

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

**ANÁLISE DO EFEITO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS
GEOMÉTRICAS DO LEITO DE JORRO NA SECAGEM DE PASTAS**

MAISA TONON BITTI PERAZZINI

SÃO CARLOS - SP

2015

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

**ANÁLISE DO EFEITO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS
GEOMÉTRICAS DO LEITO DE JORRO NA SECAGEM DE PASTAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

SÃO CARLOS - SP

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P427ae Perazzini, Maisa Tonon Bitti.
Análise do efeito das condições operacionais e
caraterísticas geométricas do leito de jorro na secagem de
pastas / Maisa Tonon Bitti Perazzini. -- São Carlos :
UFSCar, 2015.
113 f.

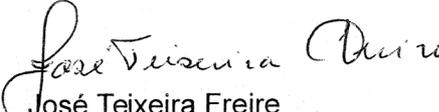
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2015.

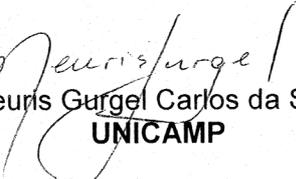
1. Engenharia química. 2. Operações unitárias. 3.
Sistemas particulados. 4. Calor - transmissão. 5. Massa –
transferência. 6. Equipamentos industriais. I. Título.

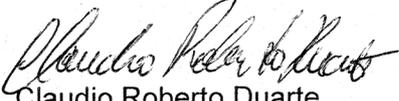
CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE MAISA TONON
BITTI PERAZZINI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 06
DE JULHO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:


José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar


Meuris Gurgel Carlos da Silva
UNICAMP


Claudio Roberto Duarte
UFU


Maria do Carmo Ferreira
UFSCar


Rodrigo Béttega
UFSCar

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me concedido força e perseverança para vencer as dificuldades encontradas no caminho e alcançar esta conquista em minha vida.

Aos meus amados pais Gerson Antonio Bitti e Maria de Lourdes Tonon Bitti por serem o maior exemplo da minha vida, sobretudo pelo amor e pela incansável dedicação para comigo. Esta conquista também é de vocês.

À minha querida irmã Marília, pelo apoio, carinho, amizade e por ter me proporcionado muitos momentos de alegria e descontração.

Ao meu amor, Hugo Perazzini, pelo amor, dedicação e principalmente pela paciência, apoio e companheirismo durante todos estes anos.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Teixeira Freire, pela orientação e paciência, e principalmente pela oportunidade e confiança que me foi concedida desde o mestrado. Não tenho palavras para demonstrar a minha gratidão.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. Fábio Bentes Freire pela amizade, apoio e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Thiago Faggión de Pádua, pelo apoio na programação em linguagem LabVIEW, a qual foi muito importante na montagem do sistema de aquisição de dados.

Aos demais professores da área de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar, Dermeval José Mazzini Sartori, Gustavo Dias Maia, Maria do Carmo Ferreira, Rodrigo Béttega e Ronaldo Guimarães Corrêa pelos incentivos e pelas colaborações dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Claudio Roberto Duarte, pro gentilmente contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

À todos os meus amigos do Centro de Secagem e do DEQ/UFSCar, pela amizade, companheirismo e por tornarem estes anos de trabalho muito mais alegres e divertidos.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

*Meu método para superar uma
dificuldade é contorná-la.
(George Polya)*

RESUMO

No presente trabalho, foi realizado um estudo experimental do efeito das condições operacionais e das características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas. O procedimento experimental foi conduzido empregando-se como inertes partículas de polietileno de 4,38 mm de diâmetro e massa específica de $930,50 \pm 0,3 \text{ kg/m}^3$ e como pastas água destilada e leite desnatado. O leito de jorro utilizado foi composto por uma coluna cilíndrica de aço inox com 120 cm de altura, 30 cm de diâmetro, base cônica inferior com ângulos de 45, 60 e 75° e diâmetro de entrada de 3 cm. Foram empregadas duas geometrias distintas de bocal de entrada de ar (Venturi e tubo reto), massa de material inerte equivalente a 1,50; 3,00 e 4,50 kg e altura fixa de leito estático de 23,50. Durante experimentos foram obtidos dados de queda de pressão do leito, velocidade do ar de entrada, temperatura de entrada e saída do leito e temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, bem como a umidade do pó produzido. Os resultados obtidos mostraram um efeito significativo das características geométricas do leito tanto no comportamento fluidodinâmico quanto na secagem de pastas em leito de jorro. Com relação à fluidodinâmica do leito, foi verificado que para um valor fixo de massa de material inerte, a modificação do ângulo de cone de 45° para 75° reduziu os valores de velocidade mínima de jorro, queda de pressão máxima do leito e queda de pressão de jorro estável. No entanto, para um valor fixo de ângulo de cone o aumento da quantidade de partículas elevou os valores destes parâmetros. As correlações da literatura testadas para a previsão dos valores de u_{mj} , $\Delta P_{m\acute{a}x}$ e ΔP_{mj} , em sua maioria superestimaram os dados experimentais, mostrando uma limitação na sua aplicação dentro das condições operacionais estudadas. No que se refere à secagem de leite desnatado, os resultados mostraram que o processo de secagem foi favorecido pelos ângulos de cone de 45° e 75°. Estes resultados foram atribuídos ao maior número de colisões entre as partículas e a maior agitação no interior da câmara de secagem proporcionado por estas configurações de leito. Foi constatado também que o bocal de entrada de ar do tipo Venturi proporcionou ao leito maior estabilidade durante a secagem de leite desnatado em relação o bocal do tipo tubo reto.

ABSTRACT

In this present work, the fluidynamic and drying process of paste in a spouted bed was analyzed. The experiments were conducted using polyethylene particles of 4.38 mm of diameter and $930.5 \pm 0.3 \text{ kg/m}^3$ of specific mass as inert particles, different loads of inert particles (1.50, 3.00 and 4.50 kg) and a fixed static bed height (23.50 cm). The spouted bed consisted of a cylindrical vessel, with 120 cm of height, 30 cm of diameter, 3 cm of inlet diameter, three lower cone angles (45, 60 and 75°) and two geometric factors of inlet nozzle (Venture and straight pipe). Distilled water and skimmed milk were employed as pastes. Bed pressure, inlet air temperature and velocity, exhaust temperature and dry and wet bulb temperature were measured during the experiments. Results have shown that the bed geometry had influence on the bed fluidynamic and drying process. With respect to fluidynamics, it was found that for fixed particles loads, increasing the cone angle from 45° to 75° decreased the minimum spouting velocity and the pressure drop. However, for a fixed cone angle, increasing the particles loads increased the fluidynamics parameters. The correlations used to predict the values of u_{mj} , $\Delta P_{m\acute{a}x}$ and ΔP_{mj} showed a limitation on their application with the operating conditions studied. As regards the drying of skimmed milk, the results showed that the drying process is favored by the cone angles 45° and 75°. This was attributed to the high number of particles collisions and agitation inside the drying chamber, by the bed configurations. Finally, it was found that the Venturi nozzle provided a greater bed stability during drying of skimmed milk over the nozzle type straight pipe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama esquemático de um leito de jorro.....	19
Figura 2.2 - Queda de pressão em função da velocidade do ar ($d_p = 3,6$ mm, $D_c = 15,20$ cm, $D_i = 1,27$ cm, $\theta = 60^\circ$).....	21
Figura 2.3 - Efeito da altura de leito estático na geometria do jorro. (a) $H_0 = 0,15$ m, (b) $H_0 = 0,20$ m, (c) $H_0 = 0,25$ m e (d) $H_0 = 0,30$ m.....	23
Figura 2.4 - Efeito da altura de leito estático na geometria fonte. (a) $H_0 = 0,15$ m, (b) $H_0 = 0,20$ m e (c) $H_0 = 0,30$ m.....	24
Figura 2.5 - Efeito da altura de leito estático na geometria fonte para ângulo de cone de 45° : (a) $H_0 = 0,15$ m, (b) $H_0 = 0,20$ m e (c) $H_0 = 0,30$ m.....	24
Figura 2.6 - Efeito do ângulo de base cônica na geometria do jorro: (a) ângulo de cone de 30° , (b) ângulo de cone de 45° , (c) ângulo de cone de 60° , (d) ângulo de cone de 120° e (e) ângulo de cone de 180°	25
Figura 2.7 - Efeito do ângulo de base cônica na geometria da fonte: (a) ângulo de cone de 30° , (b) ângulo de cone de 45°	26
Figura 2.8 - Linhas de corrente na região anular: (a) base cônica e (b) base plana.....	27
Figura 2.9 - Linhas de corrente na região anular: (a) ângulo de cone externo de 30° e (b) ângulo de cone externo de 15°	28
Figura 2.10 - Geometria do bocal de entrada de ar.....	30
Figura 2.11 - Efeito do diâmetro de entrada de ar na geometria do jorro: (a) $D_0 = 3$ cm, (b) $D_0 = 4$ cm e (c) $D_0 = 5$ cm.....	31
Figura 2.12 - Configuração da distribuição de escoamento de ar: (a) bocal de jato central e (b) bocal de fenda circular.....	32
Figura 2.13 - Dimensões do bocal de entrada de ar: (a) Venturi e (b) tubo reto.....	32
Figura 2.14 - Mecanismo do processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes.....	34
Figura 2.15 - Mecanismos de transferência de calor e massa inerte-película-ar.....	34

