. Não houve diferença significativa entre as temperaturas de 90 e 100°C na vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹, contudo não foi possível realizar a secagem na temperatura inferior (80°C), que apresentou baixa recuperação do produto.

Desta forma, pode-se constatar que a influência da temperatura do ar se torna mais significativa com o aumento da vazão de pasta, principalmente quando se aproxima da capacidade máxima do equipamento, que apresentou piores resultados de R (%). A influência da temperatura na secagem de pastas já foi mencionada por Silva (2016), que observou melhora na taxa de produção de pó em temperaturas mais elevadas, quando comparado em altas vazões de alimentação (15 mL.min⁻¹ utilizando o mesmo equipamento que este trabalho).

Figura 4.9 – Recuperação do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹.



4.3.2 Umidade do produto

Os resultados das Figuras 4.10 e 4.11 mostram a umidade do produto (X_s) em função do tempo de operação para as vazões de alimentação de 10 e 20 mL.min⁻¹, respectivamente.

Figura 4.10 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 10 mL.min⁻¹.

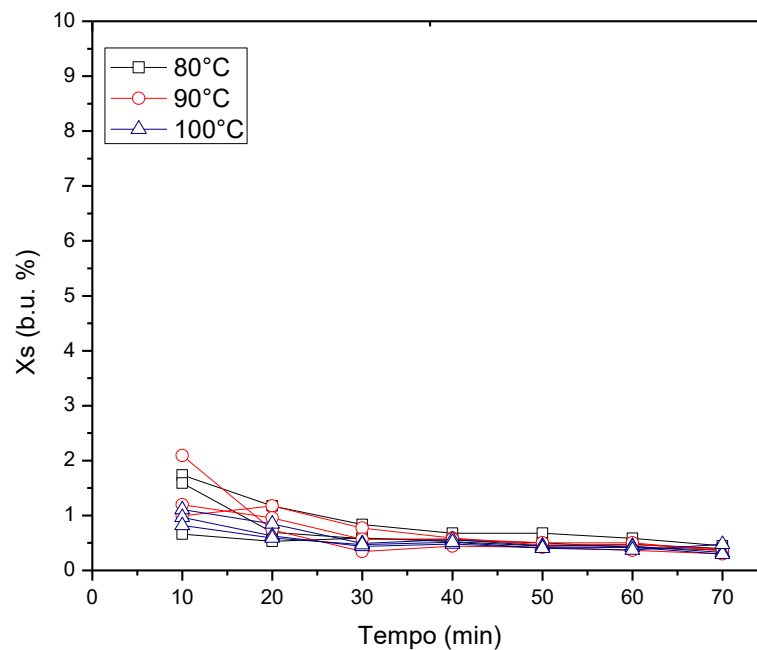
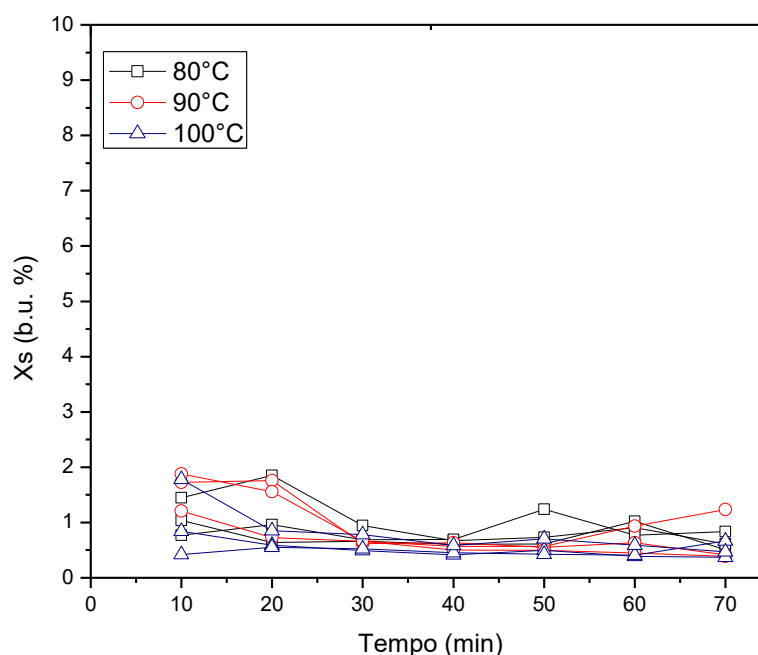


Figura 4.11 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 20 mL.min⁻¹.

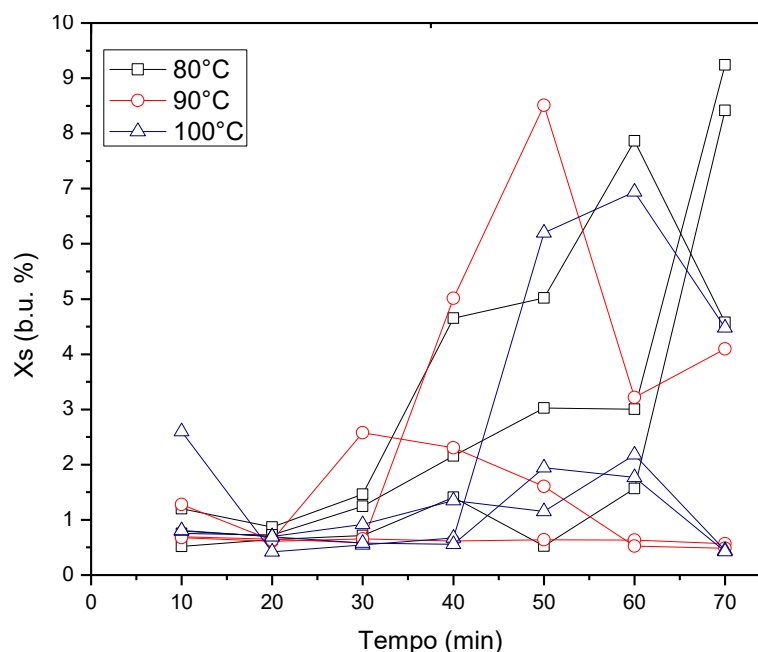


Os valores de X_s ficaram abaixo dos 5% e não apresentaram variação significativa ao longo do processo de secagem. Um dos parâmetros que identifica a qualidade do produto na secagem de pastas e soluções é a X_s . Quando obtido com valores inferiores a 5%, reduz significativamente riscos microbiológicos e degradação química, proporcionando maior estabilidade física e química ao produto (SOUZA; OLIVEIRA, 2009). Valores similares da umidade do produto foram obtidos por Nascimento et al. (2013) e Silva (2016) para o carbonato de cálcio, enquanto Almeida et al. (2010) e Freire et al. (2012b) obtiveram resultados semelhantes para outras variedades de pastas.

Contudo a umidade do produto para maior vazão de alimentação (30mL.min⁻¹) apresentou grande variação ao longo do processo (Fig. 4.12), sendo decorrente da instabilidade apresentada pelo secador para essa alimentação de pasta. Esse fato está associado com a maior taxa de alimentação de pasta, sendo que as partículas são recobertas com um filme mais espesso, necessitando de maior tempo de secagem. Quando não atingido o tempo suficiente de secagem, a superfície do inerte pode ser novamente recoberta e/ou ser removido um pó com X_s mais elevado, conseqüentemente contribuindo para o aumento da aglomeração de produto (BARRET; FANE, 1990; MARKOWSKI, 1992).

Esses resultados indicam que nas condições experimentais, uma vazão de pasta de 30 mL.min⁻¹ excedeu a capacidade máxima do secador em operar de forma eficiente, como já comprovado anteriormente pela quantidade de produto recuperado.

Figura 4.12 – Umidade do produto em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹.



Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios e os desvios padrão da umidade do produto ao final da secagem quando a operação já se encontrava em regime permanente.

Tabela 4.3 – Umidade do produto em base úmida (%) no final do processo (70 minutos).

Vazão de pasta alimentada	Temperatura do ar		
	80°C	90°C	100°C
10 mL.min ⁻¹	0,41±0,04	0,35±0,04	0,40±0,10
20 mL.min ⁻¹	0,70±0,20	0,70±0,50	0,50±0,20
30 mL.min ⁻¹	7,00±2,00	2,00±2,00	2,00±2,00

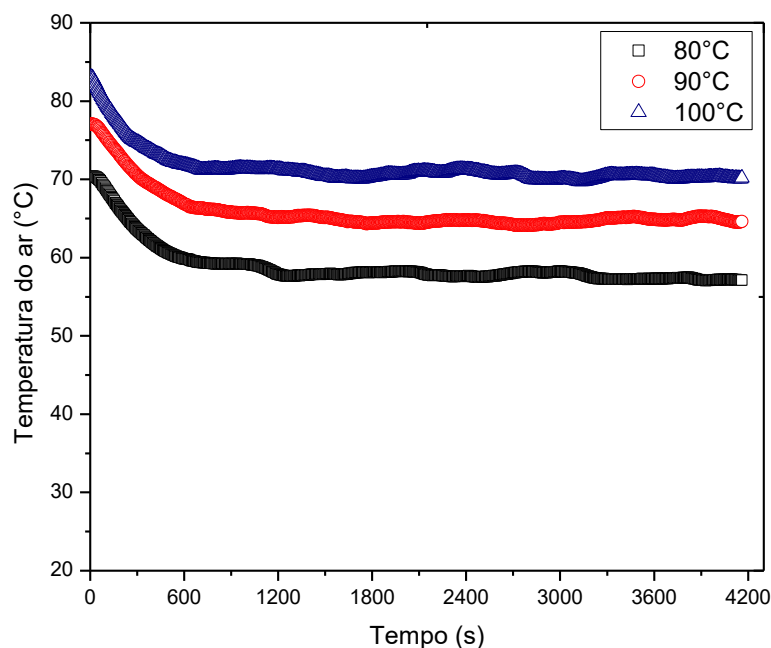
Observa-se que o aumento da temperatura do ar de 80 para 100°C causou baixa redução no valor médio da umidade do produto, enquanto que a variação da vazão de pasta mostrou influência no processo. Resultado similar foi obtido por Souza e Oliveira (2005), principalmente próximo a capacidade máxima, com conteúdo de umidade em torno de 9%.

Contudo a temperatura do ar só se torna significativa quando atinge a capacidade máxima do equipamento. Como era esperado o aumento da vazão de pasta alimentada favorece o aumento da umidade do produto, como já mencionado no estudo realizado por Silva (2016).

4.3.3 Temperatura e Umidade do ar na saída

Nas Figuras 4.13 a 4.15 são representados os valores de temperatura do ar na saída do equipamento em função do tempo de operação, podendo-se observar que para vazão de 10 mL.min⁻¹ ocorreu uma pequena redução da temperatura até atingir a temperatura de equilíbrio (regime estacionário) da secagem próximo dos 1200s. A vazão de 20 mL.min⁻¹ apresentou maior redução da temperatura do ar devido a presença da maior vazão de pasta, atingindo posteriormente o equilíbrio.

Figura 4.13 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 10 mL.min⁻¹.



Como representado na Figura 4.15, para vazão de 30 mL.min⁻¹ a redução da temperatura foi muito mais significativa em função da maior demanda de energia para evaporar a elevada vazão de pasta alimentada. Para o experimento na temperatura de entrada de 80°C, foi alcançado valor muito próximo entre as temperaturas de bulbo úmido (33,4°C) e bulbo seco (36,5°C). A pequena diferença entre essas temperaturas, mostram que o

ar está próximo da saturação, comprovado também pelo valor da umidade relativa (em torno de 80%), sendo um indício de que o equipamento atingiu a capacidade máxima de secagem nessa condição.

Figura 4.14 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 20 mL.min⁻¹.

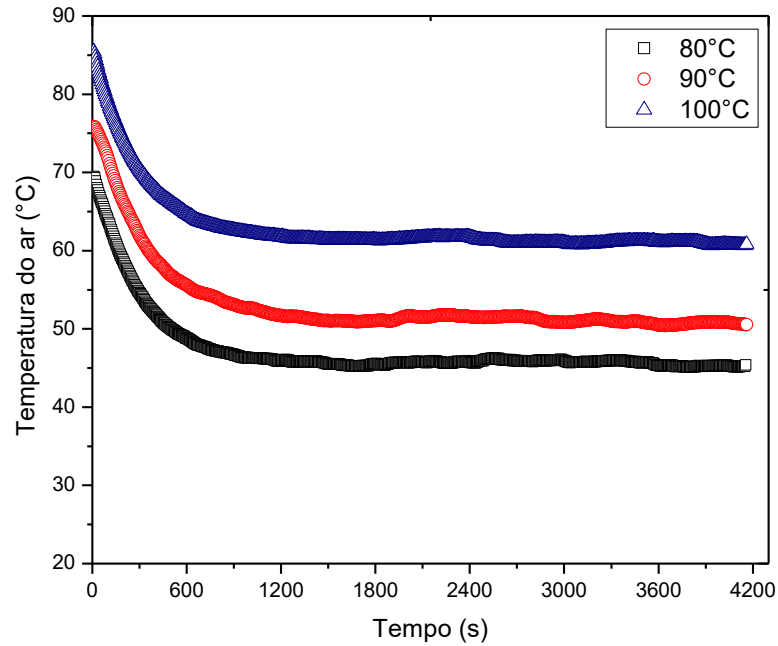
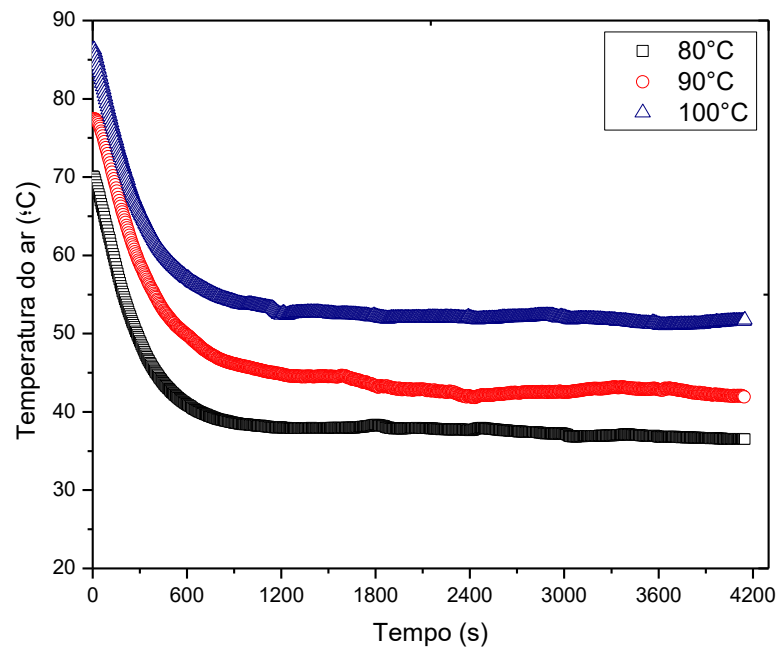


Figura 4.15 – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹.



Os dados obtidos para adimensional da umidade (U_{ad}) do ar na saída do ciclone em função do tempo de operação, para diferentes temperaturas de entrada do ar são apresentados nas Figuras 4.16 a 4.18.