Figura 3.1 - Esquema da unidade experimental: soprador (1); sistema by pass (2); medidor de vazão tipo Venturi (3); trocador de calor (4); controlador de temperatura (5); câmara de secagem (6); compressor de ar (7); bomba peristáltica (8); reservatório de pasta (9); bocal de entrada de ar (10) e um sistema de aquisição de dados (11).....	42
Figura 3.2 – Detalhamento da câmara de secagem.....	43
Figura 3.3 - Bocal de entrada de ar do tipo Venturi: (a) Vista frontal com corte lateral, (b) vista frontal com corte transversal, (c) vista frontal sem corte e (d) dimensões do bocal.....	44
Figura 3.4 - Bocal de entrada de ar do tipo tubo reto: (a) Vista frontal com corte lateral, (b) vista frontal com corte transversal, (c) vista frontal sem corte e (d) dimensões do bocal.....	45
Figura 3.5 - Conexão entre o bocal de entrada de ar e a base cônica inferior do leito: (a) bocal do tipo Venturi e (b) bocal do tipo tubo reto.....	46
Figura 4.1 - Queda de pressão no leito de jorro vazio em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	54
Figura 4.2 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada: (a) 1,50 kg de material inerte, (b) 3,00 kg de material inerte e (c) 4,50 kg de material inerte.....	56
Figura 4.3 – Valores médios de velocidade mínima de jorro em função da massa de material inerte.....	57
Figura 4.4 – Massa de material inerte e suas respectivas alturas de leito estático.....	58
Figura 4.5 – Dados experimentais e previstos pelas correlações para a velocidade mínima de jorro.....	59
Figura 4.6 – Valores médios de queda de pressão máxima em função da massa de material inerte.....	61
Figura 4.7 – Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão máxima do leito.....	62
Figura 4.8 - Queda de pressão de jorro estável em função da massa de material inerte.	63
Figura 4.9 - Dados experimentais e previstos pelas correlações da literatura para a queda de pressão de jorro estável.....	65

Figura 4.10 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	65
Figura 4.11 - Velocidade mínima de jorro em função do ângulo de cone.....	67
Figura 4.12 - Altura de leito estático correspondente para cada ângulo de cone considerando uma massa fixa de material inerte: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	67
Figura 4.13 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a velocidade mínima de jorro.....	68
Figura 4.14 – Valores médios de queda de pressão máxima do leito em função do ângulo do cone.....	69
Figura 4.15 – Massa de material inerte e suas respectivas alturas de leito estático para cada ângulo de cone estudado: (a) leito cônico com ângulo de cone de 45°, (b) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 60° e (c) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 75°.....	70
Figura 4.16 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão máxima do leito.....	71
Figura 4.17 – Valores médios de queda de pressão de jorro estável em função do ângulo do cone.....	72
Figura 4.18 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão de jorro estável.....	73
Figura 4.19 - Queda de pressão no leito de jorro vazio em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	74
Figura 4.20 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	75
Figura 4.21 – Valores médios de velocidade mínima de jorro em função do ângulo do cone, para diferentes tipos de bocal de entrada de ar.....	77
Figura 4.22 – Esquema da distribuição de ar no interior do leito de jorro: (a) tubo reto e (b) Venturi.....	78

Figura 4.23 - Valores médios da queda de pressão máxima do leito em função do ângulo do cone para diferentes tipos de bocal de entrada de ar.....	79
Figura 4.24 – Valores médios de queda de pressão de jorro estável em função do ângulo do cone.....	81
Figura 4.25 - Vazão máxima de alimentação de água alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica.....	82
Figura 4.26 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo para evaporação de água: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	83
Figura 4.27 – Valores de umidade relativa em função do tempo para a evaporação de água.....	85
Figura 4.28: Valores de umidade absoluta em função do tempo para a evaporação de água.....	86
Figura 4.29 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro.....	88
Figura 4.30 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo para 4,50 kg de material inerte, 100°C e $1,30u_{mj}$: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	89
Figura 4.31 – Configurações de leito utilizadas para a secagem do leite desnatado: (a) leito cônico com ângulo de cone de 45°, (b) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 60° e (c) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 75°.....	91
Figura 4.32 - Valores de umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado.....	95
Figura 4.33 - Dados de umidade Absoluta do leito de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado.....	97
Figura 4.34 - Dados de umidade do leite desnatado em pó em função do tempo.....	97
Figura 4.35 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica.....	98
Figura 4.36 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.....	100

- Figura 4.37 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica..... 102
- Figura 4.38 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo, parametrizado na vazão de alimentação de leite desnatado: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75° 102
- Figura 4.39 – Configuração do bocal de entrada de ar: (a) Venturi e (b) tubo reto..... 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Configurações do leito de jorro empregadas nos testes em branco à 100°C.....	48
Tabela 3.2 - Condições operacionais empregadas na caracterização fluidodinâmica do leito de jorro com partículas inertes.....	49
Tabela 3.3 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de evaporação de água.....	50
Tabela 3.4 - Condições operacionais empregadas na secagem do leite desnatado.....	52
Tabela 4.1 - Ajuste dos dados obtidos por meio dos testes em branco.....	55
Tabela 4.2 - Correlações para previsão dos dados valores de velocidade mínima de jorro em leitos cônicos.....	58
Tabela 4.3 - Limites de aplicação das correlações para previsão dos valores de u_{mj}	60
Tabela 4.4 - Correlações da literatura para previsão dos dados valores de queda de pressão máxima do leito em leitos cônicos.....	62
Tabela 4.5 - Correlações para previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável.....	64
Tabela 4.6 - Ajuste dos dados obtidos por meio dos testes em branco.....	75

NOMENCLATURA

Símbolos

a	Coefficiente de ajuste	$[MT^{-1}]$
A	Área	$[L^2]$
Ar	Número de Archimedes	$[-]$
b	Coefficiente de ajuste	$[T^{-1}]$
c	Parâmetro adimensional	$[-]$
d_p	Diâmetro da partícula inerte	$[L]$
D_0	Diâmetro do bocal de entrada de ar	$[L]$
D_c	Diâmetro da coluna do leito de jorro	$[L]$
D_i	Diâmetro de entrada da base cônica inferior	$[L]$
D_H	Diâmetro do leito na altura de estático	$[L]$
D_s	Diâmetro do jorro	$[L]$
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-1}]$
H_B	Altura da base cônica	$[L]$
H_C	Altura da coluna cilíndrica do leito de jorro	$[L]$
H_m	Altura máxima de jorro estável	$[L]$
H_0	Altura de leito estático	$[L]$
m_a	Massa de água	$[M]$
m_p	Massa de partículas inertes	$[M]$
m_{as}	Massa da amostra seca	$[M]$
P	Pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{máx}$	Pressão máxima do leito de jorro	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_{mj}	Pressão do leito de jorro na condição de mínimo jorro	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_t	Pressão do leito de jorro no tempo	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{t=0}$	Pressão do leito de jorro no tempo zero	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$Q_{água}$	Vazão de alimentação de água	$[L^3T^{-1}]$
$Q_{máx_água}$	Vazão máxima de alimentação de água	$[L^3T^{-1}]$
$Q_{máx_leite}$	Vazão máxima de alimentação de leite desnatado	$[L^3T^{-1}]$
Re_{mj}	Número de Reynolds para a u_{mj} baseado em D_i	$[-]$

t	Tempo	[T]
T	Temperatura do ar de entrada	[θ]
u	Velocidade do ar de entrada do leito de jorro	[LT ⁻¹]
U	Umidade em base úmida	[-]
u_{mj}	Velocidade do ar de entrada do leito na condição de jorro mínimo	[LT ⁻¹]
UA	Umidade absoluta com o tempo	[-]
UA_t	Umidade absoluta no tempo	[-]
$UA_{t=0}$	Umidade absoluta no tempo zero	[-]
UR	Umidade relativa	[-]
UR_t	Umidade relativa no tempo	[-]
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	[-]

Símbolos Gregos

Δ	Diferença	[-]
θ	Ângulo de base cônica	[°]
ε	Porosidade	[-]
ρ	Densidade do fluido	[ML ⁻³]
ρ_p	Densidade da partícula inerte	[ML ⁻³]
ρ_s	Densidade do sólidos	[ML ⁻³]
μ	Viscosidade do fluido	[L ² T ⁻¹]

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	xi
NOMENCLATURA.....	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	16
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Generalidades do Leito de Jorro.....	18
2.2 Aspectos Fluidodinâmicos.....	20
2.3 Fatores que Afetam a Fluidodinâmica do Leito de Jorro.....	22
2.3.1 Influência da Altura de Leito Estático.....	22
2.3.2 Influência do Ângulo de Base Cônica.....	24
2.3.3 Influência do Bocal de Entrada de Ar.....	30
2.4 Secagem de Pastas.....	33
2.4.1 Descrição e Análise do Processo de Secagem.....	33
2.4.2 Influência da Pasta no processo de Secagem.....	35
2.4.3 Influência das Condições Operacionais e Características Geométricas do Leito.....	38
2.5 Comentários Finais.....	40
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 Unidade Experimental.....	42

3.2 Procedimento Experimental.....	47
3.2.1 Caracterização Fluidodinâmica da Unidade Experimental.....	47
3.2.1.1 Teste em “Branco”.....	47
3.2.1.2 Caracterização Fluidodinâmica do Leito com Partículas Inertes.....	48
3.2.2 Secagem.....	50
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
4.1 Caracterização Fluidodinâmica do Leito de Jorro.....	53
4.1.1 Teste em “Branco”.....	53
4.1.2 Fluidodinâmica do Leito com Partículas Inertes.....	55
4.1.2.1 Influência da Massa de Material Inerte.....	55
4.1.2.2 Influência do Ângulo de Base Cônica.....	65
4.1.2.3 Influência da Geometria do Bocal de Entrada de Ar.....	73
4.2 Evaporação de Água.....	81
4.3 Secagem de Leite Desnatado.....	87
4.3.1 Influência do ângulo de Base Cônica.....	87
4.3.1.1 Massa Fixa de Material Inerte.....	87
4.3.1.2 Altura Fixa de Leito Estático.....	98
4.3.2 Influência da Geometria do Bocal de Entrada de Ar.....	101
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES DA TESE.....	105
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
REFERÊNCIAS.....	109

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde a sua descoberta em 1954, o leito de jorro tem se tornado uma alternativa bastante promissora para a secagem de pastas, devido ao seu baixo custo operacional e por proporcionar altas taxas de transferência de calor e massa, o que possibilita maior eficiência em sua operação e menores custos operacionais. Isto se deve a uma característica intrínseca deste secador, que é o elevado grau de mistura entre o gás e as partículas no interior do leito devido a um movimento cíclico e uniforme das partículas.