Figura 4.16 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

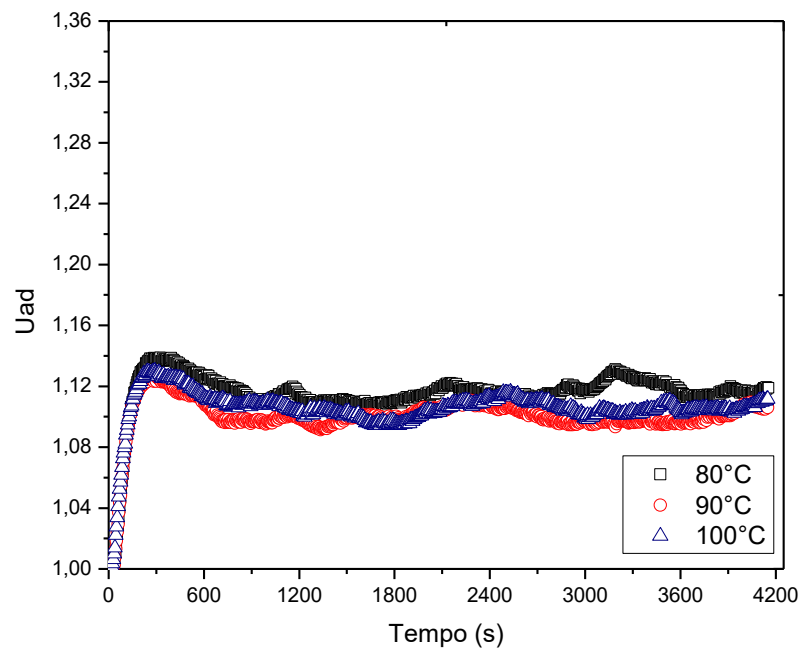


Figura 4.17 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

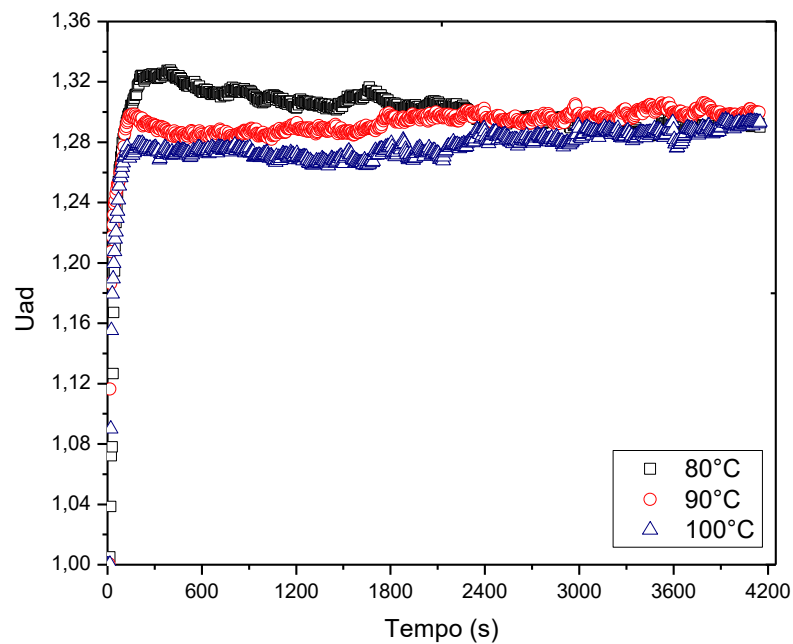
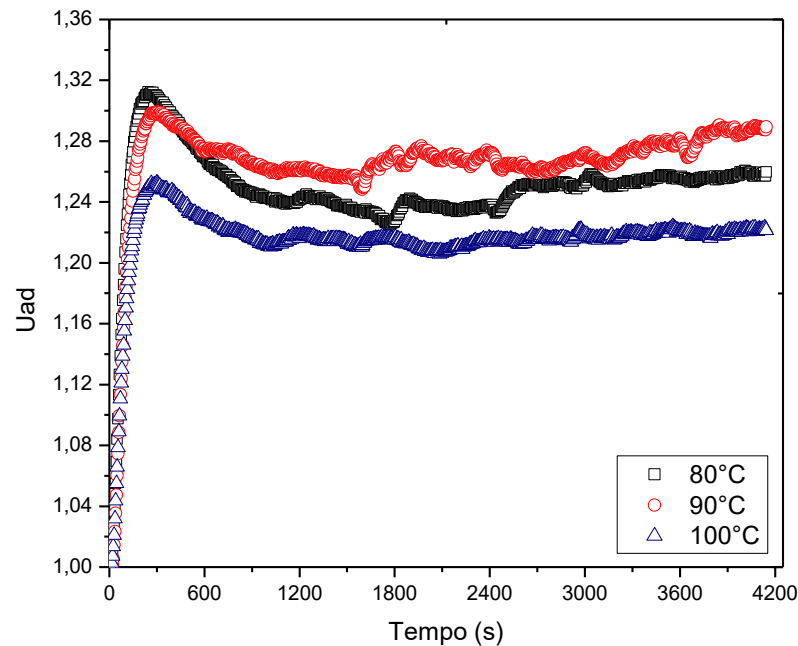


Figura 4.18 – Adimensional da umidade do ar em função do tempo de secagem para vazão de alimentação de pasta de 30 mL.min⁻¹.



Nota-se que ocorreu um rápido aumento da umidade do ar nos primeiros minutos de operação devido à injeção de pasta dentro do leito e, posteriormente, o sistema aproximou-se do regime permanente em todas as condições.

Para vazão de 10 mL.min⁻¹, o adimensional da umidade foi inferior quando comparado com as vazões de 20 e 30 mL.min⁻¹. Esse resultado sugere que utilizando a vazão de 10 mL.min⁻¹, somente uma pequena capacidade do secador é utilizada, sendo que nessa condição a temperatura do ar não acarretou grandes alteração na Uad. Enquanto que para 20 mL.min⁻¹, somente no início do processo a temperatura do ar teve influência, mas para vazão de 30 mL.min⁻¹ houve grande variação dos dados frente à variação da temperatura do ar na entrada do secador.

Na Tabela 4.4 são apresentadas as médias da umidade relativa no final do processo de secagem (UR_t) e antes de iniciar a vazão de alimentação de pasta (UR_0). Pode ser observado que devido à influência das condições atmosféricas do ambiente é muito importante utilizar o adimensional e assim facilitar a comparação dos ensaios. Entretanto pode ser observado que todas as repetições foram iniciadas com valores próximos, fato este devido ao baixo desvio padrão.

O aumento da temperatura do ar está relacionado com a redução da umidade devido às propriedades psicrométricas do ar, sendo que o aumento da temperatura eleva o potencial do

ar em absorver água. Desta forma, para a secagem é sempre melhor utilizar temperaturas elevadas, contudo existe o problema de produtos termosensíveis e o custo energético. A vazão de pasta tem uma relação direta com a UR_t , pois maior será a quantidade de água a ser evaporada e retida no ar. Pode ser observado na Tabela 4.4 que o aumento em $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ na vazão de pasta alimentada causa aproximadamente o dobro da UR_t em todas as faixas de temperatura. Esses resultados estão de acordo com os dados da literatura (ALMEIDA, 2009; NASCIMENTO, 2013; SILVA, 2016).

Tabela 4.4 – Dados da umidade absoluta e relativa do ar.

Vazão de alimentação ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Umidade Relativa (%)	
		UR_t	UR_0
10	80	$21,8 \pm 0,7$	$10,3 \pm 0,9$
	90	$15,6 \pm 0,8$	$7,5 \pm 0,4$
	100	$11,8 \pm 0,5$	$5,9 \pm 0,3$
20	80	$41,0 \pm 5,0$	$7,2 \pm 0,3$
	90	$30,0 \pm 3,0$	$5,2 \pm 0,6$
	100	$22,0 \pm 1,0$	$6,0 \pm 0,3$
30	80	$80,0 \pm 5,0$	$9,4 \pm 0,5$
	90	$61,0 \pm 3,0$	$7,5 \pm 0,4$
	100	$45,0 \pm 1,0$	$6,2 \pm 0,2$

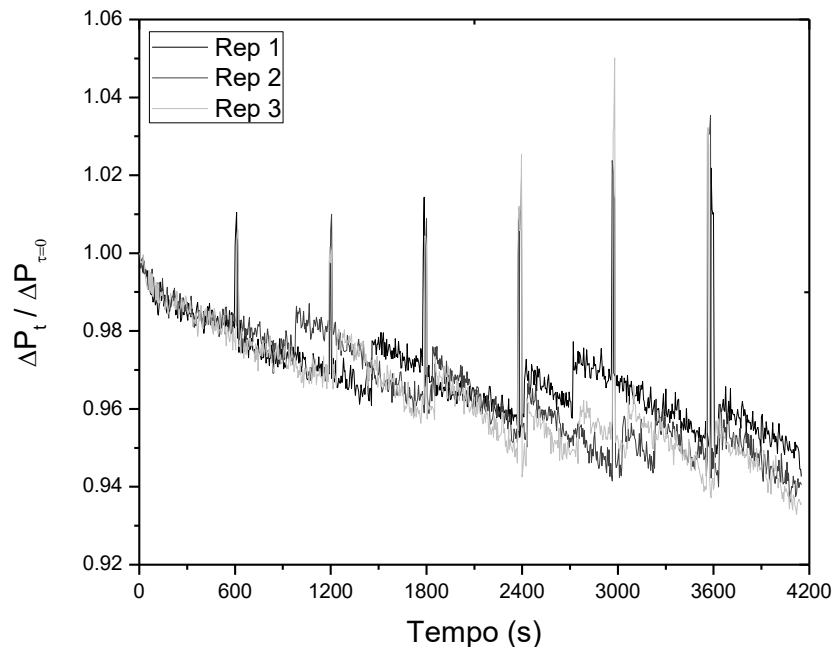
4.3.4 Queda de pressão no leito de jorro

Nas Figuras 4.19 a 4.22 são representados os dados do adimensional da queda de pressão ($\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$) em função do tempo de operação no leito. Nota-se na Figura 4.19 que a reutilização do filtro três vezes não causou mudanças significantes nas réplicas dos ensaios, fato justificado pela proximidade dos dados obtidos nos experimentos.

Já na Figura 4.20 são apresentados os dados para as diferentes vazões de pasta alimentada. Ocorre uma significativa oscilação nos valores da pressão (degrau positivo e negativo), entretanto esse fato já foi reportado por outros autores na secagem de pasta em leito de jorro, sendo a queda de pressão afetada pela circulação das partículas no interior do leito de jorro, como apontado pelos trabalhos de Lopes et al. (2009), Almeida et al. (2010) e Nascimento et al. (2013).

Esses autores também observaram que concentrações de CaCO_3 próximas a 3% na alimentação de pasta causam redução da ΔP_t , enquanto que concentrações mais elevadas (9,24%), causam o aumento da ΔP_t , como já mencionado anteriormente. Nesse trabalho foi utilizada uma concentração de CaCO_3 intermediária de 5,0%, e observa-se na Fig. 4.20 um comportamento da redução do adimensional da queda de pressão no leito. Esse resultado está associado à formação de pontes líquidas fortes, o que reduz a taxa de circulação das partículas, causando a redução da pressão no leito. Esse fenômeno está de acordo com a literatura (SANTANA et al., 1997; ALMEIDA, 2009; NASCIMENTO, 2013; SILVA, 2016).

Figura 4.19 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de secagem para as repetições (Rep 1, 2 e 3) do experimento a $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e 100°C .



Além da concentração de pasta, Freire et al. (2012a) relatam outros dois fatores importantes que podem estar associados com a queda de pressão no leito: inicialmente quando o leito tem uma baixa quantidade de líquido e as partículas inertes têm uma camada muito fina na sua superfície, o líquido ajuda na movimentação e circulação das partículas dentro do leito, pois evita a formação de pontes líquidas fortes. Quando a quantidade de líquido se torna muito alta, inicia-se um processo de aglomeração de pasta-inerte-produto, formando assim aglomerados que impedem a movimentação dos sólidos no ânulo (formando as chamadas zonas mortas), principalmente próximo à parede. Desta forma, o ar que entra no leito não

consegue penetrar nessa região, o escoamento é direcionado para a região central do leito (jorro), facilitando a passagem de ar e assim reduzindo a queda de pressão.

Figura 4.20 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para diferentes vazões de alimentação na temperatura de 90°C.

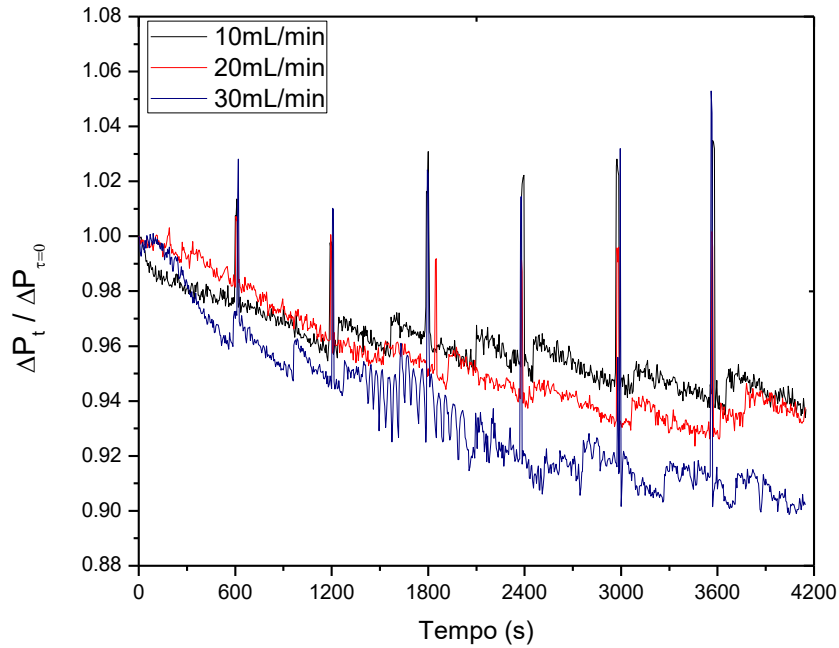


Figura 4.21 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de secagem para os experimentos a 20 mL.min⁻¹.

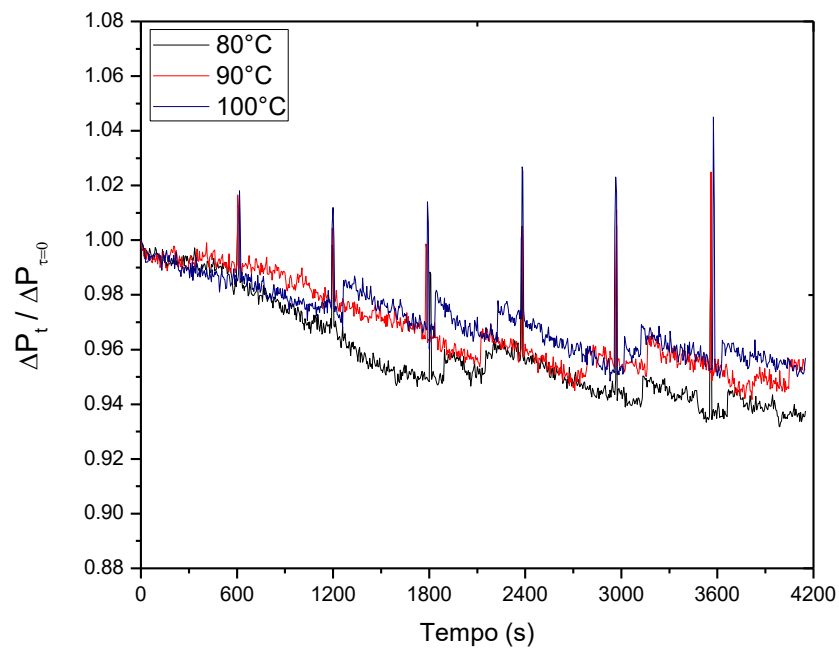
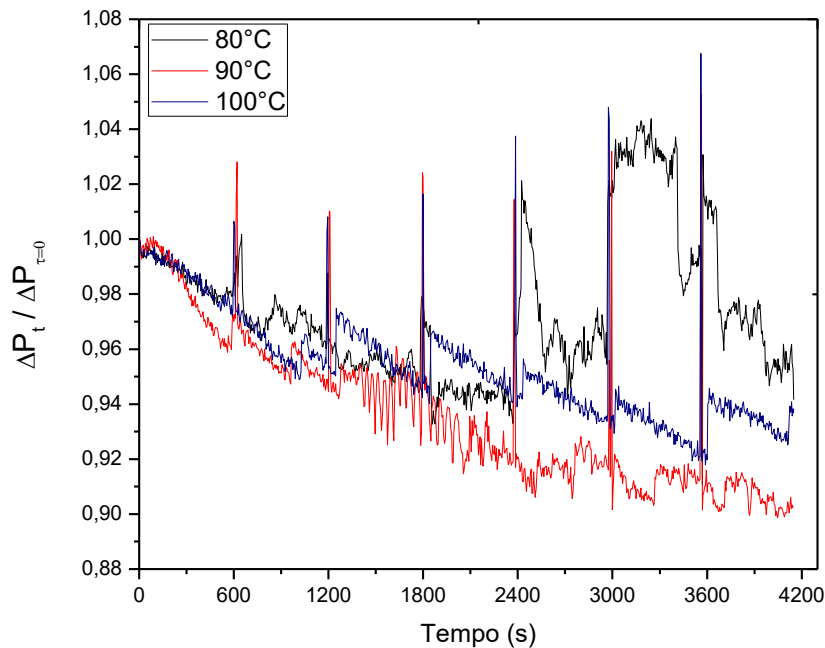


Figura 4.22 – Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo de operação para vazões de alimentação de 30 mL.min⁻¹.



Os bruscos aumentos na pressão do leito a cada 600s (10 minutos) referem-se aos instantes de coleta do pó, onde ocorre a saída do ar pela abertura da segunda válvula. Esse fato é devido à formação da torta no filtro e o aumento da resistência à passagem de ar. Pode ser observado ainda na Fig. 4.20 que o comportamento é mais oscilatório para a vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹, apresentando maiores variações devido à instabilidade do leito em condições extremas de vazão de pasta alimentada, como esperado.

A influência da temperatura do ar pode ser verificada na Figura 4.21, apresentando pouca influência no adimensional da queda de pressão para 20 mL.min⁻¹. Podendo ser essa variação decorrente do “ruído” do processo, sendo uma variação da coleta de dados.

Na Figura 4.22 observa-se que a temperatura do ar foi mais significativa quando utilizado vazão de pasta de 30 mL.min⁻¹, sendo possível realizar a secagem de pasta de forma estável somente nas temperaturas de 90 e 100°C. A 80°C, ocorre redução da pressão devido à presença da pasta no leito até aos 2400s de operação, mas após esse tempo nota-se instabilidades no leito, devido principalmente ao comprometimento da movimentação adequada das partículas. Esse comportamento da pressão pode ser assemelhado a uma movimentação pistonada/borbulhante, como foi mencionado anteriormente na Fig. 2.1 e 2.3.

Vieira (2015) verificou instabilidade e o colapso do jorro utilizando vazão de alimentação de 30 mL.min⁻¹ (leite bovino UHT) e temperatura de 90°C, ocasionando o

aumento da queda de pressão no leito. Contudo nesse trabalho foi possível realizar a secagem nessa condição, sendo esse fato possível devido as diferentes propriedades das pastas utilizadas e da menor área de contato entre a fase sólida e gasosa (menor carga de partículas de polietileno como inerte dentro do leito) utilizada por esse autor.

4.3.5 Análise estatística do balanço de massa

De acordo com o balanço de massa realizado através das equações 3.7 a 3.10, foram determinados as médias e desvio padrão das respostas, e os dados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Média e desvio padrão das respostas do planejamento experimental utilizadas no processo de secagem.

Temperatura do ar (°C)	Vazão de alimentação (mL.min⁻¹)	R (%)	Ac (%)	E (%)	P (%)
80	10	52,0±4,0	34,0±4,0	7,0±1,0	7,0±6,0
80	20	32,0±6,0	32,0±3,0	3,5±0,7	33,0±4,0
80	30	11,0±4,0	33,0±3,0	2,3±0,5	54,0±8,0
90	10	47,0±2,0	30,0±3,0	5,0±2,0	18,0±2,0
90	20	44,0±6,0	28,0±5,0	4,0±1,0	25,0±9,0
90	30	43,0±8,0	33,0±5,0	4,7±0,7	20,0±12,0
100	10	53,0±1,0	26,0±1,0	8,0±1,0	13,0±0,2
100	20	48,0±3,0	23,0±5,0	4,8±0,6	24,0±3,0
100	30	41,0±6,0	27,0±3,0	5,0±2,0	27,0±8,0

Não foi realizada análise estatística dos dados das perdas do processo, sendo atribuídas principalmente ao depósito de material na tubulação. Como pode ser observado na Tabela 4.5, altas vazões de alimentação causam maiores perdas e variações no processo (maior desvio padrão), sendo consequência da umidade mais elevada nessas condições e assim a aderência do pó na parede é maior.

Na Tabela 4.6 estão representados os efeitos para todas as respostas do processo de secagem com nível de significância de 95%. Como pode ser observado, o termo quadrático da vazão de pasta não teve influência significativa ($p < 0,05$) para a resposta R (%), enquanto que

no Ac (%) somente o termo linear da temperatura apresentou influência significativa no processo.

Para a resposta da E (%) foi verificado que houve influência nos dois termos lineares e do termo quadrático da vazão de pasta. O termo de interação foi significativo somente na resposta de R (%).

Tabela 4.6 – Efeitos estimados e valor de p-valor para $\alpha = 0,05$.

Fatores	Efeito			p-Valor		
	R (%)	Ac (%)	E (%)	R (%)	Ac (%)	E (%)
Constante (Mean)	44,78	28,55	3,50	0,0000	0,0000	0,0000
X1 – Temperatura (L)	15,49	-7,34	1,57	0,0000	0,0005	0,0133
X1 – Temperatura (Q)	-10,49	-2,66	1,27	0,0226	0,3872	0,2168
X2 – Vazão de pasta (L)	-18,67	0,80	-2,66	0,0000	0,6510	0,0002
X2 – Vazão de pasta (Q)	-0,25	5,78	2,65	0,9526	0,0701	0,0154
X ₁ X ₂ (L)	14,46	1,17	0,76	0,0001	0,5885	0,2936

O resultado da análise estatística mostrou que a temperatura do ar apresentou efeito positivo sobre o aumento da resposta R (%), enquanto a vazão de pasta o efeito foi negativo, ou seja, quanto maior a vazão de alimentação utilizada no processo, menor foi a recuperação de produto. Esse resultado está associado com o aumento da quantidade de líquido/sólido dentro do leite, favorecendo a formação de pontes líquidas fortes e dificultando o processo de secagem. A recuperação do produto é prejudicada ainda mais quando se aproxima da capacidade máxima do equipamento, como já discutido anteriormente.

Existe um efeito positivo da temperatura do ar sobre o aumento da elutriação de produto, enquanto que para a vazão de pasta o efeito foi negativo. Isso pode ser devido aos maiores valores de umidade do pó obtidos com vazões mais elevadas (principalmente 30 mL.min⁻¹), dificultando a elutriação. Enquanto o aumento da temperatura pode acarretar o aumento da força de arraste sobre a partícula, favorecendo o arraste pelo ciclone.

Para o aumento do acúmulo foi observado um efeito negativo da temperatura e efeito positivo da vazão de pasta, contudo a análise estatística mostrou que o termo da vazão não é significativo ($p > 0,05$). Com base no valor do efeito, percebe-se que a temperatura apresenta 9 vezes mais influência que a vazão na resposta (em relação aos termos lineares). Por sua vez, a redução da temperatura no processo de secagem dificulta a evaporação de água, aumentando

o tempo de permanência do produto no leito e, conseqüentemente, podendo causar o aumento do acúmulo.

A pouca influência da vazão de pasta sobre o acúmulo pode estar relacionada com a pequenas variações dos valores de Ac (%) nos experimentos. Isso pode ser justificado devido a existência de uma quantidade mínima necessária para a pasta para recobrir a superfície dos inertes e aderir à parede do cilindro. Somente após essa quantidade que corresponderia ao acúmulo devido as condições operacionais.

Os resultados de Souza (2003) são similares, pois foi observado que a vazão de pasta não influencia no acúmulo de produto. Contudo na capacidade máxima do equipamento foram obtidos altos valores do acúmulo de pasta no leito, mas quando houve aumento da temperatura do ar ocorreu redução do acúmulo de produto no leito. O estudo de Barret e Fane (1990) também corrobora esses resultados, pois nos experimentos variando somente vazão de pasta alimentada, verificou-se que para algumas vazões o acúmulo foi igual, contudo para elevadas vazões o acúmulo foi mais significativo.

Os termos analisados podem ser visualizados no diagrama de Pareto (Figura 4.23 a 4.25), sendo X_2 (vazão de pasta) o parâmetro que mais apresentou influência para a R (%) e E (%), enquanto que o Ac (%) foi a temperatura do ar (X_1).

Retirando os coeficientes não significativos ($p > 0,05$) do modelo estatístico proposto, pode-se obter as Equações 4.2, 4.3 e 4.4 (em termos das variáveis codificadas) para a R (%), Ac (%) e E (%), respectivamente.

$$R (\%) = 44,78 + 7,75X_1 - 5,25X_1^2 - 9,34X_2 + 7,23X_1X_2 \quad (4.2)$$

$$Ac (\%) = 28,55 - 3,67X_1 \quad (4.3)$$

$$E (\%) = 3,50 + 0,79X_1 - 1,33X_2 + 1,33X_2^2 \quad (4.4)$$

Figura 4.23 – Gráfico de Pareto para os valores de R (%). Legenda (L – termo linear; Q – termo quadrático).

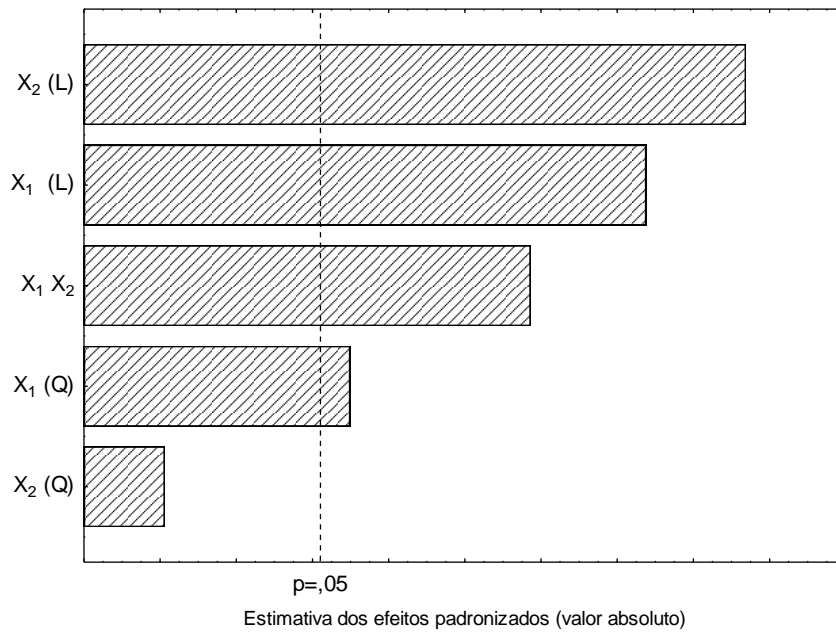


Figura 4.24 – Gráfico de Pareto para os valores de Ac (%). Legenda (L – termo linear; Q – termo quadrático).

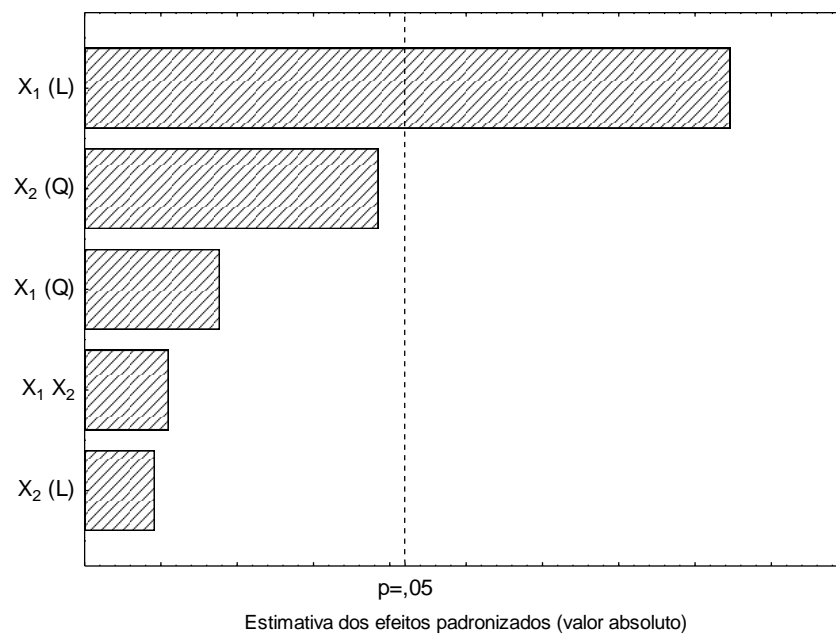
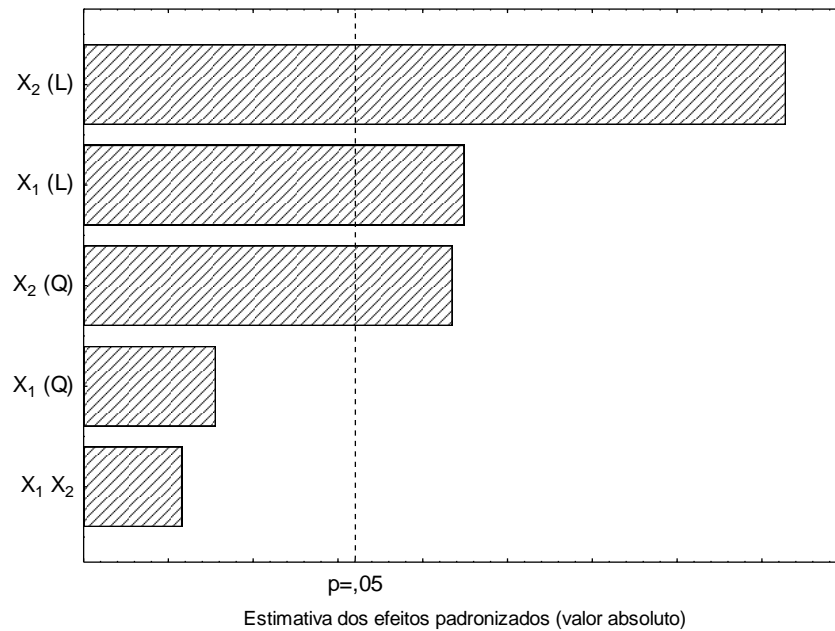


Figura 4.25 – Gráfico de Pareto para os valores de E (%). Legenda (L – termo linear; Q – termo quadrático).