A aplicação em escala industrial para a secagem de pastas, no entanto, ainda apresenta algumas restrições, como dificuldade de ampliação de escala e, sobretudo, por não ser possível prever ainda a capacidade de secagem do leito para um determinado tipo de pasta, visto que as características do material a ser seco exercem efeito expressivo no desempenho do processo.

A complexidade dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem de pastas em leito de jorro não se deve apenas às características da pasta, mas também as diferentes variáveis de operação envolvidas no processo, como por exemplo, características geométricas do leito. Devido a isso, a literatura apresenta diversas pesquisas que avaliam o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro seco para diferentes ângulos de cone, geometria de bocal de entrada de ar, altura de leito estático, temperatura e velocidade do ar de entrada. Por outro lado, outras pesquisas avaliam o efeito das características da pasta empregada no processo. Neste caso, existe ainda uma escassez de informações no que se refere ao efeito das características geométricas do leito e demais condições de operação na secagem de pastas em leito de jorro, visto que em sua maioria os estudos que utilizam leitões úmidos empregam geometria fixa de leito.

Diante do contexto apresentado, é clara a necessidade de se obter informações mais precisas sobre este assunto, nas quais a secagem de uma determinada pasta possa ser avaliada para diferentes condições operacionais e geometrias distintas de leito.

O Centro de Secagem de Pastas e Suspensões do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos - CS/DEQ/ UFSCar é referência no que diz respeito à secagem de pastas em leito de jorro. Atualmente, pesquisadores do Centro de Secagem têm se dedicado à análise do efeito da composição química da pasta na secagem em leito de jorro, entre os quais podem ser citados os trabalhos de Rodrigues (1993), Almeida (2009) e Nascimento (2013). O presente trabalho tem como objetivo dar continuidade aos estudos desenvolvidos pelo Centro de Secagem, entretanto apresentando um enfoque um pouco diferente, na qual além de avaliar o efeito da pasta durante o processo de secagem, também são avaliados o efeito das condições de operação e características geométricas do equipamento.

A fim de atingir os objetivos propostos neste trabalho, realizou-se uma pesquisa bibliográfica e experimental onde foi analisado o efeito da massa de material inerte, da altura de leito estático, do ângulo do cone e da geometria do bocal de entrada de ar tanto na fluidodinâmica quanto na secagem de pastas em leito de jorro. Esta tese foi apresentada em cinco capítulos principais.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão concisa sobre os efeitos das condições operacionais e das características geométricas do leito na fluidodinâmica e na secagem de pastas em leito de jorro.

O Capítulo 3 traz uma descrição detalhada do equipamento e dos materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, bem como da metodologia empregada nos ensaios de caracterização da unidade experimental e na secagem de pastas em leito de jorro.

O Capítulo 4 mostra uma análise dos principais resultados referentes ao efeito da influência da massa de material inerte, altura de leito estático, ângulo de base cônica e geometria do bocal de entrada de ar tanto na caracterização da unidade experimental sem a presença de pasta, quanto na secagem de pastas em leito de jorro.

Finalmente, as principais conclusões obtidas neste trabalho são apresentadas nos Capítulos 5.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma síntese dos trabalhos mais relevantes disponíveis na literatura sobre a secagem de pastas em leito de jorro. Inicialmente, é realizada uma abordagem sobre as generalidades deste tipo de equipamento, na qual são apresentados os principais aspectos fluidodinâmicos, bem como os fatores que exercem efeito na velocidade mínima de jorro, queda de pressão, formação do canal do jorro, entre outros. Por fim, é apresentada uma revisão sobre os aspectos gerais da secagem de pastas, bem como a descrição e análise do processo de secagem e os principais fatores que interferem no desempenho do leito durante a secagem deste tipo de material.

2.1 Generalidades do Leito de Jorro

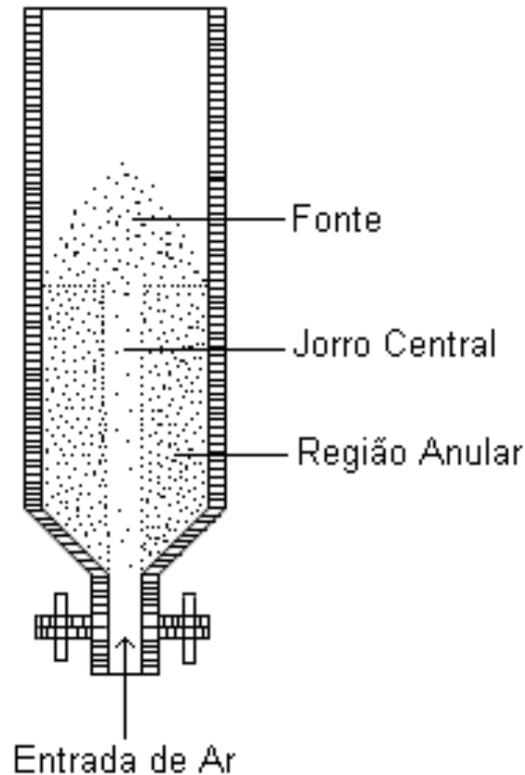
Desde a sua descoberta em 1954 por Gishler e Mathur durante a secagem de trigo em um leito fluidizado, o leito de jorro tem sido amplamente estudado e aplicado em diferentes processos industriais como, por exemplo, recobrimento de partículas (ROCHA, TARANTO e MORIS, 2009), reatores catalíticos (BILBAO et al., 1987), pirólise (MATHUR e EPSTEIN, 1974; OLAZAR et al., 2006; OLAZAR et al., 2008) e secagem de pastas e suspensões (ALMEIDA, 2009; NASCIMENTO, 2013).

De acordo com Rosa e Freire (2009), o principal interesse pela técnica do leito de jorro se deve ao fato deste sistema proporcionar um movimento cíclico e razoavelmente ordenado das partículas sólidas, o que proporciona ao leito um alto grau de contato entre fluido-partícula e favorecendo altas taxas de transferência de calor e massa.

O leito de jorro é composto basicamente por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica, sendo esta preenchida com uma determinada quantidade de sólidos que se comporta como um inerte no processo de secagem. O regime de jorro é caracterizado pelo movimento cíclico dos sólidos no interior da câmara de secagem devido à injeção ascendente

de ar por um orifício de entrada situado na extremidade inferior do leito. Este procedimento proporciona ao leito a formação de três regiões distintas: região de jorro, fonte e anular, conforme mostra a Figura 2.1.

Figura 2.1 - Diagrama esquemático de um leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

A região de jorro é caracterizada pela alta porosidade e pelo transporte pneumático dos sólidos até a superfície superior do leito. Na fonte, as partículas oriundas da região de jorro desaceleram e caem posteriormente na região anular, região na qual as partículas apresentam um movimento descendente, comportando-se como um leito deslizante (MATHUR E EPSTEIN, 1974). De acordo com Epstein e Grace (2011) bases cônicas são aplicadas a fim de reduzir a formação de zonas de sólidos mortas, que não são de interesse para muitos processos industriais, tais como mistura de sólidos, ativação de carvão vegetal e revestimento de partículas (HE, LIM e GRACE, 1992).

Apesar das diversas vantagens proporcionadas por este equipamento, a configuração convencional do leito de jorro ainda apresenta algumas limitações como a alta queda de pressão para o estabelecimento do regime de jorro estável, a existência de uma

altura máxima de jorro estável, o que restringe a capacidade do equipamento, vazão de gás controlada mais pela formação do jorro do que pelas trocas de calor e massa, e dificuldades de ampliação de escala, o que ainda restringe a sua aplicação em escala industrial (ROSA e FREIRE, 2009).

A fim de minimizar estas limitações operacionais, várias configurações de leito de jorro foram propostas por diversos pesquisadores, sendo as principais o leito de jorro com tubo “draft”, o leito de jorro “bidimensional”, o leito de jorro com aeração complementar, entre outras. Uma descrição mais detalhada sobre estas configurações de leito pode ser encontrada em Rosa e Freire (2009), Wang et al. (2006), Passos e Costa Jr., (2009), Altzibar et al. (2013) e Altzibar et al. (2014).

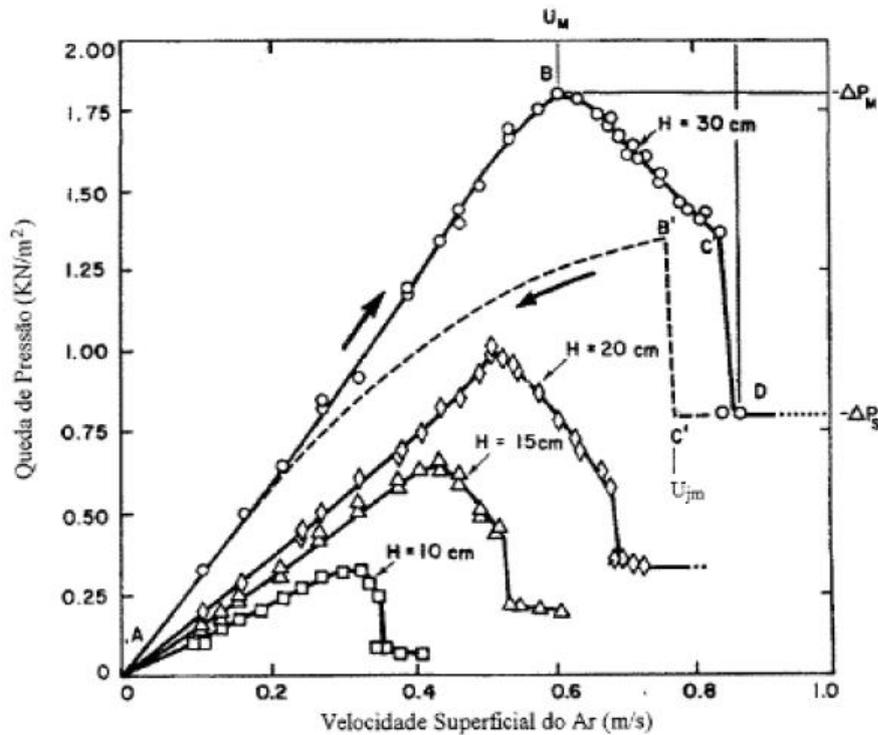
2.2 Aspectos Fluidodinâmicos

Segundo Marreto (2006), os parâmetros fluidodinâmicos de maior interesse no estudo do regime de jorro são a velocidade mínima de jorro, a altura de jorro estável e a queda de pressão do leito. Mathur e Epstein (1974) definiram a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , como sendo a velocidade mínima do ar necessária para que o regime de jorro se estabeleça. Os mesmos autores relataram ainda que u_{mj} é dependente tanto das propriedades físicas do fluido e das partículas sólidas, quanto das características geométricas do leito. A altura do leito de partículas, por sua vez, é um parâmetro importante no estudo do regime de jorro, visto que existe uma altura máxima de partículas a ser estabelecida no interior da câmara de secagem, acima da qual não é possível observar a ocorrência do regime de jorro. Esta altura é definida como altura máxima de jorro estável, H_m .

A queda de pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$ é de grande interesse para o projeto do secador, visto que fornece a energia necessária ao início da operação em regime de jorro. Já a queda de pressão de jorro estável, ΔP_{mj} , associada à velocidade mínima de jorro pode ser utilizada para a determinação da energia necessária para a operação neste processo (KACHAN, 1988).

Tanto a velocidade mínima de jorro, a queda de pressão de jorro estável quanto a queda de pressão máxima do leito podem ser obtidas por meio da curva característica fluidodinâmica do leito, conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974) (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Queda de pressão em função da velocidade do ar ($d_p = 3,6$ mm, $D_c = 15,20$ cm, $D_i = 1,27$ cm, $\theta = 60^\circ$).



Fonte: Mathur e Epstein (1974).

Conforme mostra a Figura 2.2, para baixas vazões de ar, o leito se comporta como um leito fixo, onde o ar simplesmente percola o leito de partículas sem perturbá-lo. A queda de pressão eleva-se linearmente com o aumento da vazão de ar ao longo do seguimento AB. O aumento da vazão do ar de entrada provoca a formação de uma cavidade no centro do leito, devido ao deslocamento das partículas para as extremidades.

As partículas situadas em volta da cavidade são comprimidas, proporcionando assim forte resistência ao escoamento de ar que, conseqüentemente, ocasiona um aumento da queda de pressão até atingir um patamar (ponto máximo, $\Delta P_{máx}$) no ponto B. A velocidade superficial neste ponto é denominada de velocidade de mínima fluidização, u_{mf} . A partir desse estágio, um aumento da vazão do ar de entrada faz com que a altura do canal de jorro seja maior do que a altura de sólidos compactados acima deste, e a queda de pressão diminui ao longo do segmento BC.

Quando o ponto C é alcançado, uma quantidade de partículas deslocadas do centro já é suficiente para promover uma expansão do leito. Um pequeno aumento da vazão de ar além deste ponto causa uma diminuição significativa da queda de pressão até o ponto D.

Neste momento, qualquer acréscimo da vazão de ar provoca uma elevação da altura da fonte, porém, a queda de pressão permanece praticamente constante.

Para o sentido inverso, o ponto C' da curva representa a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , que corresponde a menor velocidade do ar de entrada na qual é possível obter o jorro estável e a formação do regime de jorro. Uma pequena redução da vazão de ar nestas condições ocasiona o colapso do jorro e a queda de pressão eleva-se rapidamente até o ponto B', a partir desse ponto a queda de pressão decresce à medida que a vazão de ar é reduzida.

2.3 Fatores que Afetam a Fluidodinâmica do Leito de Jorro

De acordo com Mathur e Epstein (1974) a obtenção do jorro estável é influenciada pelas propriedades das partículas, bem como pelas características geométricas do leito, como o ângulo do cone e a relação entre o diâmetro da coluna cilíndrica e o diâmetro de entrada de ar. Souza (2003) relatou que além das características geométricas do leito e dos inertes, a estabilidade do regime de jorro também sofre efeito de outros fatores, como por exemplo, a altura de leito estático. Diante disso, é apresentada a seguir uma revisão dos trabalhos encontrados na literatura que dizem respeito ao efeito destes fatores no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro sem a presença de pasta.

2.3.1 Influência da Altura de Leito Estático

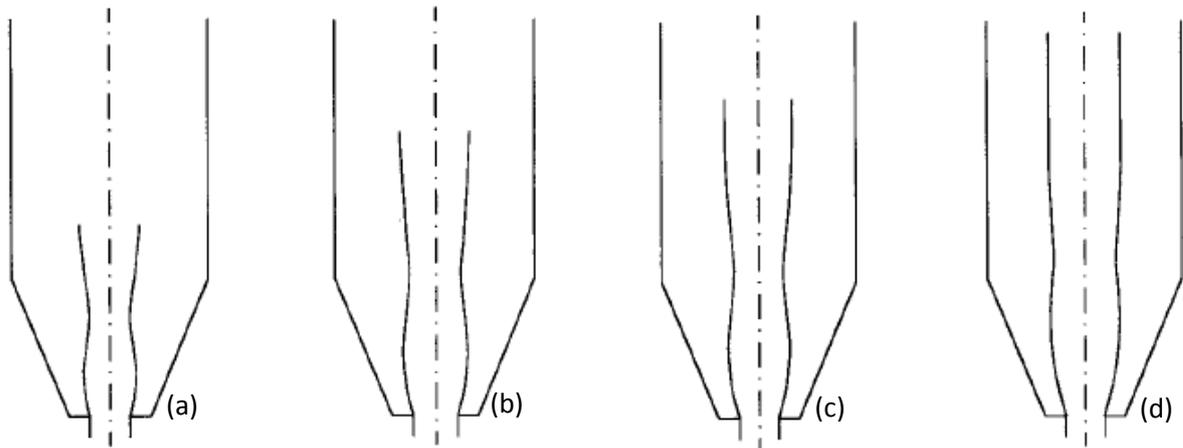
Altzibar et al. (2014) realizaram um estudo do efeito da altura de leito estático, H_0 , nos valores de queda de pressão de jorro estável, ΔP_{mj} , e pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$, para um leito de jorro convencional e com duas configurações de tubo draft. Os autores verificaram que os valores de ΔP_{mj} elevaram-se quase que linearmente com o aumento da altura de leito estático para todas as configurações de leito estudadas (leito de jorro convencional, com tubo draft e com tubo draft aberto nas laterais). Comportamento similar também foi observado por Rodrigues (1993), Zhong et al. (2011) e Qin et al. (2012). De acordo com estes autores, isto ocorreu devido a um aumento da altura de leito estático que aumenta a resistência ao escoamento de ar, o que conseqüentemente elevou os valores de ΔP_{mj} . Para a queda de pressão máxima do leito também foi observado um aumento quase que linear com o aumento da altura de leito estático para todas as configurações de leito utilizadas.

Os autores atribuíram a este comportamento o fato de que com o aumento de H_0 foi necessário uma maior pressão para o rompimento do leito de partículas e formação do canal de jorro. Resultados semelhantes foram relatados por Rodrigues (1993), Wang et al. (2004), Salam and Bhattacharya (2006), Altzibar et al. (2009), Bi (2011), Zhong et al. (2011) e Altzibar et al. (2014).

Olazar et al. (1992) mostraram em seu estudo que a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , em leitos cônicos, é aproximadamente proporcional à altura de leito estático. Altzibar et al. (2013) atribuíram a este comportamento o fato de que uma altura de leito estático maior representa uma maior quantidade de material inerte e, conseqüentemente, uma maior velocidade do ar é necessária para formar o jorro. Rodrigues (1993), Wang et al. (2004), Salam e Bhattacharya (2006) e Qin et al. (2012) também apresentaram resultados semelhantes.

San José et al. (2001) relataram em seu estudo que a geometria do canal de jorro é dependente da altura de leito estático. Conforme mostra a Figura 2.3, à medida que a altura de leito de partículas é aumentada, o canal do jorro torna-se mais amplo e a região afunilada se localiza em uma região mais alta do canal de jorro.

Figura 2.3 - Efeito da altura de leito estático na geometria do jorro. (a) $H_0 = 0,15\text{m}$, (b) $H_0 = 0,20\text{m}$, (c) $H_0 = 0,25\text{m}$ e (d) $H_0 = 0,30\text{m}$.

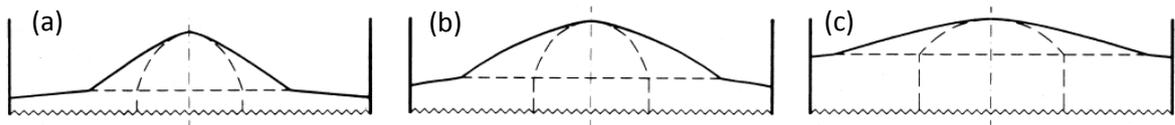


Fonte: San José et al. (2001).

De acordo com Olazar et al. (2004) a altura de leito estático, H_0 , também exerceu efeito significativo na geometria e na amplitude da fonte. Os resultados mostraram que a região de fonte tornou-se mais plana com o aumento de H_0 de 0,15 para 0,30 m, isto é, a

fonte reduz de altura. Os autores verificaram ainda que a amplitude da fonte elevou-se a medida que H_0 aumentou. A Figura 2.4 mostra o efeito da altura de leito estático na geometria da fonte.