A significância estatística do modelo foi determinada pelo teste F (ANOVA, Análise de variância), sendo apresentados na Tabela 4.7.

O resultado do teste F mostrou que o $F_{\text{cal}}(\text{regressão/resíduo}) > F_{\text{tab}}(\text{regressão/resíduo})$ para todas respostas analisadas, aceitando-se o modelo como adequado para representar os dados experimentais. Foi obtido falta de ajuste somente na resposta R (%) pelo fato que o $F_{\text{cal}}(\text{falta de ajuste/erro puro}) > F_{\text{tab}}(\text{falta de ajuste/erro puro})$, esse resultado pode estar associado com o erro puro estar tendendo a zero. Para o coeficiente de determinação (R^2), foram observados valores insatisfatórios, mostrando que o modelo estatístico não representam adequadamente os dados experimentais. Isso pode ser explicado pelo fato de que existe grande variação das respostas frente as condições externas (Temperatura e umidade do ar) não controladas do processo (BRITO et al., 2017). Outro fato que explica o R^2 baixo são os valores obtidos de desvio padrão apresentados na Tabela 4.5, confirmando assim que nesse tipo de operação de secagem ocorre muita variação dos dados, principalmente nos experimentos com maior instabilidade. Desta forma é difícil obter um modelo estatístico que consiga prever com qualidade as respostas do processo de secagem com pastas em leito de jorro convencional, quando analisado somente dois parâmetros (temperatura do ar e vazão de alimentação) e com respostas que possuem grande variação no processo.

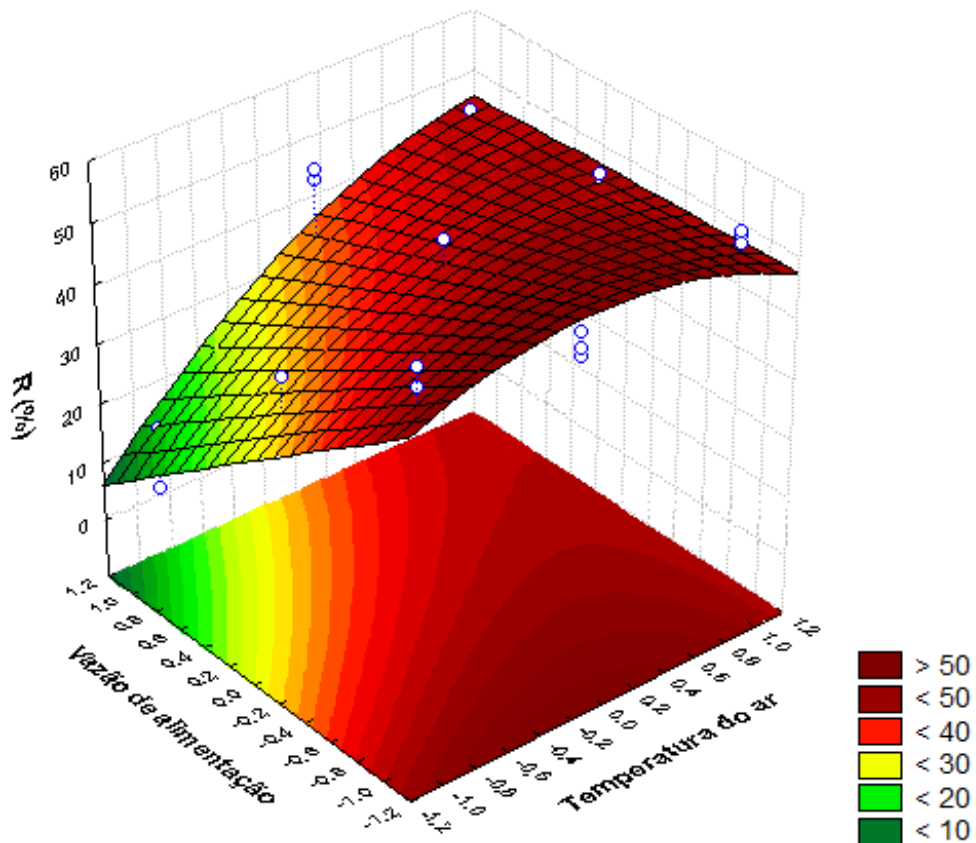
Tabela 4.7 – Análise de variância (ANOVA).

	R (%)	Ac (%)	E (%)
F _{cal} (regressão/resíduo)	14,7	5,0	6,3
F (falta de ajuste/erro puro)	6,3	0,4	2,7
p-valor (regressão/resíduo)	0,00000	0,00353	0,00105
p-valor (falta de ajuste/erro puro)	0,00410	0,75795	0,07465
R ²	77,84	54,42	59,87

$F_{\text{tab}}(\text{regressão/resíduo});5;21;0,05 = 2,68$; $F_{\text{tab}}(\text{falta de ajuste/erro puro});3;18;0,05 = 3,16$

Foram geradas as superfícies de resposta de acordo com o modelo estatístico proposto para as respostas de produto recuperado (Figura 4.26), acumulado (Figura 4.27) e elutriado (Figura 4.28).

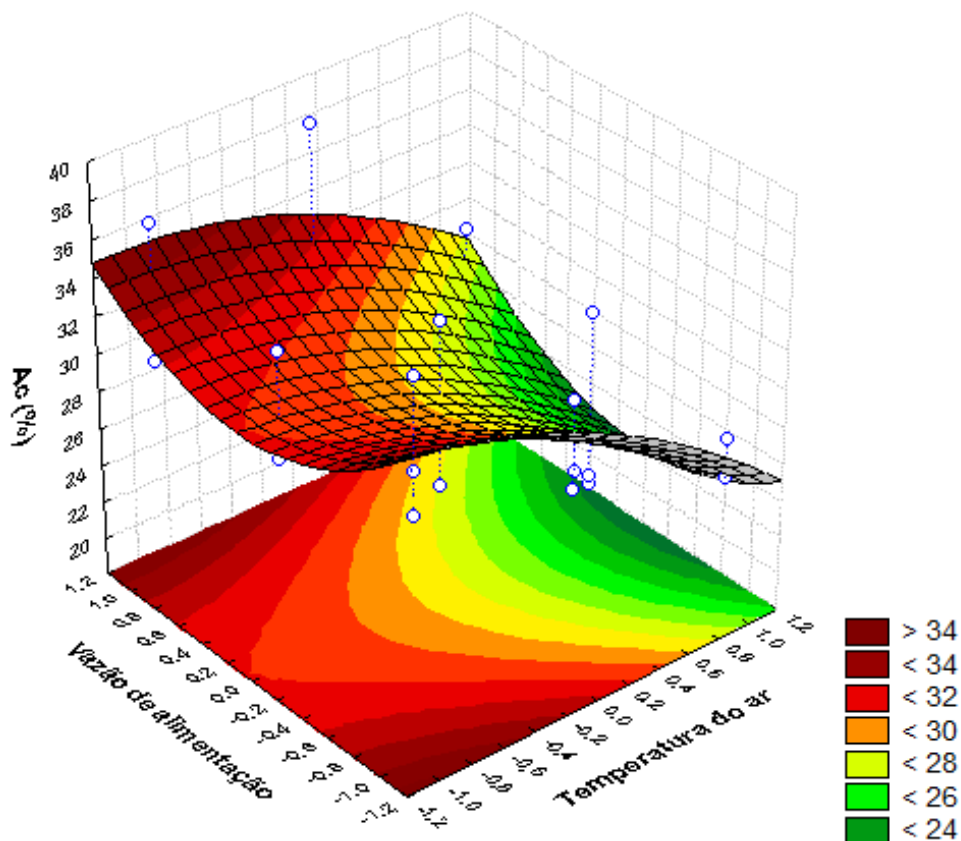
Figura 4.26 – Superfície de resposta da R (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.



Com a superfície de resposta referente a R (%) fica mais fácil visualizar que temperatura do ar na entrada do leito e vazão de alimentação de pasta influenciam no processo. Como é mostrado na Figura 4.26, para maiores vazões de alimentação de pasta a recuperação do produto é inferior as demais condições. Enquanto que a temperatura não mostrou influência para baixas vazões de pasta, mas quando é atingido regiões próximas da capacidade máxima ($30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) a temperatura se torna mais importante para o processo.

Para os resultados obtidos de acúmulo de material dentro do leito, a temperatura do ar se mostrou mais influente no processo, comprovado também pela Tabela 4.6 que o termo da vazão não foi significativo. De tal forma os menores valores de acúmulo foram obtidos com temperatura do ar em torno de 100°C , como pode ser observado na Figura 4.27 e pelos valores médios da Tabela 4.5.

Figura 4.27 – Superfície de resposta da Ac (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.

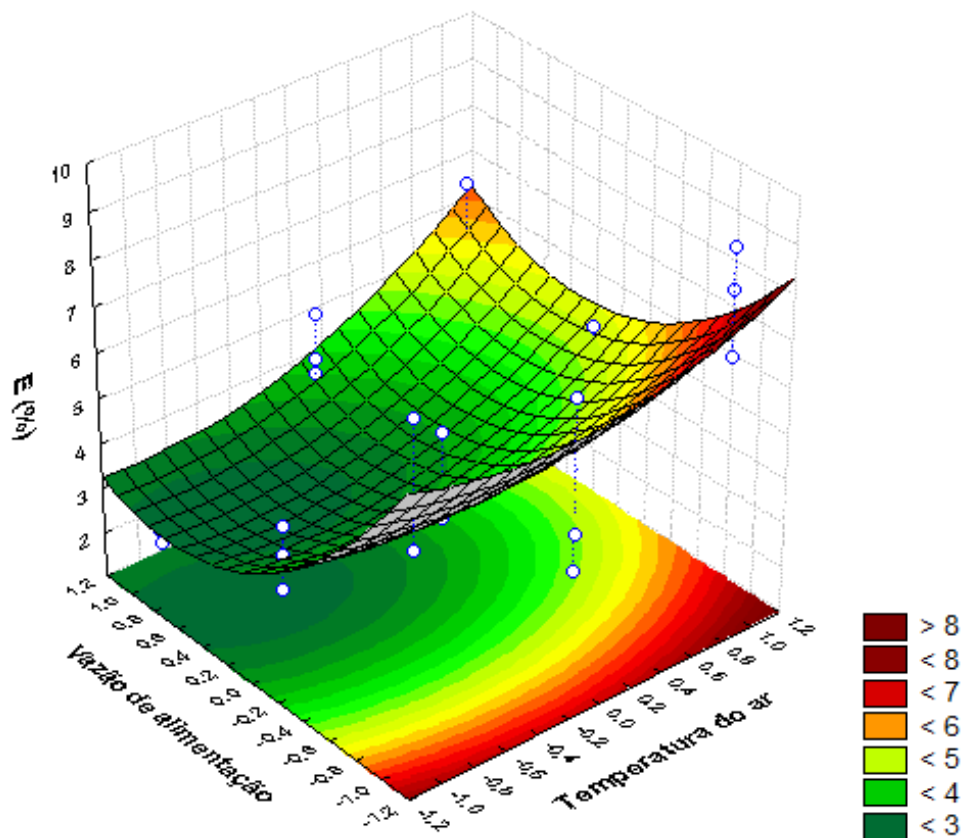


Na Figura 4.28, fica evidente que a vazão de pasta é muito importante para a resposta E (%), sendo que para altos valores da vazão de pasta quase não se obtém material elutriado

no processo. Esse resultado pode estar associado com os maiores valores de umidade do pó (Figura 4.10 a 4.12), dificultando a elutriação do pó devido maior peso da partícula elutriada.

Desta forma, as melhores condições operacionais para a faixa avaliada foi para vazão de 10 mL.min⁻¹, podendo operar na temperatura de 80°C sem grandes mudanças na recuperação do produto, com menor consumo energético no processo de secagem. Entretanto, utilizar temperatura do ar de entrada mais elevada pode proporcionar menor variação da resposta no processo, como mostra na Tabela 4.5 pelo menor desvio padrão na R (%) e redução do acúmulo (Figura 4.27).

Figura 4.28 – Superfície de resposta da E (%) em função da vazão de pasta e da temperatura do ar em variáveis codificadas.



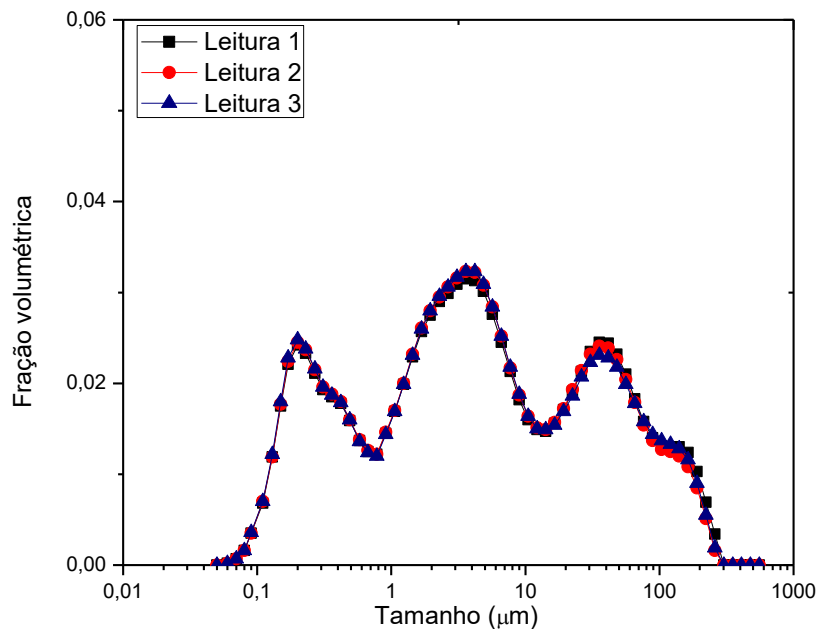
Teoricamente o processo seria otimizado utilizando vazão de alimentação de 20 mL.min⁻¹ com temperatura do ar próxima a 90°C. Essa alteração acarretaria valor próximo de R (%) em relação a melhor condição (10 mL.min⁻¹) e, como vantagem adicional, dobraria a capacidade de processamento de pasta no processo de secagem, favorecendo também a redução do acúmulo e melhorando a eficiência global do processo.