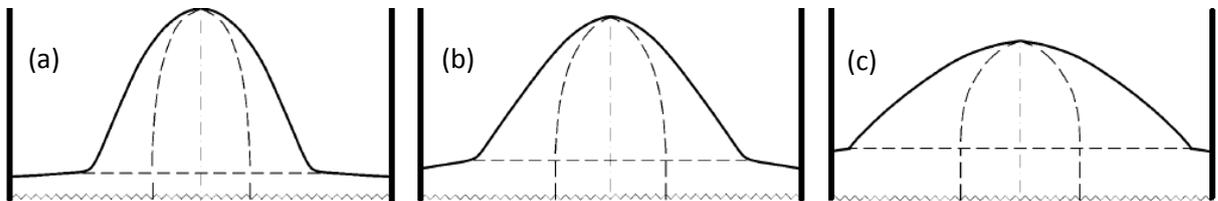
Figura 2.4 - Efeito da altura de leito estático na geometria fonte. (a) $H_0 = 0,15\text{m}$, (b) $H_0 = 0,20\text{m}$ e (c) $H_0 = 0,30\text{m}$.



Fonte: Olazar et al. (2004).

San José et al. (2008) também constataram que a fonte torna-se menor e mais ampla a medida que eleva-se a altura de leito estático, conforme mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Efeito da altura de leito estático na geometria fonte para ângulo de cone de 45° . (a) $H_0 = 0,15\text{m}$, (b) $H_0 = 0,20\text{m}$ e (c) $H_0 = 0,30\text{m}$.



Fonte: San José et al. (2008).

2.3.2 Influência do Ângulo de Base Cônica

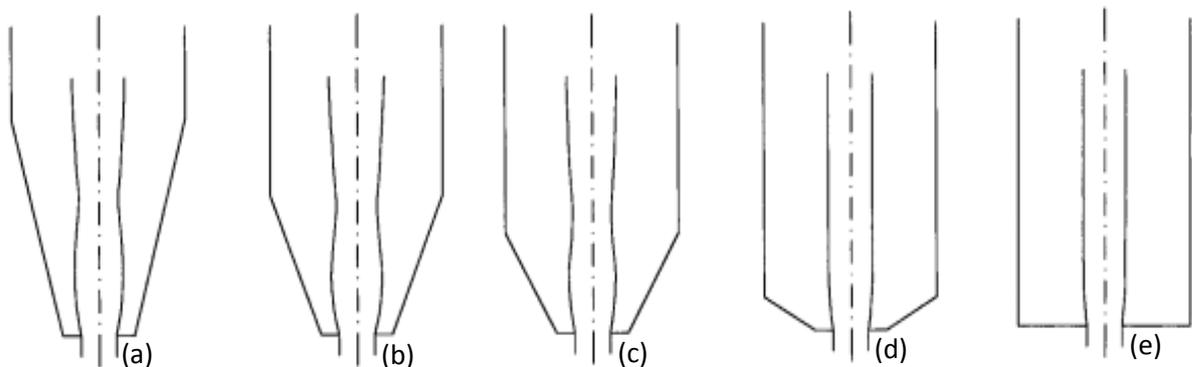
Segundo Olazar et al. (1992) existe um limite máximo e mínimo de ângulo de cone para cada configuração de leito existente. Para um leito de jorro de configuração cônica, o limite inferior de ângulo de cone é de 28° , tendo em vista que ângulos de cone muito pequenos causam instabilidades no leito. Já o limite superior não possui restrições. No caso de um leito de jorro operando em regime “jet”, os ângulos de cone utilizados devem estar entre 28° e 45° . O procedimental experimental adotado por estes autores mostrou que ângulos de cone inferiores a 28° não proporcionaram ao leito o movimento cíclico dos sólidos, característico do regime de jorro. Foi verificado ainda que ângulos de cone maiores do que os

impostos pelos autores provocaram instabilidades no leito devido a um fenômeno de rotação na circulação do gás.

Lim e Grace (1987) estudaram a fluidodinâmica de um leito de jorro com base plana. Estes autores verificaram a formação de zonas mortas de sólidos na base do leito. As zonas mortas apresentavam inclinação em torno de 62° em relação à horizontal próxima ao orifício de entrada de ar na base do leito, sendo que esta angulação era reduzida em direção ao topo do leito. Foi verificado ainda que a inclinação destas regiões de estagnação foi dependente das características dos sólidos estudados. Comportamento semelhante também foi observado por Green e Bridgwater (1983), He, Lim e Grace (1992) e San José et al. (1996).

San José et al. (2001) mostraram em seu estudo que o ângulo de base cônica exerceu efeito expressivo na geometria do canal do jorro, conforme mostra a Figura 2.6. Os resultados mostraram que ângulos de cone entre 30° e 60° apresentam um afunilamento na região intermediária do jorro, que corresponde a aproximadamente 10 cm, independente do ângulo de cone utilizado. O diâmetro da região afunilada foi cerca de 10% maior do que o diâmetro de entrada do leito, D_0 . O canal de jorro com maior diâmetro de abertura, D_s , foi verificado para o ângulo de 45° . Já os ângulos de cone de 120° e 180° , apresentaram diâmetro de abertura na entrada do canal do jorro menor do que para os demais ângulos e o afunilamento não foi verificado quando utilizada altura de leito estático, H_0 , de 20 cm. Para valores de H_0 inferiores a 20 cm estes ângulos também apresentam uma região afunilada, porém muito menor do que a observada para os ângulos de 30° , 45° e 60° .

Figura 2.6 - Efeito do ângulo de base cônica na geometria do jorro: (a) ângulo de cone de 30° , (b) ângulo de cone de 45° , (c) ângulo de cone de 60° , (d) ângulo de cone de 120° e (e) ângulo de cone de 180° .



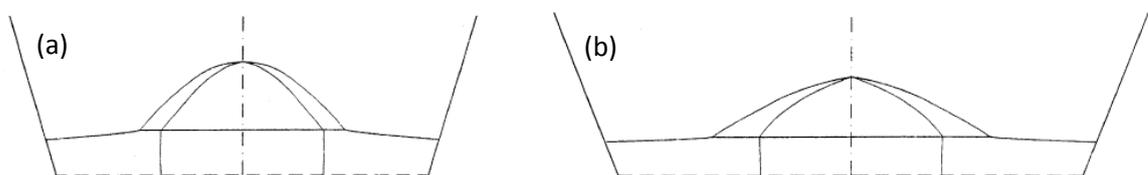
Fonte: San José et al. (2001).

San José et al. (2004) mostraram que o ângulo de base cônica também exerceu efeito significativo tanto na trajetória quanto no tempo de circulação das partículas no interior do leito. Foi constatado que para ângulos de cone de 120° , as partículas entram no jorro por uma grande extensão na parte inferior do leito e convergem para o eixo central. Para ângulos de cone de 45° , este comportamento foi verificado apenas para partículas que entram no jorro pela região afunilada. Estes resultados são consequência do efeito do ângulo de cone na posição do afunilamento do canal do jorro, na qual um aumento do ângulo do cone provoca o deslocamento da região afunilada para um nível mais alto do canal de jorro, enquanto que para ângulos acima de 120° esta região não foi observada. Os autores constataram ainda que, uma modificação no ângulo de cone de 30 para 120° elevou o tempo de circulação dos sólidos de 3,68 para 7,64s. Além disso, um aumento do ângulo de cone para 120° diminuiu ligeiramente a altura da fonte quando comparado com o ângulo de 45° . Enquanto que o efeito da amplitude da fonte na superfície superior da região anular é maior, o que significa que as partículas caem em uma pequena área na região anular.

Olazar et al. (2004) relataram em seu estudo que a amplitude da fonte diminuiu a medida que o ângulo de cone foi aumentado. Os resultados apresentados por estes autores também mostraram que um aumento do diâmetro de entrada de ar no leito elevou a altura da fonte e que o aumento do ângulo do cone atenuou este comportamento.

San José et al. (2005) constataram que o ângulo de cone exerceu pouco efeito sobre a altura da fonte, porém, foi verificado efeito expressivo na amplitude da mesma. A Figura 2.7 apresenta o efeito do ângulo de base cônica na geometria da fonte.

Figura 2.7 - Efeito do ângulo de base cônica na geometria da fonte: (a) ângulo de cone de 30° , (b) ângulo de cone de 45° .

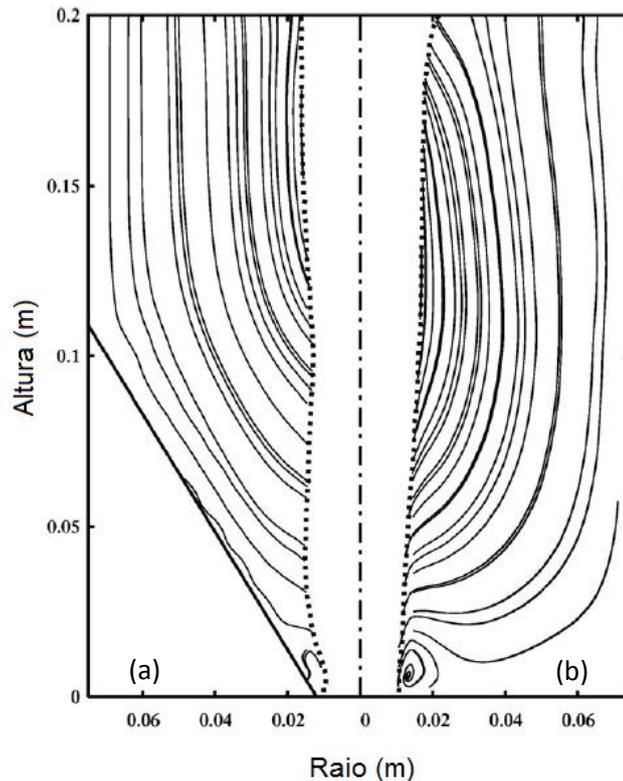


Fonte: San José et al. (2005).

Takeuchi et al. (2008) simularam as linhas de corrente em um leito com base reta e com base cônica com diferentes ângulos (Figura 2.8). Os autores verificaram que para uma base de leito reta, o gás inicialmente tende a se espalhar na direção radial. Já para uma

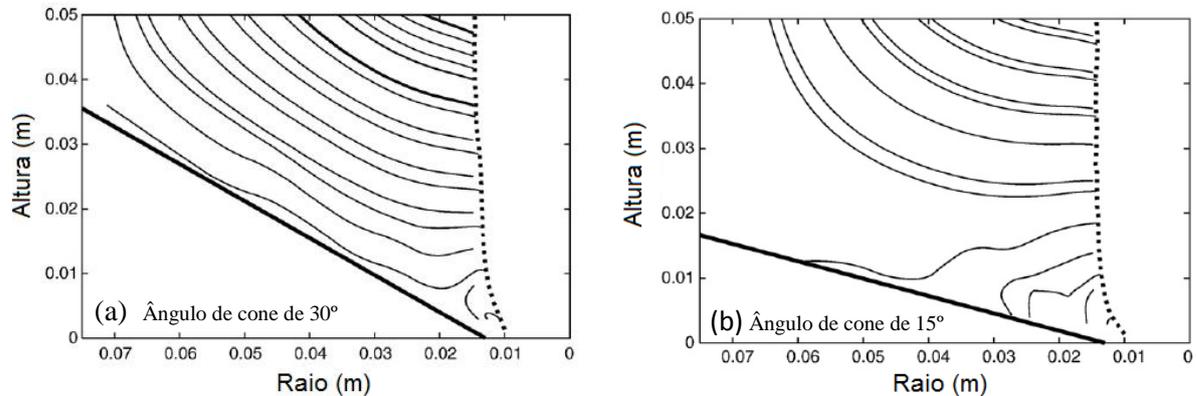
base de leito cônica, o gás flui ao longo da superfície cônica. Com o aumento da altura, o gás entre a parede vertical e o limite jorro-ânulo tende a fluir ao longo da direção axial para ambos os leitos. Na base reta, um vórtice foi observado na parte inferior do leito (Figura 2.8b). A direção de rotação do vórtice é a mesma que a da corrente de gás principal do jorro. Por outro lado, um fluxo reverso fraco foi observado na região inferior da base cônica (Figura 2.8a). A região de fluxo reverso torna-se mais clara e mais forte com o decréscimo do ângulo do cone. Para um ângulo de 30° (Figura 2.9a), foi observado um padrão de escoamento similar ao obtido para o ângulo de 60° , em que o gás na seção cônica flui ao longo da superfície cônica e as linhas de corrente são aproximadamente paralelas uma das outras. Linhas de corrente similares também foram observados utilizando ângulo de cone de 45° . Por outro lado, para ângulo de cone de 15° (Figura 2.9b) o desenvolvimento espacial das linhas de corrente de gás é semelhante ao apresentado pela base reta. Quando o gás flui a partir do jorro para a região anular, flui inicialmente quase que na direção horizontal. Em uma região mais distante do jorro, o fluxo do gás é praticamente na vertical. Além disso, uma região inversa de fluxo de gás de tamanho semelhante ao da base reta é formada.

Figura 2.8 - Linhas de corrente na região anular: (a) base cônica e (b) base plana.



Fonte: Takeuchi et al. (2008).

Figura 2.9 - Linhas de corrente na região anular: (a) ângulo de cone externo de 30° e (b) ângulo de cone externo de 15°.



Fonte: Takeuchi et al. (2008).

Rodrigues (1993) verificou visualmente em seu trabalho que apesar de terem sido obtidos valores de alimentação de água superiores quando era aumentado o ângulo do cone, a diminuição da inclinação da base cônica proporcionou ao leito uma maior circulação dos inertes para as mesmas condições operacionais.

Passos et al. (1997) relataram que ângulos de cone inferiores a 60° melhoram a aeração anular e a capacidade de secagem do leito de jorro.

Olazar, San José e Bilbao (2011) sugerem que ângulos de cone maiores do que 60° não devem ser utilizados, visto que a taxa de circulação dos sólidos é muito menor, especialmente para leitos com grande quantidades de partículas.

Rodrigues (1993) apresentou ainda em seu estudo que a queda de pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$, elevou-se com o aumento do ângulo do cone. O autor justificou este comportamento pelo fato de, que para uma dada altura fixa do leito de partículas, uma variação do ângulo do cone provocou um aumento de volume ocupado pelo leito no cone, aumentando assim a massa de material inerte, o que acarretou um aumento dos valores de $\Delta P_{máx}$. Por outro lado, Wang et al. (2004) não constataram efeito significativo do ângulo de cone nos valores da queda de pressão máxima do leito.

Bi (2011) apresenta uma análise das correlações fornecidas pela literatura para a previsão dos dados de queda de pressão máxima do leito. O autor verificou que a correlação proposta por Mukhlenov-Gorshtein (1965) prevê que os valores de $\Delta P_{máx}$ elevam-se com o aumento do ângulo do cone, θ , para uma dada altura de leito estático. Entretanto, resultados

opostos foram observados utilizando as correlações de Gelperin et al. (1961) e Olazar et al. (1993).

Altzibar et al. (2014), em seu estudo, verificaram que para leitos de jorro com duas configurações de tubo draft, os menores valores de $\Delta P_{máx}$ foram obtidos empregando o ângulo de cone intermediário, correspondente a 36° . Os valores mais elevados foram alcançados com o menor ângulo 28° e os valores intermediários obtidos para o maior ângulo de cone estudado por estes autores, 45° . Os autores relacionaram este comportamento com o efeito oposto entre o ângulo do cone e a altura de leito estático. Desta forma, para um ângulo de cone maior, a quantidade de sólidos é maior no leito, porém a parede da base cônica parcialmente adere o leito de partículas. Já, o ângulo de 36° estabelece um equilíbrio entre o efeito da quantidade de sólidos e o grau de inclinação do leito. Desta forma, os menores valores de $\Delta P_{máx}$ foram obtidos para o ângulo de 36° . Os autores relataram ainda que para a queda de pressão de jorro estável, o efeito do ângulo do cone nos valores de ΔP_{mj} foi dependente do sistema operacional e do tipo de material sólido empregado.

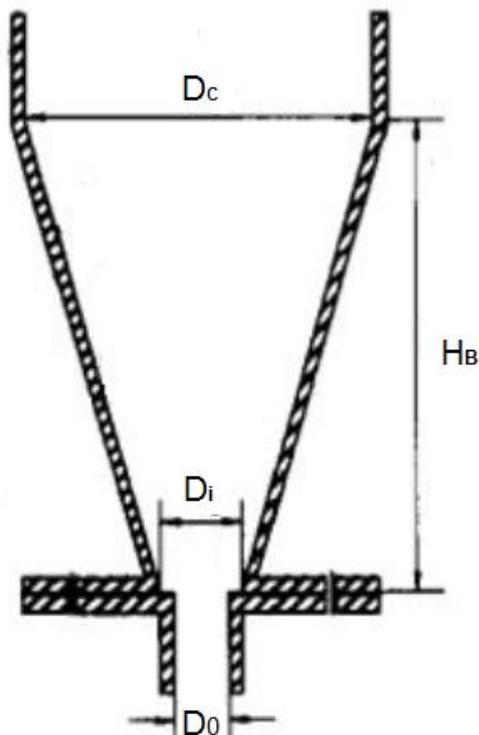
Apesar da grande quantidade de trabalhos fornecidos pela literatura, ainda não existe um consenso pela literatura dos efeitos que o ângulo de base cônica exerce na velocidade mínima de jorro, u_{mj} , para uma dada altura de leito de partículas. Altzibar et al. (2013) relataram que para leito de jorro com tubo draft aberto nas laterais e operando com partículas de areia, o ângulo de cone foi um fator com forte influência na velocidade mínima de jorro. Os autores constataram que os valores de u_{mj} foram menores para o ângulo de cone intermediário (36°), os valores mais elevados foram obtidos para o maior ângulo de cone (45°) e os valores intermediários alcançados para o menor ângulo de cone utilizado pelos autores (28°). Os autores mostraram que para uma mesma altura de leito estático, o ângulo de 45° necessita de uma quantidade maior de sólidos para o preenchimento do leito e, conseqüentemente, uma maior velocidade do ar foi necessária para romper o leito de partículas. Para o ângulo de 28° foi necessário uma quantidade de sólidos menor, porém, a parede da base cônica não adere parcialmente o leito de partículas. Desta forma uma alta velocidade do ar foi necessária para manter o jorro na condição mínima. O ângulo de cone de 36° estabelece um equilíbrio entre estes dois aspectos, sendo requerida uma menor velocidade do ar. Resultados opostos foram relatados por Rodrigues (1993), em que os valores de u_{mj} elevaram-se com o aumento do ângulo do cone. De acordo com Olazar, San José e Bilbao (2011) algumas correlações fornecidas pela literatura para predição dos valores de u_{mj} nem

utilizam o ângulo de cone, visto que os autores não verificaram nenhuma interferência de θ , ou utilizaram apenas uma configuração de base cônica em seu estudo.

2.3.3 Influência do Bocal de Entrada de Ar

Olazar et al. (1992) estudaram o efeito da geometria do bocal de entrada de ar na estabilidade do leito de jorro. Os autores estabeleceram que os limites máximos e mínimos para a razão entre o diâmetro do bocal de entrada de ar e o diâmetro de entrada da base cônica inferior (D_0/D_i) devem estar entre 0,50 e 0,83. O limite inferior foi estabelecido devido à queda de pressão e a constatação de zonas mortas no leito, o que é um problema agravante quando se trabalha com circulação de sólidos. Um regime de jorro instável foi observado quando foram utilizados valores de D_0/D_i acima dos valores impostos pelos autores. A Figura 2.10 apresenta o esquema da conexão entre o bocal entrada de ar e a base cônica inferior do leito utilizados por Olazar et al. (1992).