4.4 Distribuição granulométrica

As amostras de carbonato de cálcio coletadas nos experimentos da seção 4.3 foram utilizadas para realizar a análise granulométrica do pó, considerando as mesmas condições operacionais de temperatura do ar de entrada (80, 90 e 100°C) e a vazão de alimentação da pasta (10, 20 e 30 mL.min⁻¹). O equipamento utilizado para fazer as análises realiza três leituras de cada amostra, como mostra a Figura 4.29. Não se observaram grandes diferenças entre os dados de cada leitura. Assim, foi utilizado o valor médio das leituras do equipamento para esse trabalho.

Contudo, na seção 4.3 todos os ensaios foram realizados em réplicas, sendo assim também foi feita a análise granulométrica dessas réplicas para verificar possíveis variações entre si. Desta forma são representado pelas Figuras 4.30 a 4.32 (média das repetições) os gráficos do tamanho das partículas em escala logarítmica em função da fração volumétrica. Para representação dos gráficos, foi considerado D_{Ac} (Diâmetro do material acumulado), D_R (Diâmetro do material recuperado) e D_E (Diâmetro do material elutriado).

Figura 4.29 – Distribuição do tamanho das partículas do material acumulado para vazão de pasta de 10 mL.min⁻¹ a 100°C.

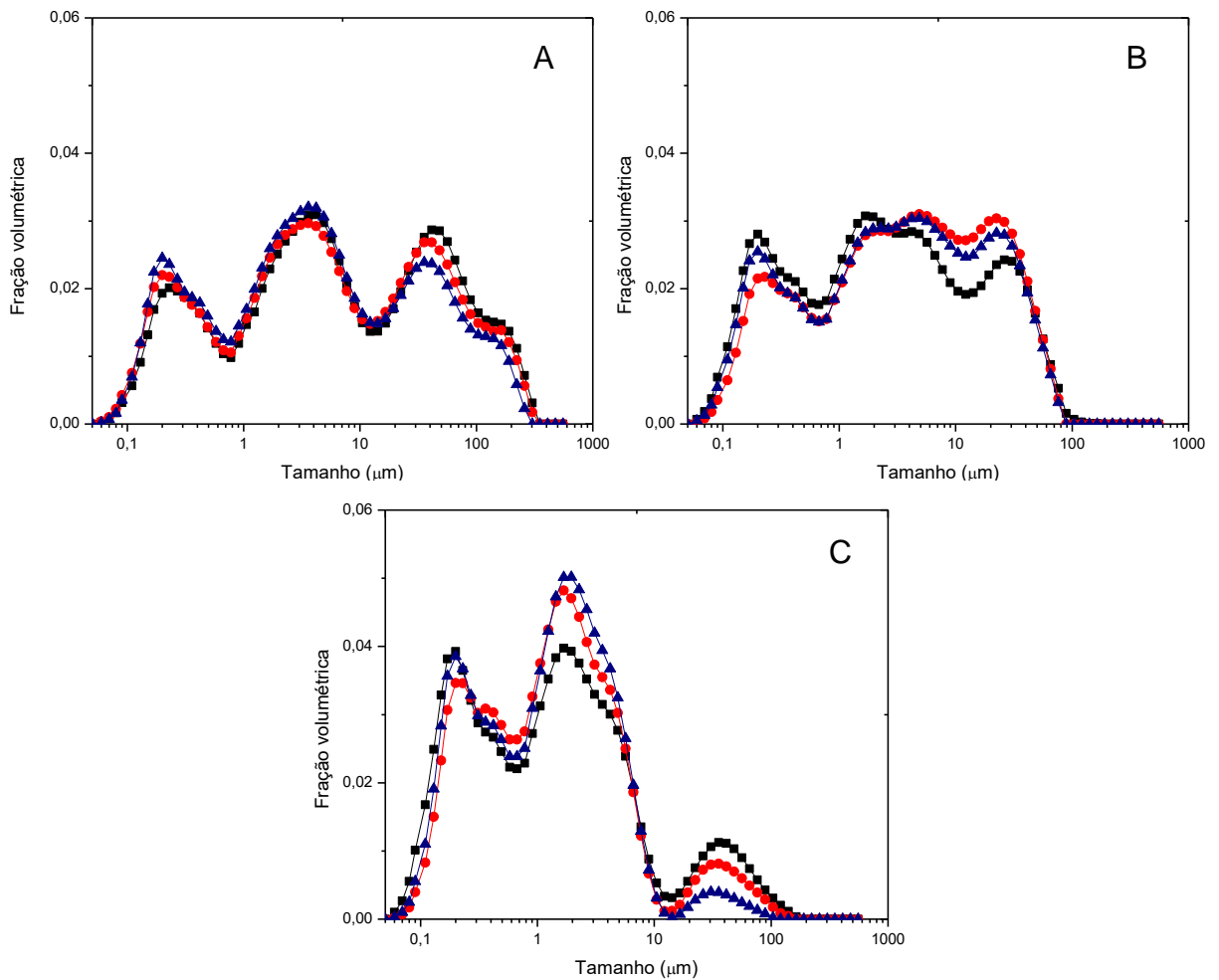


A distribuição do tamanho das partículas não apresentou características de log-normal, mas observa-se que existem partículas em toda as faixas de tamanhos analisados (0,05 a 550 μm).

Para vazão de alimentação de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ as menores partículas são referentes ao D_E (inferiores a $10 \mu\text{m}$), enquanto o D_R são menores que $100 \mu\text{m}$ e as maiores partículas são do D_{Ac} (maiores em $300 \mu\text{m}$), como apresentado na Figura 4.30.

Comportamento similar pode ser observado nas demais vazões de alimentação (20 e $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ nas Figuras 4.31 e 4.32, respectivamente), mas houve aumento das frações das partículas maiores quando ocorre o aumento da vazão de alimentação. Esse fato está associado com a aglomeração das partículas devido a maior quantidade de pasta, que favorece o aumento do tamanho das partículas. Somente o D_E permaneceu com distribuição similar em todas as condições operacionais, podendo ser justificada que somente nessa faixa de tamanho as partículas são arrastadas e elutriadas para o filtro (podendo estar relacionado também com o diâmetro do corte do ciclone, ou seja, a eficiência do ciclone).

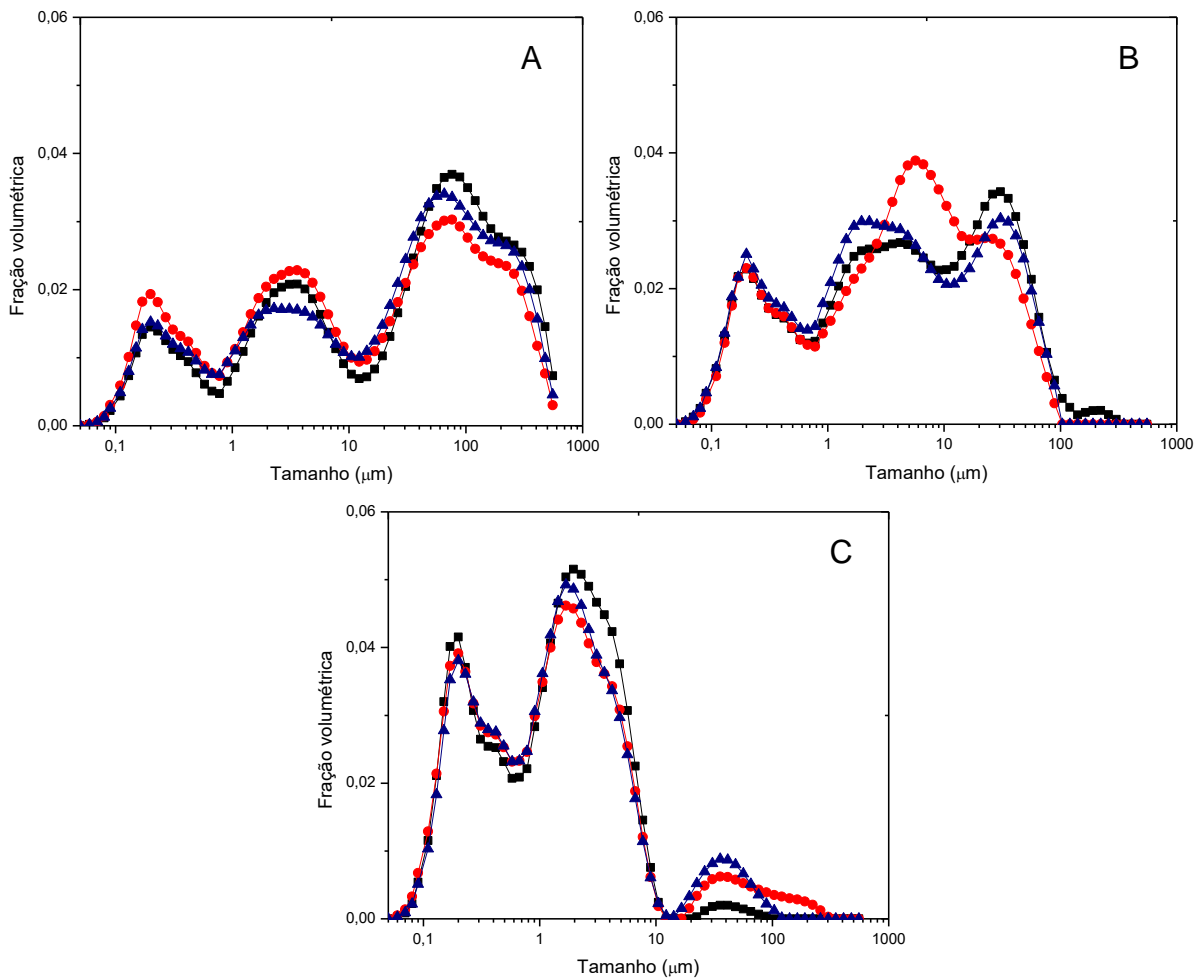
Figura 4.30 – Distribuição do tamanho das partículas da D_{Ac} (A), D_R (B) e D_E (C) para vazão de pasta de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).



O efeito da temperatura de entrada do ar não foi muito influente na distribuição granulométrica do pó, entretanto o D_R na vazão de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ apresentou comportamento atípico devido à capacidade máxima do equipamento ter sido atingida. Desta forma, somente o material recuperado no ciclone sofreu grandes alterações na distribuição granulométrica do pó, como representado na Figura 4.32. Esse fato pode ser justificado devido ao maior tempo de permanência do pó recuperado no ciclone, pois o processo de secagem continua após o leito de jorro (passando para o ciclone) e devido às partículas mais úmidas nessa condição, essas tiveram maior tempo dentro do sistema para se aglomerarem e aumentarem de tamanho.

Contudo para o D_R na vazão de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ pode ser verificada uma perturbação na temperatura de 90°C , sendo que nas condições próximas a capacidade máxima do equipamento, até mesmo fatores externos não controlados podem influenciar no processo de aglomeração, como é o caso das condições atmosféricas.

Figura 4.31 – Distribuição do tamanho das partículas da D_{Ac} (A), D_R (B) e D_E (C) para vazão de pasta de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).



Um indicativo da amplitude da distribuição das partículas são os valores do span apresentados na Tabela 4.8. Para esses dados, quanto menor o valor obtido de span, mais estreita a distribuição, indicando maior homogeneidade com relação ao tamanho das partículas (TEERANACHAIDEEKUL et al., 2007; SANTOS et al., 2012). O valor de span é considerado como índice polidispersão, sendo o quanto do tamanho da partícula desvia da média, calculada com base na equação 3.5.

Desta forma o D_E apresentou menor faixa de distribuição das partículas, tanto pelas Figuras 4.30 a 4.32 com faixa de 0,05 e próximo de 10 μm e também pelos baixos valores de span. Enquanto o D_R e D_{Ac} ficaram com valores próximos de span, mostrando uma distribuição mais heterogênea.

Figura 4.32 – Distribuição do tamanho das partículas da D_{Ac} (A), D_R (B) e D_E (C) para vazão de pasta de 30 mL.min⁻¹. Legenda: 80° (■); 90° (●); 100° (▲).

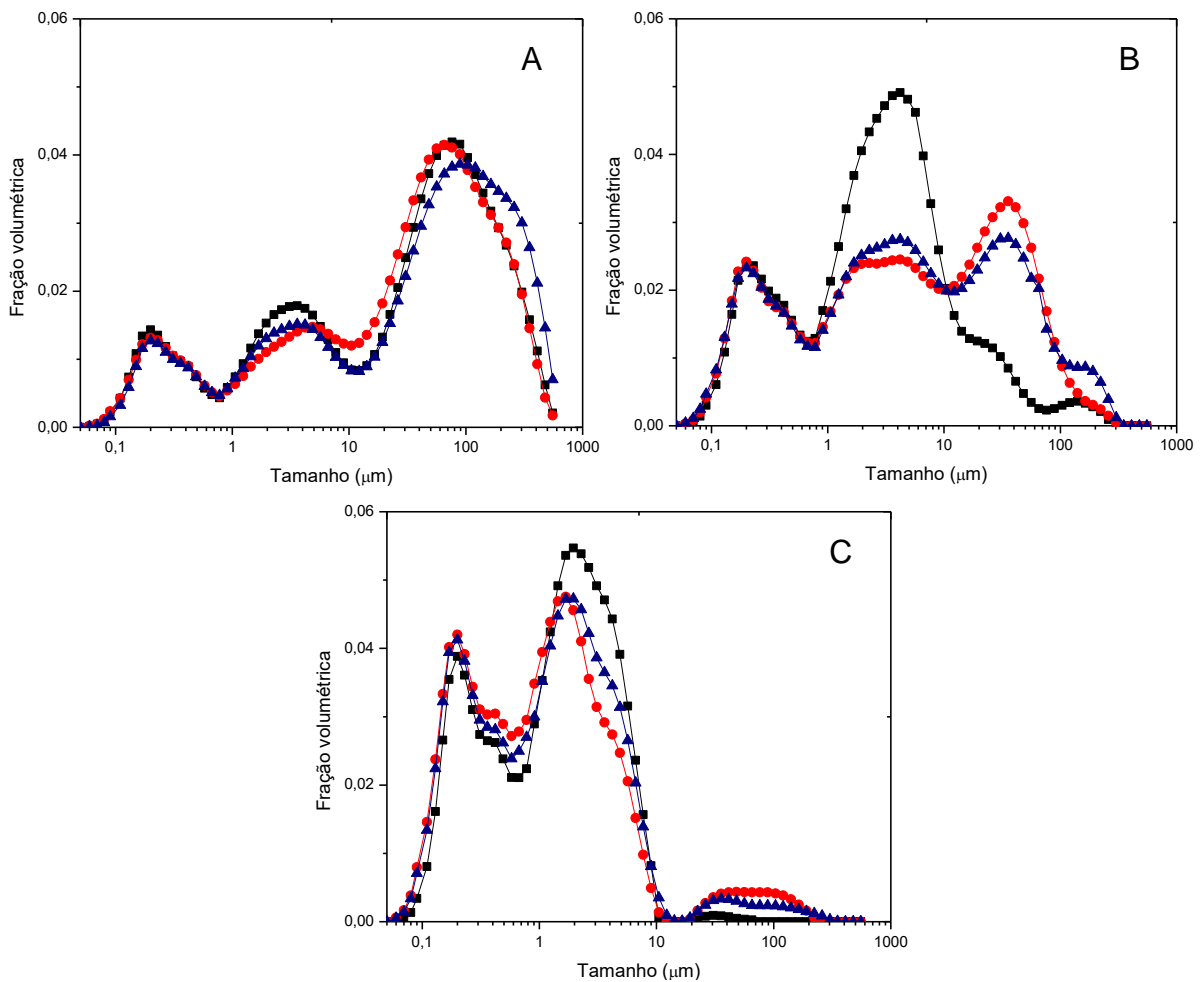


Tabela 4.8 – Média e desvio padrão do Span.