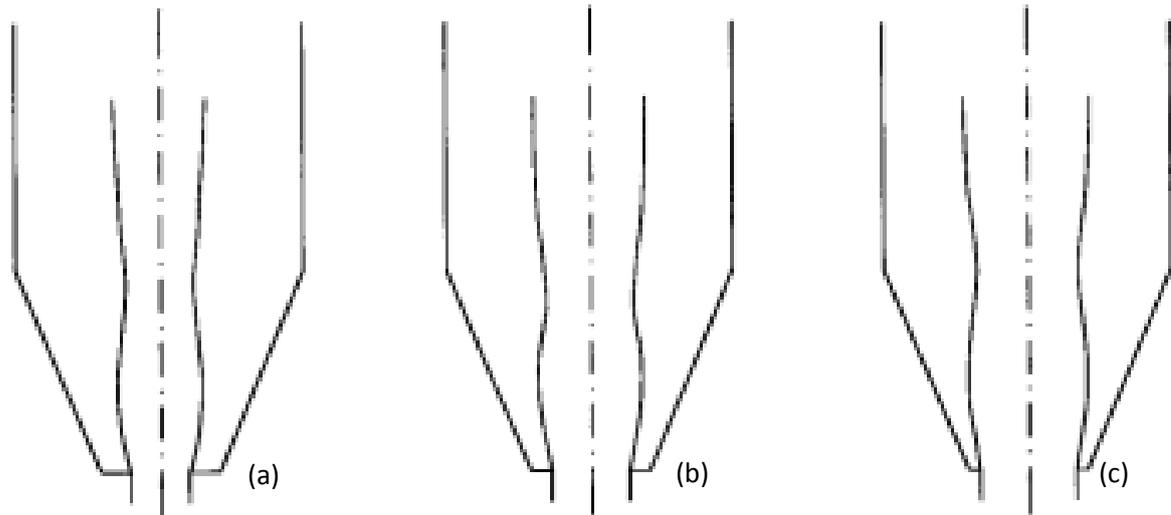
Figura 2.10 - Geometria do bocal de entrada de ar.



Fonte: Olazar et al. (1992).

San José et al. (2001) verificaram em seu estudo que a medida que o diâmetro do bocal de entrada de ar foi aumentado, o canal do jorro tornou-se mais amplo e a razão entre o diâmetro da região estreita e o diâmetro de entrada do canal do jorro foi menos pronunciada e localizou-se em um nível mais elevado, conforme mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Efeito do diâmetro de entrada de ar na geometria do jorro: (a) $D_0 = 3$ cm, (b) $D_0 = 4$ cm e (c) $D_0 = 5$ cm.

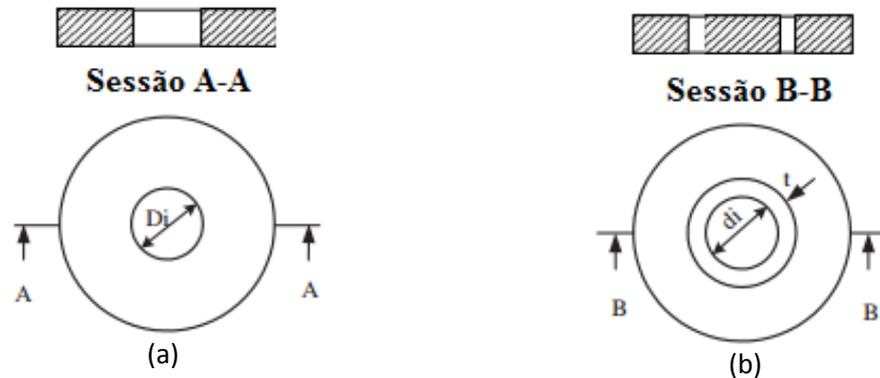


Fonte: San José et al. (2001).

Olazar et al. (2004) mostraram em seu estudo que o diâmetro do bocal de entrada de ar exerceu efeito significativo sobre a amplitude e geometria da fonte. Foi verificado que a amplitude da fonte diminuiu à medida que o diâmetro de entrada de ar foi reduzido e que o aumento do diâmetro de entrada de ar tornou a fonte com geometria mais plana.

Salam e Bhattacharya (2006) estudaram o efeito da configuração do bocal de entrada de ar no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro. Foram avaliadas duas configurações distintas, sendo um bocal com fluxo central de ar e um bocal com fenda circular, na qual era variado o diâmetro de entrada de ar, conforme mostra a Figura 2.12. Os resultados mostraram que para uma dada altura de leito estático e área de entrada de ar, a velocidade mínima de jorro foi maior para o bocal de entrada de ar com fenda circular (Figura 2.12b). Entretanto, os valores de velocidade mínima de jorro tendem a se igualar à medida que a altura de leito estático e a área de entrada de ar aumentam.

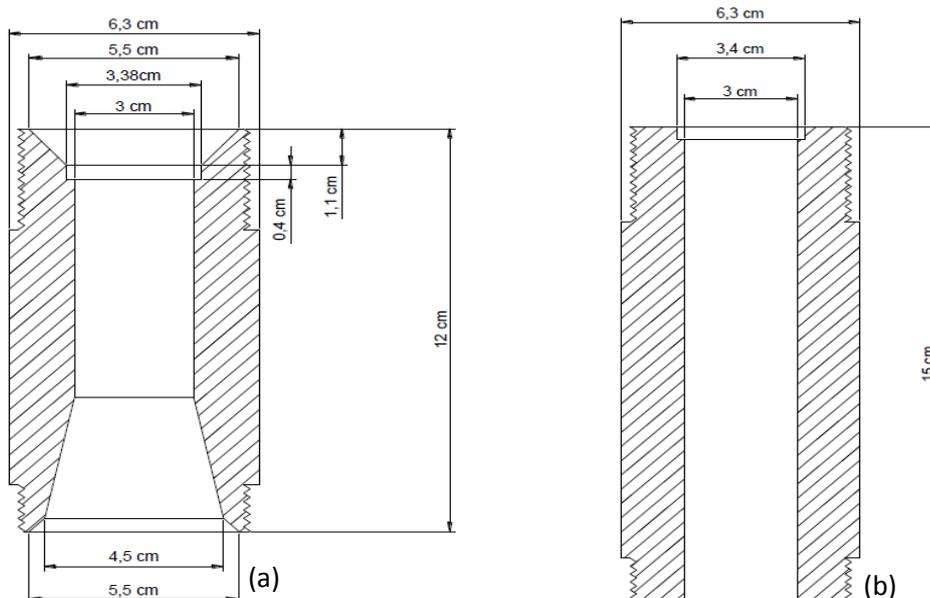
Figura 2.12 - Configuração da distribuição de escoamento de ar: (a) bocal de jato central e (b) bocal de fenda circular.



Fonte: Salam e Bhattacharya (2006).

Bitti (2012) investigou a influência da geometria do bocal de entrada de ar na fluidodinâmica do leito de jorro sem a presença de pasta, conforme apresenta a Figura 2.13. Os resultados revelaram que a velocidade mínima de jorro não sofreu forte interferência da geometria do bocal de entrada de ar. Entretanto, a queda de pressão do leito foi superior quando utilizado o bocal do tipo Venturi. O comportamento obtido foi relacionado com a distribuição de ar, visto que o bocal Venturi distribui uniformemente o ar na entrada do leito e o bocal tubo reto promove um jato central, o que conseqüentemente, provocou a diferença nos valores de queda de pressão.

Figura 2.13 - Dimensões do bocal de entrada de ar: (a) Venturi e (b) tubo reto.



Fonte: Bitti (2012).

2.4 Secagem de Pastas

Segundo Passos et al. (1997), as pastas são definidas como sendo um sistema sólido-líquido composto por partículas microscópicas ou coloidais dispersas em uma fase líquida. Atualmente a secagem deste tipo de material tem sido amplamente aplicada em diversos processos industriais, como por exemplo, indústrias alimentícias, farmacêuticas e químicas.

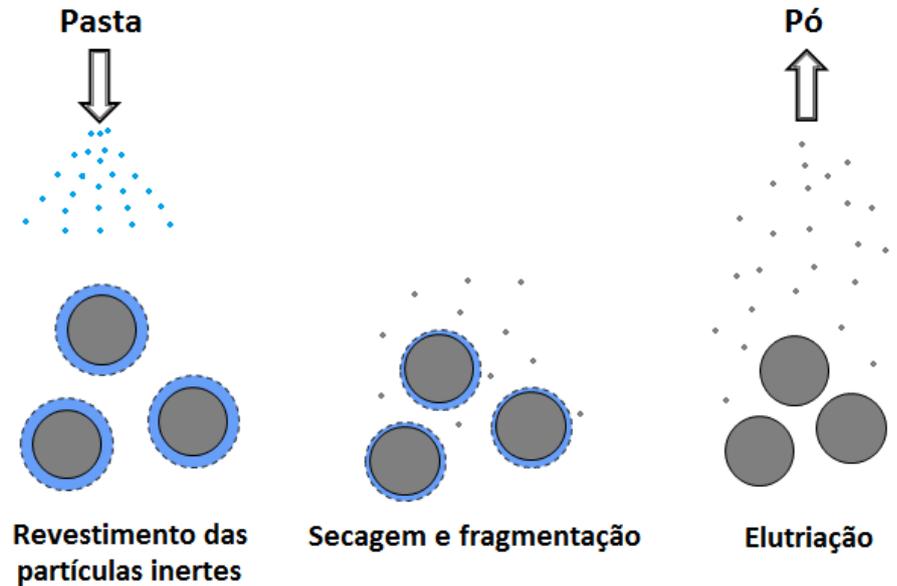
Dentre os equipamentos utilizados para a secagem de pastas, o leito de jorro destaca-se devido ao fato de favorecer a secagem de materiais termossensíveis (FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2009 e TEIXEIRA, 2013), proporcionar altas taxas de transferência de calor e massa, e por fornecer um produto final homogêneo, em consequência do melhor contato entre as fases (ROSA, 2010), melhorando assim a capacidade de secagem do leito. Entretanto, a secagem de pastas em leito de jorro é um processo complexo, que envolve diversas variáveis de operação, o que ainda desperta um grande interesse dos pesquisadores. A seguir é apresentada a descrição e análise do processo de secagem de pastas em leito de jorro, bem como os fatores mais influentes no processo.