	80°C	90°C	100°C
10 mL.min⁻¹			
Ac	15,10±0,80	18,00±5,00	17,40±0,50
E	8,00±3,00	8,00±4,00	3,90±0,09
R	7,80±0,60	7,90±0,80	9,00±0,20
20 mL.min⁻¹			
Ac	6,70±0,60	12,60±0,70	7,50±0,80
E	3,54±0,07	5,00±0,30	4,80±0,80
R	9,10±0,70	6,90±0,40	11,00±1,00
30 mL.min⁻¹			
Ac	5,20±0,40	5,30±0,40	5,00±1,00
E	3,30±0,10	5,10±0,60	4,50±0,70
R	6,00±0,80	9,00±3,00	13,00±2,00

Utilizando a Equação 3.4, determinou-se o valor do diâmetro médio em volume ($d_{4,3}$) dos experimentos nas diferentes regiões analisadas com seus respectivos desvios, sendo apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – $d_{4,3}$ das condições operacionais utilizadas no processo de secagem.

Temperatura do ar (°C)	Vazão de alimentação (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	20	15,00±1,00	80,00±11,00	2,30±0,10
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	20	10,00±0,20	62,00±5,00	6,60±0,90
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	20	11,40±0,60	70,00±20,00	4,40±0,90
100	30	21,00±2,00	92,00±3,00	5,00±2,00

Analisando inicialmente o desvio padrão do D_R , pode-se observar que o aumento da vazão de alimentação favorece o aumento dos desvios padrões, enquanto os maiores desvios foram obtidos para D_{Ac} . Isso pode estar associado com as características do processo de secagem em leito de jorro, uma vez que as partículas acumuladas são fortemente influenciadas pelas condições operacionais, de tal forma que o processo se torna menos estável com o aumento da vazão de pasta. Apesar dos dados apresentarem desvio elevado em algumas condições, esses podem ser considerados aceitáveis, uma vez que no estudo de Souza (2003), foi observado desvio padrão igual e maior que a média (para o D_R).

Um fator muito importante a ser visualizado na Tabela 4.9 é o aumento do tamanho médio das partículas ($d_{4,3}$) com o aumento da vazão de pasta alimentada. Com exceção do material retido no filtro, pois somente as menores partículas e possivelmente as com menor umidade são rapidamente elutriadas e tem menor influência do processo de aglomeração.

Apesar da variação do tamanho das partículas devido às condições operacionais, estas apresentaram valor aproximado entre 8 e 19 μm para o D_R , 21 e 92 μm para o D_{Ac} e 2 e 7 μm para o D_E . Mostrando que as maiores partículas são encontradas no leito, as intermediárias recuperadas no ciclone e somente as menores partículas conseguem ser elutriadas e retidas no filtro.

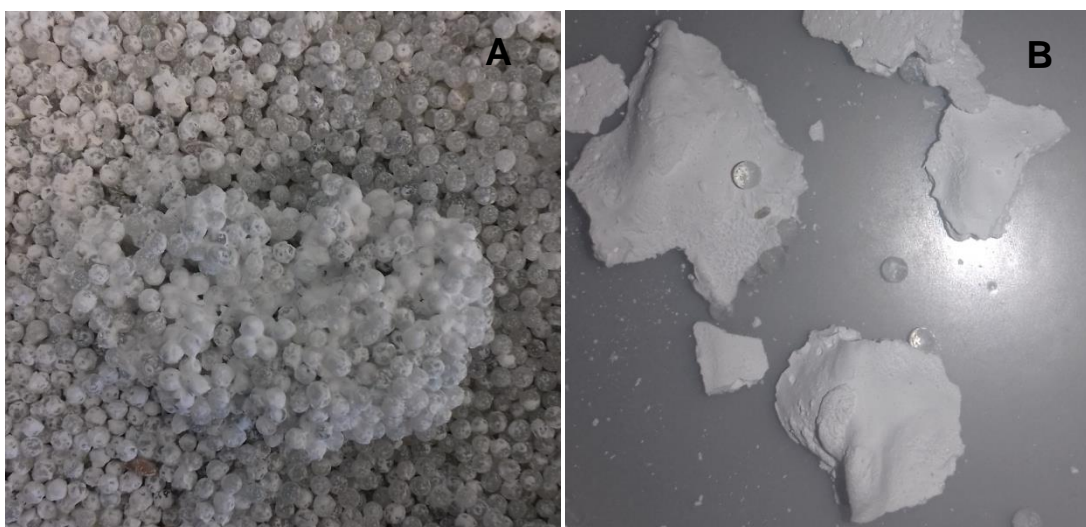
Mesmo as partículas obtidas dentro do leito sendo as maiores, ainda são classificadas como partículas finas, uma vez que Masters (1991) classifica partículas com tamanho médio entre 20 e 40 μm como partículas finas. Enquanto que pelo Diagrama de Geldart, todo o pó obtido nesse trabalho poderia ser classificado como tipo C.

Contudo as partículas acumuladas no leito e recuperadas no ciclone estão mais susceptíveis às forças de interação interpartículas, como forças de Van der Waals, forças eletrostáticas e pontes líquidas (SCHUCHMANN et al., 1993) e assim o processo de aglomeração é favorecido. Como exemplo pode-se verificar na Figura 4.33 a consequência do processo de aglomeração de partícula-pasta-produto dentro do leito e assim fica evidente que grandes vazões de alimentação tendem a aumentar o tamanho das partículas e causar problemas operacionais relacionados a taxa de circulação de inertes e instabilidade do leito.

Estudo realizado por Dotto e colaboradores (2011) constatou a influência da temperatura do gás de entrada na qualidade do produto (D_R) gerado no leito de jorro na secagem de quitosana. Esses autores comprovaram que o aumento de 363 para 373 K (2,75%) provocou 50% de aumento (de 100 para 150 μm) no tamanho médio da partícula. Aumento mais significante foi obtido por Shuhama et al. (2003) na secagem de urucum em leito de

jorro, apresentando crescimento de 203% (21,6 para 65,5 μm) ao aumentar a temperatura em 5,67% (353 para 373K). Entretanto nesse trabalho não foi verificada uma relação de crescimento do tamanho da partícula em função da temperatura do ar, sendo esse resultado similar ao estudo realizado por Souza (2003).

Figura 4.33 – Aglomerado no leito para vazão de $30\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ de pasta na temperatura de 90°C . A) Aglomeração de pasta-inerte-produto; B) Aglomeração de produto seco.



Foi relatado por Souza e Oliveira (2005), que não só as condições operacionais do sistema como temperatura do ar e vazão de pasta estão atreladas com a formação do pó, mas também com o atrito entre as partículas inertes 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).

Propriedades da solução/suspensão também podem influenciar na granulometria do produto, pois no estudo realizado por Jinapong et al. (2008), na secagem de leite de soja em *spray-dryer*, verificou que o aumento da concentração de sólidos na pasta alimentada causou o aumento do tamanho das partículas. Enquanto que estudos realizados por Ré e Freire (1988) mostraram que as alterações na viscosidade dos extratos utilizados na alimentação em leito de jorro não apresentaram nenhuma relação direta com o tamanho das partículas do produto.

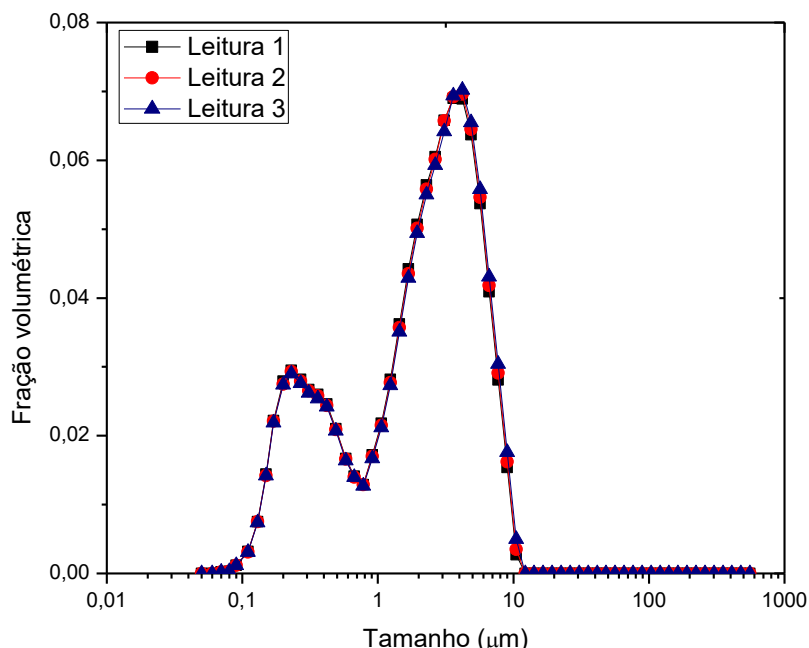
A influência desses parâmetros também estão relacionados com a forma dessas partículas, pois a pasta atomizada no topo do leito pode ser seca antes de atingir as partículas inertes, em um processo similar ao *spray-dryer*, apresentando pó com geometria que se aproxima de uma esfera (SOUZA e OLIVEIRA, 2005).

Entretanto o pó produzido em leito de jorro apresenta geometria na forma de lascas devido o atrito dos inertes (SOUZA, 2003), como já discutido anteriormente. Sendo assim, existe um erro associado ao diâmetro apresentado na Tabela 4.9, pois o equipamento utilizado para fazer a análise granulométrica do pó (Malvern), presume que as partículas são esferas perfeitas (sem irregularidades na superfície). Assim, converte o volume da amostra (pó) para o volume de uma esfera, obtendo um diâmetro de uma esfera perfeita.

Foi coletada uma amostra do carbonato de cálcio utilizado para preparar a suspensão alimentada no leito de jorro e realizado uma análise granulométrica, como apresentado na Figura 4.34. Na distribuição pode-se observar que o pó inicial não possui fração das partículas superiores que 10 μm . O valor de $d_{4,3}$ foi de $2,53 \pm 0,04 \mu\text{m}$. Desta forma, pode-se observar com os dados da Tabela 4.9 que houve um aumento no tamanho das partículas no leito e coletada no ciclone, mas houve exceção para o pó retido no filtro.

Dois fatores são levantados para explicar esse aumento, sendo um deles já discutido anteriormente (aglomeração de partículas). O segundo refere-se à alimentação de pasta, que é feita com uma suspensão de carbonato de cálcio, ou seja, devido à baixa solubilidade do CaCO_3 em água, as partículas ficam suspensas na água. Após a formação do filme sólido na superfície dos inertes, não são mais várias partículas sobrepostas e sim uma única camada de CaCO_3 . Desta forma, quando esse filme é quebrado pelo atrito dos inertes, novas partículas de CaCO_3 são formadas, com tamanho e forma diferentes da inicial.

Figura 4.34 – Distribuição do tamanho das partículas da amostra inicial.



4.5 Secagem com intermitência

Como mostrado anteriormente, o leito de jorro apresenta problemas operacionais quando utilizado em grandes vazões de alimentação, reduzindo a produção de pó e assim inviabilizando o processo. Como alternativa para esse problema, pode-se utilizar a intermitência para melhorar o processo. Essa técnica já vêm sendo aplicada na secagem de leito de jorro para sementes e pastas (JUMAH et al., 1996; CHUA et al., 2003; DANTAS, 2013; SILVA, 2016). O processo de intermitência consiste na interrupção temporária de uma das variáveis do processo. Para secagem de sementes, é empregado na vazão de ar para melhoria da eficiência energética, enquanto que na secagem de pasta e soluções pode ser usado também na vazão de alimentação de pasta.

Desta forma, frente à necessidade do aumento da produção mássica e aos problemas quando utilizadas altas vazões de alimentação, propõe-se utilizar a técnica de intermitência na vazão de alimentação de pasta para melhorar a estabilidade do leito de jorro em condições extremas de vazão de pasta (aumentando a capacidade de secagem do equipamento) e aumentar a produção de pó.

Foi feito um teste preliminar para determinar se 10 minutos de intermitência seriam suficientes para recuperar o potencial de secagem do leito, sendo avaliado pelo comportamento da temperatura e do adimensional da umidade absoluta na saída do equipamento. Silva (2016) utilizou o mesmo tempo de operação e intermitência (1 h), sendo o tempo de intermitência mais que suficiente para retomar o potencial de secagem, mas esse elevado tempo causa maior custo energético devido a vazão de ar.

Assim, para o teste inicial, foram realizados 3 ciclos com tempo total aproximado de 2,8h, demonstrando os resultados na Figura 3.35, (para $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e 100°C). Demonstrando que o sistema consegue retomam o potencial de secagem devido a Uad apresentar valor semelhante a cada novo ciclo e a temperatura do ar atingir valores próximos aos iniciais.

Após determinar que 10 seriam suficientes, foi utilizado tempo de operação de 70 min, para efeito de comparação dos dados da seção 4.3.5, e aplicado a intermitência de 10 minutos aos 35 minutos de secagem (totalizando 80 minutos). Foi utilizada a vazão de alimentação de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, a qual apresentou piores resultados, principalmente para temperatura de 80°C . Foi realizado o mesmo procedimento descrito na metodologia anteriormente mencionada, com exceção da coleta do produto no ciclone, sendo realizadas um total de 9 coletas. Os dados podem ser melhor visualizados pela Tabela 4.10 e Figura 3.36, para as 3 repetições.

Figura 4.35 – Adimensional da umidade absoluta (A) e temperatura do ar (B) na saída do leito de jorro para vazão de pasta de 30 mL.min⁻¹ e 100°C.

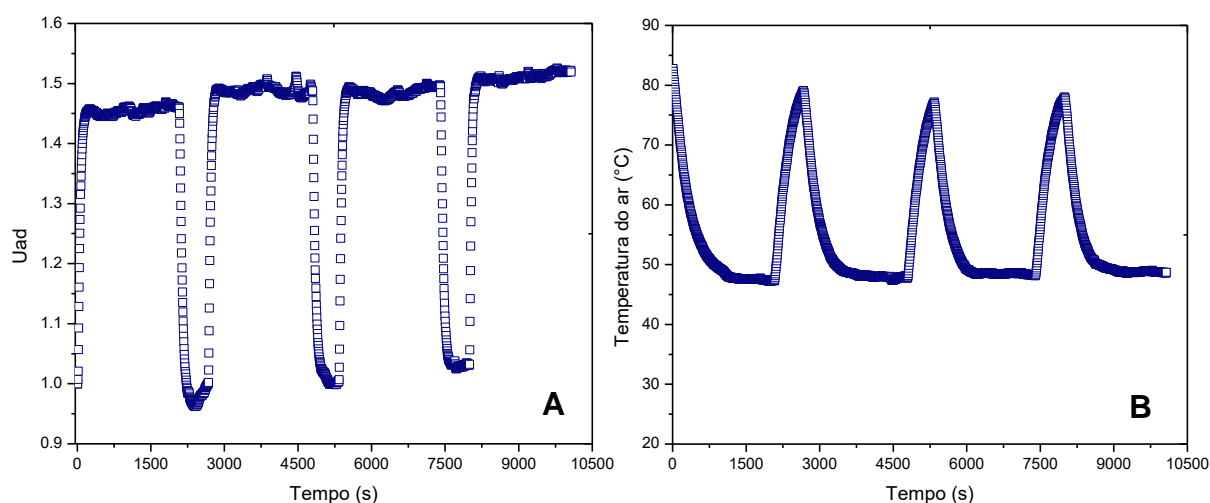


Tabela 4.10 – Média e desvio padrão da massa de CaCO₃ para secagem com intermitência.

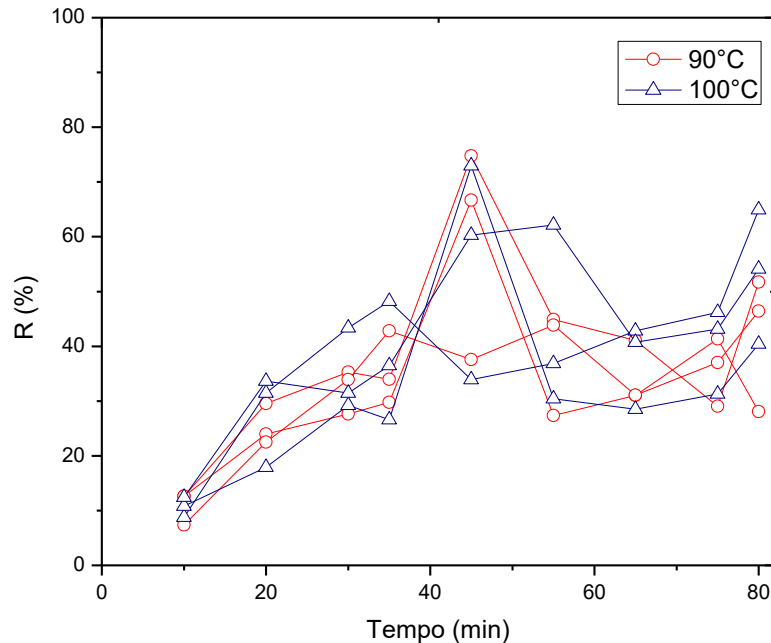
Tempo corrido de operação	Tempo contabilizado para balanço de massa	Massa de CaCO ₃ adicionada ao sistema (g)		Massa de CaCO ₃ recuperada no ciclone (g)	
		90	100	90	100
10	10	15,5	15,5	1,7 ± 0,5	1,7 ± 0,3
20	10	15,5	15,5	3,9 ± 0,6	4,3 ± 1,3
30	10	15,5	15,5	5,0 ± 0,6	5,4 ± 1,2
35	5	7,7	7,7	2,7 ± 0,5	2,9 ± 0,8
45	Intermitência	0*	0*	9,2 ± 3,0	8,6 ± 3,1
55	10	15,5	15,5	6,0 ± 1,5	6,7 ± 2,6
65	10	15,5	15,5	5,3 ± 0,9	5,8 ± 1,2
75	10	15,5	15,5	5,5 ± 1,0	6,2 ± 1,2
80	5	7,7	7,7	3,3 ± 1,0	4,1 ± 0,9
Total	70	108,2	108,2	42,6 ± 4,6	45,6 ± 5,8

*Utilizou-se como base 10 minutos de operação para efeito de comparação do R (%).

Observa-se que a recuperação do produto nos primeiros 35 minutos fica em torno de 30%, estando de acordo com o processo contínuo. Contudo após os 10 minutos de intermitência nota-se um considerável aumento na recuperação do produto (70%). Esse fato pode ser justificado devido ao desligamento da vazão de pasta, assim parte do produto acumulado dentro do leito (que recobre as partículas inertes e na parede do equipamento) é removido, como mencionado anteriormente. Nesse período, o sistema tenta restaurar seu

potencial de secagem inicial. Dessa forma a taxa de circulação de partículas inertes dentro do leito aumenta, favorecendo o desprendimento do pó pelo atrito dos inertes e é arrastado pela corrente de gás até o ciclone (SILVA, 2016).

Figura 4.36 – Recuperação do produto em função do tempo de operação com intermitência.



Uma consideração nos cálculos foi feita para facilitar a interpretação dos dados, sendo que aos 45 minutos (coleta do pó após a intermitência) a porcentagem de massa recuperada foi calculada com referência em 10 minutos de alimentação. Desta forma, a porcentagem de produto recuperado no período de intermitência foi calculada com base em um tempo de alimentação de pasta igual ao tempo de intermitência.

Após a intermitência, o processo tende a entrar em regime permanente próximo aos 40% de recuperação do produto, com exceção da última coleta, pois ocorre o desligamento da vazão de ar e assim o aumento da R (%), como já discutido anteriormente.

A secagem de pasta na temperatura do ar de 80°C não foi possível, pois durante a coleta do produto no ciclone, foi verificada a presença de pasta (líquida). Assim, mesmo com a utilização da intermitência não foi suficiente para aumentar a capacidade evaporativa nessa condição de secagem. Outro fator que justifica a impossibilidade de continuar a secagem nessa condição são os dados apresentados na Figura 4.37. Observa-se que tanto na temperatura do ar de saída quanto na umidade absoluta, o ar não conseguiu retomar por completo a condição adequada para inciar um novo ciclo, sendo esse fato justificado devido a

presença de líquido no leito, necessitando de maior tempo para evaporar a água, secar a pasta e remover o produto.

A utilização de um maior tempo de intermitência no processo de secagem, poderia ser proporcional a um processo contínuo com uma vazão de pasta inferior, compensando o tempo extra de intermitência. A comparação dos resultados do balanço de massa para as temperaturas de 90 e 100°C entre o processo contínuo e com intermitência são apresentados na Tabela 4.11.

Figura 4.37 – Temperatura do ar (A) e Umidade Relativa (B) na saída do leito na operação com intermitência.

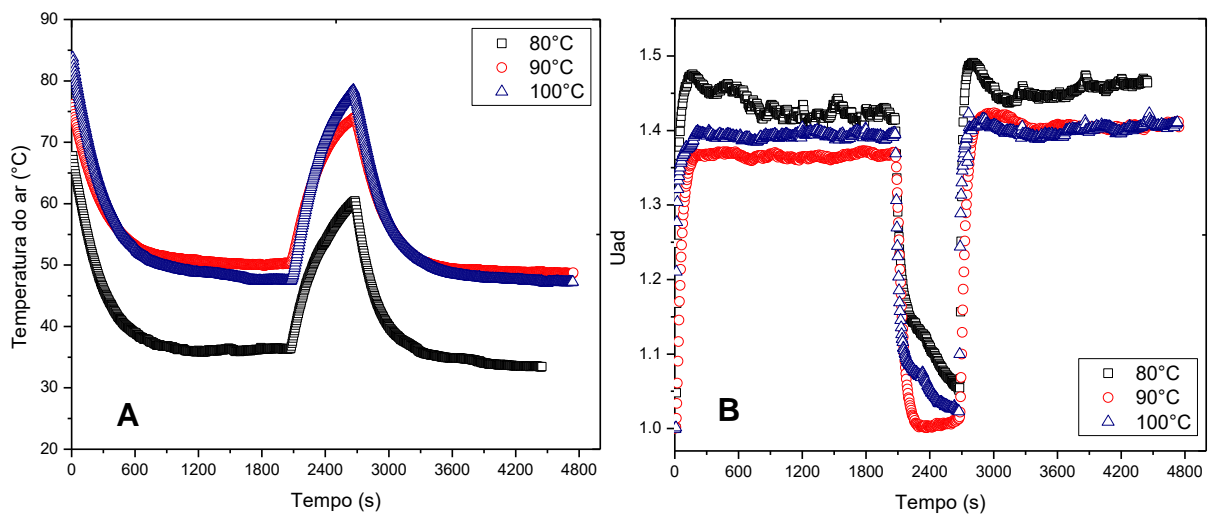


Tabela 4.11 – Comparação entre o processo de secagem contínuo e intermitente.

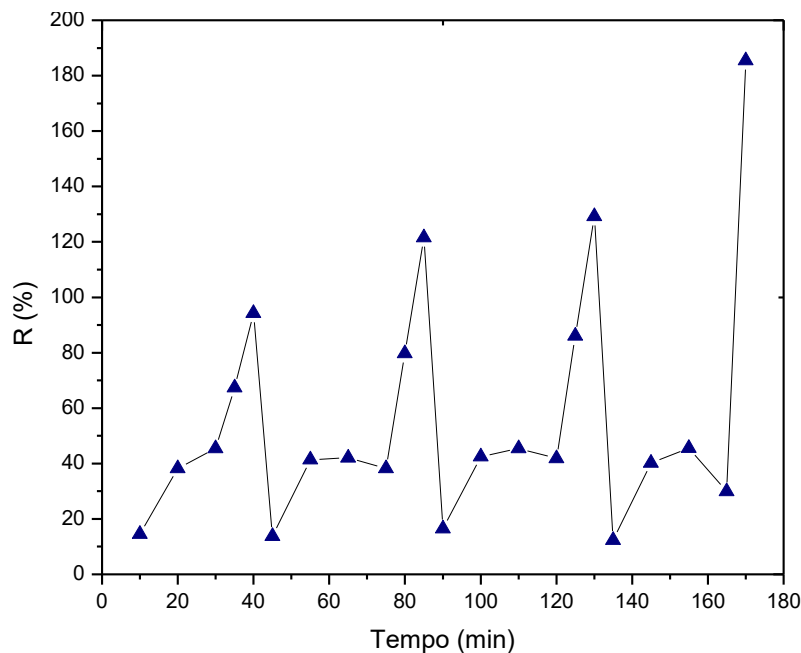
Temperatura	90°C	100°C
Intermitência		
Ac	21,0 ± 5,0	20,0 ± 9,0
E	4,2 ± 0,4	4,9 ± 0,9
R	39,0 ± 4,0	42,0 ± 5,0
P	35,0 ± 7,0	33,0 ± 4,0
Contínuo		
Ac	33,0 ± 5,0	27,0 ± 3,0
E	4,7 ± 0,7	5,0 ± 2,0
R	43,0 ± 8,0	41,0 ± 6,0
P	20,0 ± 12,0	27,0 ± 8,0

Observa-se que somente o Ac (%) apresentou melhora no processo, diminuindo em torno de 35% do valor médio em ambas as temperaturas, contudo o erro experimental ainda

foi elevado. Para os demais parâmetros não foi verificada uma influência significativa com a utilização da intermitência, contudo esses resultados podem ser decorrentes do balanço de massa para um ciclo, sendo possível obter resultados melhores quando comparados com processos mais longos, uma vez que o regime transiente (que apresenta menor recuperação do produto devido ao recobrimento dos inertes) fica menos significativo.

Apesar da R (%) com intermitência apresentado na Tabela 4.10 não ter causado grande alteração nos resultados da recuperação, os dados da recuperação do produto no experimento com 4 ciclos apresentaram um comportamento característico do processo de intermitência, como mostra a Figura 4.38.

Figura 4.38 – Recuperação do produto em função do tempo de operação com 4 ciclos de intermitência.



Pode ser analisado que a R (%) é maior durante o período de intermitência e principalmente na última coleta (170 min), atingindo valor de porcentagem próximo a 185%, este último é devido a uma quantidade significativa de produto aderido na parede interna do ciclone que ao final do processo (fim da passagem de ar no sistema), foi facilmente recuperado.

O balanço de massa quando analisado o tempo total de operação (170 minutos), apresentou valor de R (%) próximo aos 62% enquanto o Ac (%) e E (%) foram de 14 e 6% respectivamente. Esses resultados podem ser justificados devido o maior tempo de operação e

assim o termo do acúmulo se torna menos significativo ao longo do processo, pois esse parâmetro é atribuído principalmente ao material necessário para recobrir os inertes e a parede da tubulação. A porcentagem de produto elutriado ainda é baixa, mas comparando com o total, a massa retida no filtro aumenta com o tempo de operação, podendo causar problemas devido à formação da torta e à maior resistência à passagem do ar.

5 CONCLUSÕES

Com os dados obtidos nesse estudo e as discussões realizadas foi possível ter um melhor entendimento do processo de acúmulo e elutriação de produto no sistema de secagem de pasta em leito de jorro, assim como das possíveis interações interpartículas e do comportamento granulométrico em função das variáveis do processo. Desta forma, tornou possível que novos estudos e discussões sejam realizados, uma vez que a literatura ainda é escassa nessa área.

Foi possível obter dados do balanço de massa global, ajudando tanto a trabalhos futuros quanto aos modelos matemáticos nas suas hipóteses simplificadoras que normalmente desprezam o efeito do acúmulo e, principalmente, do material elutriado durante o processo de secagem em leito de jorro.

Os ensaios realizados mostraram que a capacidade máxima do equipamento foi atingida para vazão de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, podendo operar no seu limite com temperatura do ar de 90 e 100°C . Contudo para 80°C não foi possível realizar a secagem em um processo estável, apresentando muita variação na queda de pressão e umidade do ar, além de elevados valores da umidade do produto, mas para 10 e $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, permaneceu praticamente constante no decorrer dos experimentos e estão de acordo com a literatura. De tal forma, que quando mais se aproxima da capacidade máxima do equipamento, mais a temperatura do ar de entrada tende a ser significativa para o processo de secagem.

Pôde-se observar que o aumento da vazão de pasta influenciou fortemente na recuperação e elutriação de pó, enquanto a temperatura foi mais efetiva no acúmulo de material no leito. O aumento da alimentação de pasta proporcionou redução da porcentagem de recuperação de produto e elutriação, tendo como possível causa o maior valor da umidade do pó, principalmente na condição de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

Entretanto a melhor condição para se realizar a secagem nesse equipamento, com os dados observados, foi para a vazão de alimentação de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ com temperatura do ar de entrada entre 90 e 100°C , pois apresenta alta recuperação de produto e baixa variação nos dados.

Apesar da formação da torta no filtro, foram elutriados aproximadamente 2 a 8% do carbonato de cálcio alimentado, enquanto o material acumulado no leito ficou em torno de 23 a 34%. A recuperação do produto ficou entre 11 a 53%, onde os piores resultados foram observados para operação próxima da capacidade máxima do equipamento.

A análise estatística feita pelo delineamento composto central de face centrada mostrou que temperatura do ar e vazão de alimentação influenciam significativamente no processo de secagem, mas para o acúmulo de material a temperatura exerce maior influência na resposta.

A distribuição granulométrica foi diferente para o pó retido no leito, recuperado no ciclone e retido no filtro. Observando os valores médios do diâmetro, verificou-se que as menores partículas são retidas no filtro, as intermediárias recuperadas no ciclone e as maiores se acumulam no leito. O aumento do tamanho da partícula foi causado pelo processo de aglomeração devido à alta vazão de pasta, enquanto a temperatura teve pouco ou quase nenhuma influência nessa variável. Comprovou-se também que houve um aumento no tamanho das partículas quando comparado com a amostra inicial utilizada para preparar a pasta.

A utilização da intermitência na vazão de alimentação de pasta foi somente significativa para processos longos, atingindo no balanço de massa uma recuperação do produto próximo aos 62%. Contudo não foi possível aumentar a capacidade máxima do equipamento, tendo com causa possível o pouco tempo de intermitência ou a própria limitação do leito utilizado.

Pode-se concluir, por fim, que o objetivo desse trabalho foi atingido, adquirindo dados importantes do balanço de massa global no processo de secagem em leito de jorro, identificando quais as variáveis do processo que mais influenciam no acúmulo, produto recuperado e material elutriado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre os resultados e conclusões apresentados nesse trabalho, alguns destes são parciais, necessitando de estudos complementares. A técnica de intermitência para melhorar a capacidade de produção do leito de jorro é algo pouco abordado, sendo que essa técnica pode ser utilizada também na vazão de ar no intuito de otimizar a eficiência energética do processo. Desta forma como sugestão para trabalhos futuros:

- Realizar balanço de massa e energia no processo, para verificar se é mais viável aumentar o tempo de intermitência ou reduzir a vazão de alimentação e realizar o processo de forma contínua.
- Utilizar do processo de intermitência para proporcionar estabilidade em leito de jorro quando em ampliação de escala, como é sabido da literatura, esse é uma das principais desvantagens em leito de jorro.
- Propor modelos que simulem dados em escala industrial da secagem de pastas em leito de jorro, visando a produção de pó e redução de custo energético. Para possibilitar a aplicação do leito de jorro na secagem de pastas/soluções na indústria.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEODATO, M. G. **Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas**. 2003. 208p. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas-SP, 2003.
- ALMEIDA, A. R. F. de. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. 2009. 165p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 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: An International Journal**, v. 28, n.3, p.330-340, 2010.
- BARRET, N.; FANE, A. Drying of Liquid Material in a Spouted Bed. In: MUJUMDAR, A. **Drying'89**. New York, USA, Hemisphere Publ. Co., 1989. v. B, p. 415-420.
- BRITO, R. C.; PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor (L) moench*]. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 95–105, 2017.
- BITTI, M. R. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. 2012. 59p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2012.
- BOWEN, P. Particle Size Distribution Measurement from Millimeters to Nanometers and from Rods to Platelets, **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 23, n. 5, p. 631-662, 2002.
- CHRIST, D. **Secagem de clara de ovo em leito de jorro fluidizado bidimensional**. 2006. 180p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Campinas, Unicamp, Campinas –SP, 2006.
- CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts-an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, p. 285-295, 2003.
- CORRÊA, N. A. **Controle da secagem de pasta em leito de jorro**. 2000. 207p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2000.
- CUNHA, R. L.; MAIALLE, K. G.; MENEGALLI, F. C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthangum: focus on product quality. **Powder Technology**, v. 107, n. 3, p.234-242, 2000.
- CUNHA, F. O; SPITZNER NETO, P. I.; FREIRE, J. T. Estudo da Secagem de Pastas: Influência da Presença da Pasta. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), XXVI, Teresópolis, RJ, 1998. **Anais...** Teresópolis, UFRJ Imprensa Universitária, 1999, p. 315-322.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 2012.

DANTAS, T. N. P. **Avaliação de dados de secagem de suspensões de polpas de frutas em leito de jorro com alimentação intermitente**. 2013. 93p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal-RN, 2013.

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 – FWT**, v. 44, p. 1786-1792, 2011.

FERNANDES, C. F. **Análise da eficiência energética da secagem de pasta em leito de jorro**. 2005. 96p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2005.

FERREIRA, J. A.; ANDRADE, T. C. C. M.; MANCINI, M. C.; SCHEID, C. M. Obtenção de Concentrado de Feijão em Pó em Leito de Jorro Bidimensional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, n. 28, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. p.339-344.

FREIRE, J. T.; ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B. Análise do regime transiente na secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes através do modelo CST. In: FREIRE, J. T. et al. **Aplicações em Sistemas Particulados**. São Carlos: Suprema, 2009. v. 1, Cap.3, p.74-112.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. (2012a). A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium, **Drying Technology: An International Journal**, v. 30, n. 4, p. 330-340.

FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; NASCIMENTO, B. S. (2012b). A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles, **Drying Technology: An International Journal**, v. 30, n. 11-12, p. 1342-1353.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**. New York: John Wiley& Sons, 1986.

GISHLER, P. E.; MATHUR, K. B., Method of contacting solid particles with fluids, U.S. Patent, n° 2,786,280 to Nat. Res. Council of Can.,1957 (filed 1954).

GRACE, J. R. Hydrodynamics of gas fluidized beds, in fluidized bed boilers: design and application, **Pergamon Press**, Canada, p.13-30, 1984.

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.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology: An International Journal**, v. 14, p. 765-802, 1996.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, V. G. S. Control of industrial dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. Ed. Boca Raton: Taylor e Francis, Inc., 2006. Cap. 49, p. 1161-1181.

LEU, L.; PAN, R. S. Pressure Fluctuations in Jet Spouted Beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 82, p. 1044-1047, 2004.

LOPES, N. E. C.; MORIS, V. A. S.; TARANTO, O. P. Analysis of spouted bed pressure fluctuation during particle coating, **Chemical Engineering and Processing**, v. 48, p. 1129-1134, 2009.

KLEINBACH, E.; RIEDE, T. H. Coating of solids. **Chemical Engineering and Processing**, v. 34, p.329-337, 1995.

MARKOWSKI, A. S. Drying Characteristics in a Jet spouted Bed Dryer, **Can. J. Chem. Eng.**, v. 70, n. 5, p. 938, 1992.

MARKOWSKI, A. S. Quality interaction in a jet spouted bed dryer for bio-products. **Drying Technology: An International Journal**, v. 11, n. 2, p. 369-387, 1993.

MARRETO, R. N.; PEIXOTO, M. P. G.; TEIXEIRA, C. C. C.; FREITAS, L. A. P. Analysis of pressure drop fluctuations during water evaporation in spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 386-393, 2009.

MASTERS, K. **Spray drying handbook** (5th ed.). Essex, UK: Longman Scientific & Technical, 1991.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304p.

MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M.; MEDEIROS, U. K. L.; da MATA, A. L. M. L. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance. **Drying Technology: An International Journal**, v. 20, n. 4-5, p. 855-881, 2002.

MORRIS, J. A. **Análise da Taxa de Evaporação de Água de um Secador de Leito de Jorro com Partículas Inertes**. 1990. 106p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 1990.

NASCIMENTO, B. S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro**. 2013. 112 p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2013.

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

OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G.; NIRANJAN, K. Spouted bed dryer for liquid foods. **Food Control**, v. 4, n. 1, p. 41-45, 1993.

OKOS, M. R.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R. K.; WEITNAUER, A. C. (1992). Food dehydration. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. New York: Marcel Dekker (Chapter 10).

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 31, n. 7, p.1784-1792, 1992.

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: An International Journal**, v. 15, n.2, p. 605-624, 1997.

PIETSCH, W. **Handbook of powder science and technology** - Cap 6: Size enlargement by agglomeration. Second edition, Ed. Fayed, E. F. and Otten, L., Chapman and Hall, New York, 1997.

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

RÉ, M. I.; FREIRE, J. T. Secagem de extrato farmacológicos. In XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, XV ENEMP, 1987, Uberlândia – MG, **Anais...** Uberlândia: Editora da UFU, v. II, p. 399-406, 1988.

REGER, E. O.; ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAYA, N. B. Drying of Paste-like Materials on Inert Bodies in a Spouting Bed, *Zh. Prikl. Khim.* (Leningrad), v. 40, n. 10, p. 2189-2191, 1967.

REYS, A. **Secagem de suspensões em leito de jorro cônico**. 1993. 169p. Tese (Doutorado) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

RODRIGUES, C. C. **Análise da Secagem de Suspensões em Leito de Jorro com Partículas Inertes**. 1993. 116p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 1993.

SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; ALVAREZ, S. MORALES, A.; BILBAO, J. Local Porosity in Conical Spouted Beds Consisting of Solids of Varying Density. **Chemical Engineering science**. v. 60, p. 2017-2025, 2005.

SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. 2011. 142p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, 2011.

SANTANA, J. D. A.; CHARBEL, A. L. T.; PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. Effect of interparticles forces on the spouted bed flow behavior. In Proceedings of the Inter - **American Drying Conference**, Itu-SP, p. 135-142, 1997.

SANTOS, G. S.; PEREIRA, G. G.; BENDER, E. A.; COLOMÉ, L. M.; GUTERRES, S. S.; CARVALHO, D. C. M.; WEISSMULLER, G. Desenvolvimento e caracterização de

nanopartículas lipídicas destinadas à aplicação tópica de dapsona. **Química Nova**, v. 35, nº. 7, p. 1388 – 1394, 2012.

SCHNEIDER, T.; BRIDGEWATER, J. Drying of Solutions and Suspensions in Spouted Beds. In: MUJUMDAR, A. **Drying'89**. New York, USA, Hemisphere Public Co., 1989. p. 421-425.

SCHUCHMANN, H.; HOGEKAMP, S.; SCHUBERT, H. Jet agglomeration processes for instant foods, **Trends in Food Science & Technology**, v. 4, p. 179 – 183, 1993.

SHILTON, N. C.; NIRANJAN, K. Fluidization and its applications to food processing. **Food Structure**, v.12, n. 2, p.199-215, 1993.

SHUHAMA, I. K.; AGUIAR, M. L.; OLIVEIRA, W. P.; FREITAS, L. A. P. Experimental Production of Annatto Powders in Spouted Bed Dryer, **J. Food. Eng.** v. 59, n.1, p. 93–97, 2003.

SILVA, C. A. M. **Análise da dinâmica de secagem de pasta m leite de jorro**. 2016. 101p. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2016.

SILVA, O. S. **Desenvolvimento do processo de recobrimento e secagem de microgrânulos em leite fluidizado**. 2003. 165p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, Campinas –SP, 2003.

SIMAL, S.; FEMENÍA, A.; LLULL, P.; ROSSELLÓ, C. Dehydration of aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. **J. Food Eng.** v. 43, n. 2, p. 109-114, 2000.

SOUZA, C. R. F. **Estudo comparativo da produção de extrato seco de *Bauhinia forficata* Link pelos processos *spray-dryer* e leite de jorro**. 2003. 280p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto – SP, 2003.

SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Spouted bed drying of *Bauhinia fortificata* Link extract: the effects of atomizer position and operating conditions on equipment performance and product properties. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 239-247, 2005.

SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Drying of herbal extract in a draft-tube spouted bed, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 279-288, 2009.

SPITZNER NETO, P. I. **Secagem de Pastas em leite de Jorro**. 1997. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

SPITZNER NETO, P. I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leite de jorro na presença de pastas e líquidos**. 2001. 284p. Tese (Doutorado) Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2001.

STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying os patelike materials. In MUJUNDAR, A. S. **Advances in Drying**, McGraw Hill, Washington, v. 2, p. 193-231, 1983.

TEERANACHAIDEEKUL, V.; SOUTO, E. B.; JUNYAPRASERT, V. B.; MÜLLER, R. H. Cetyl palmitate-based NLC for topical delivery of Coenzyme Q₁₀ – Development, physicochemical characterization and *in vitro* release studies. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 67, p. 141–148, 2007.

TOĞRUL, I. T; PEHLIVAN, D., 2004. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **J. Food Eng.** v. 65, n. 3, 413-425.

VEGA-MERCADO, H.; GONGORA-NIETO, M. M.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, v.49, n.4, p. 271-289, 2001.

VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da unidade de pós produzidos pela secagem de pasta em leito de jorro**. 2015. 109p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2015.

WILHELM, L. R. Numerical calculation of psychrometrical properties in SI units, **Trans. of the ASAE**, v. 19, p. 318-325, 1976.

**APÊNDICE: DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ABSOLUTA E RELATIVA DO
AR NA SAÍDA DO SISTEMA POR CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES
PSICROMÉTRICOS**

Para determinar a umidade absoluta e relativa, foram utilizadas temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco juntamente com manipulações matemáticas das equações psicrométricas para encontrar uma correlação que possa ser utilizada para o monitoramento real das umidades de saída do sistema de secagem. Utilizou como referência o artigo desenvolvido por Wilhelm (1976), a dissertação (Mestrado) de Silva (2016) e a tese (Doutorado) de Almeida (2009).

Desta forma, sabendo que a pressão de vapor da água saturada (P_{v}^{sat}) é dada pela equação A1 e a umidade absoluta (Y) pode ser calculada pela equação A2, utiliza-se de artifícios matemáticos para chegar a equação A3 uma vez que não se sabe a pressão de vapor da água.

$$P_{v}^{sat} = e^{\left(\frac{A}{T} + B + C \cdot T + D \cdot T^2 + E \cdot T^3 + F \cdot T^4 + G \cdot \ln(T)\right)} \quad (A1)$$

onde T é a temperatura em Kelvin (K), respeitando a faixa de $273,16 \leq T \leq 393,16$, P_{v}^{sat} é obtida em kPa. Legenda: A = -7511,52; B = 89,63121; C = $2,399897 \cdot 10^{-2}$; D = $-1,1654551 \cdot 10^{-5}$; E = $-1,2810336 \cdot 10^{-8}$; F = $2,0998405 \cdot 10^{-11}$; G = -12,150799.

$$Y = 0,62198 * \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (A2)$$

onde Y é dado em kg H₂O/kg ar seco, P_v é a pressão de vapor de água, e P_{atm} é a pressão atmosférica local, em kPa.

$$Y = \frac{(2501 - 2,411 * t_{bu}) * Y_{bu}^{sat} - 1,006 * (t_{bs} - t_{bu})}{2501 + 1,775 * t_{bs} - 4,186 * t_{bu}} \quad (A3)$$

onde t_{bs} e t_{bu} são as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido respectivamente, dadas em °C; Y_{bu}^{sat} é a umidade absoluta na condição de saturação para temperatura de bulbo úmido, calculado pela Equação A2

A umidade relativa pode ser calculada com a equação A4 e fazendo algumas substituições chega na equação (A5), sendo Y_{sat} a umidade absoluta na condição de saturação para temperatura de bulbo seco.

$$\text{UR} = \frac{P_v}{P_v^{\text{sat}}} \quad (\text{A4})$$

$$\text{UR} = \frac{\frac{Y}{Y_{\text{sat}}}}{1 - \left(1 - \frac{Y}{Y_{\text{sat}}}\right) * \frac{P_v^{\text{sat}}}{P_{\text{atm}}}} \quad (\text{A5})$$