2.4.1 Descrição e Análise do Processo de Secagem

O processo de secagem de pastas em leito de jorro consiste basicamente em alimentar a pasta no interior da câmara de secagem por meio de um atomizador, de forma que as partículas inertes já aquecidas no interior do leito sejam revestidas por uma fina película de pasta, conforme mostra a Figura 2.14.

Assim que a pasta adere à superfície das partículas inertes, a película passa a ser seca por meio do contato direto com a partícula inerte já aquecida (transferência de calor por condução) e pelo contato com o ar de secagem (transferência de calor por convecção), de acordo com a Figura 2.15. À medida que é seca, a película de pasta torna-se frágil e quebradiça devido à colisão entre as partículas e as paredes do leito e também devido as colisões entre partícula-partícula, fornecendo a energia necessária para fragmentar a película. O pó obtido é arrastado pelo ar de secagem e coletado geralmente com o auxílio de um ciclone acoplado à saída do secador.

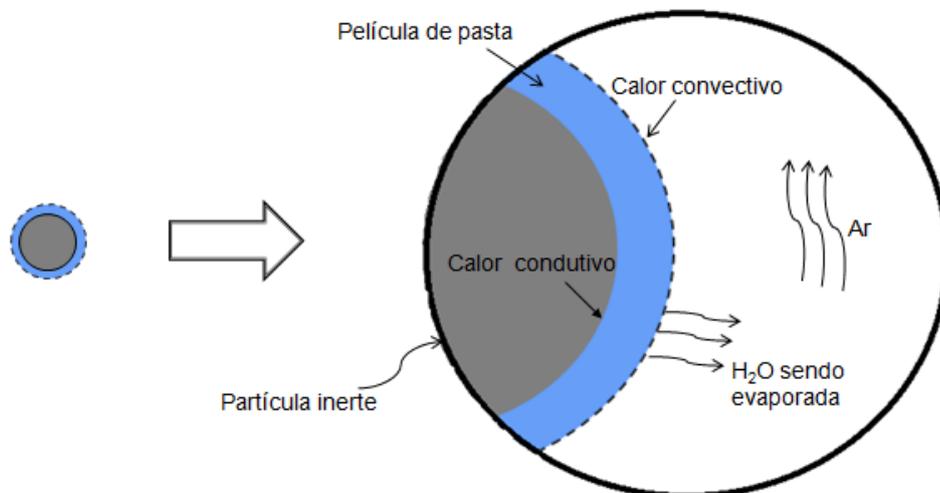
Figura 2.14 - Mecanismo do processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes.



Fonte: Adaptado de Grbavcic, Arsennijevic, Garic-Grulovc (2004).

De acordo com Mathur e Epstein (1974), o processo de deposição, secagem e fragmentação do filme ocorre continuamente, desde que a temperatura do ar de entrada para certa vazão de alimentação de pasta seja mantida em um nível suficientemente alto, de forma que a proporção de partículas molhadas, sob as condições de estado estacionário, seja pequena, e o movimento do leito não seja comprometido, ocasionando o colapso do leito pela aglomeração de partículas no interior da câmara de secagem.

Figura 2.15 - Mecanismos de transferência de calor e massa inerte-película-ar.



Fonte: Pessoal (2014).

Freire, Ferreira e Freire (2009) relataram que diferentemente da secagem de grãos, a secagem de pastas em leito de jorro ocorre principalmente à taxa constante, ou seja, a evaporação é a etapa limitante do processo de secagem, visto que as pastas possuem alto teor de umidade. Além disso, a película de pasta deve ser fina o suficiente para minimizar a etapa de difusão, o que aumentaria as resistências à transferência de massa. A velocidade de secagem e o número de colisões efetivas entre as partículas inertes devem ser suficientemente altos para que a taxa de remoção do filme não seja excedida pela taxa de recobrimento de pasta, caso contrário a quantidade de material úmido no leito será elevada e a circulação das partículas pode ser interrompida devido a sua aglomeração (BARRET e FANE, 1990). Estes autores mencionaram ainda que o número de colisões efetivas das partículas inertes é controlado pelos seguintes fatores:

- taxa de circulação das partículas inertes, que determina o tempo necessário para que os sólidos sejam novamente recobertos e também a energia de colisão, que por sua vez é afetada pela vazão de ar e altura de leito estático;
- razão entre massa de pasta e massa de partículas inertes, que é definida pela razão de alimentação de pasta e altura de leito estático e,
- taxa de secagem, visto que maiores taxas de secagem favorecem o aumento da friabilidade do filme.

A granulometria do produto final é dependente das características do equipamento empregado e, principalmente das características da pasta a ser seca (SPITZNER NETO, 2001).

2.4.2 Influência da Pasta no Processo de Secagem

Segundo Freire, Ferreira e Freire (2009), a presença da pasta no sistema fornece diversas complicações adicionais tanto para o estudo quanto para a operação de secagem em leito de jorro. Os mesmos autores relatam ainda que, por muito tempo, assumia-se por hipótese, que a fluidodinâmica do leito não se alterava com a presença da pasta. Pham (1983) realizou a secagem de sangue bovino em um leito de jorro e foi um dos primeiros a verificar o efeito significativo da pasta no comportamento fluidodinâmico do leito. Foi constatado que a presença da pasta ocasionava regiões estagnadas no leito e dificuldade de movimentação das partículas na região anular. Posteriormente, diversas pesquisas foram

realizadas com a finalidade de se obter um conhecimento mais detalhado sobre a influência da pasta durante a secagem em leito de jorro. Diante disso, apresenta-se a seguir os principais trabalhos encontrados na literatura que abordam este assunto.

Morris (1990) estudou a secagem de suspensão de levedura. Os resultados indicaram que as modificações das propriedades físicas do material pastoso durante o processo de secagem ocasionaram alguns problemas de operação como o colapso do leito, ocasionado pela aglomeração das partículas no interior da câmara de secagem.

Reyes e Massarani (1992) avaliaram a secagem de suspensão de alumina. Foi verificado que a presença da pasta elevou os valores da vazão mínima de jorro e que para a suspensão de alumina, este aumento foi mais acentuado quando comparado aos dados obtidos para a água pura. Os autores relataram que este comportamento é devido ao acúmulo de produto seco no interior do leito.

Rodrigues (1993) estudou a secagem de três materiais (água, suspensões de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e levedura) em um leito de jorro construído em aço inox com coluna cilíndrica de 40 cm de altura e 50 cm de diâmetro, base cônica com ângulos de 30, 45 e 60° e diâmetro do orifício de entrada do ar de 3,00 cm. A secagem das suspensões de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e levedura foram realizadas apenas para o leito de jorro com base cônica de 30°. Os resultados revelaram que a capacidade de secagem do leito de jorro utilizando suspensões de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e levedura foi em média 20 a 60% menores respectivamente, em relação à água pura. O autor atribuiu a este comportamento o fato de que a presença da pasta provocou um aumento da adesividade da mesma, causando assim uma diminuição nas vazões máximas de alimentação de pastas suportadas pelo leito. Foi verificado ainda, que durante a secagem das suspensões de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e levedura a queda de pressão foi cerca de 25% maior, quando comparada aos valores obtidos para o leito de jorro operando sem a presença da pasta. Isso porque, assim como observado por Morris (1990), as suspensões tornavam-se bastante pegajosas, ocasionando a aglomeração das partículas inertes no interior do leito e aumentando assim a resistência ao escoamento de ar.

Ramos (1997) citado por Medeiros (2001) estudou o efeito da presença do açúcar, teor de gordura, acidez e pH da polpa de frutas no desempenho da secagem em leito de jorro. O autor verificou que a presença de açúcar diminuiu a eficiência de coleta do pó, enquanto que para altos teores de gordura houve uma melhora no processo. Foi constatado ainda que o efeito da composição química da pasta ocorreu de forma combinada, visto que

para polpa de manga, o elevado valor de açúcar não comprometeu o comportamento fluidodinâmico do leito. Segundo o mesmo autor, este comportamento sugere que o efeito negativo da presença de açúcar foi anulado pelo alto teor de gordura presente na polpa de manga. Desta forma, os autores concluíram que a ausência de gordura e uma alta concentração de açúcar tendem a prejudicar o desempenho do leito durante a secagem de polpas de frutas.

Spitzner Neto (1997) estudou a secagem de sangue bovino com anticoagulante. O autor constatou que a presença da pasta no sistema ocasionou uma diminuição nos valores da queda de pressão, enquanto que os valores de velocidade mínima de jorro elevaram-se.

Medeiros (2001) estudou o efeito da composição química da pasta, correlacionada com as propriedades físicas das suspensões, na secagem de polpas de frutas tropicais em leito de jorro. Para isso, foi utilizado um leito de jorro com configuração cônico-cilíndrico, construído em aço inox com ângulo de cone de 60°, diâmetro da coluna cilíndrica de 18 cm, 90 cm de altura e diâmetro de entrada de 2,50 cm. Os resultados obtidos mostraram que a inserção de água no sistema operacional elevou a altura da fonte e diminuiu a concentração de partículas nesta mesma região. Foi constatado ainda que a eficiência de produção do pó foi muito baixa, devido a uma elevada retenção de sólidos e uma grande quantidade de material disperso ou aderido às paredes do equipamento. Além disso, a presença do açúcar causou efeitos negativos tanto na fluidodinâmica do leito, quanto na produção de pó. Entretanto, as parcelas de gordura, o amido e a pectina presentes nas pastas, favoreceram a fluidodinâmica do leito, a produção de pó e diminuíram a quantidade de material acumulado nas paredes do equipamento.

Souza (2009) realizou o estudo da secagem de misturas de polpas de frutas tropicais em um leito de jorro de configuração cônico-cilíndrico, construído em aço inox, com base cônica de 60°, diâmetro de entrada de 3 cm e altura do cone de 13 cm. Coluna cilíndrica com 18 cm de diâmetro e 72 cm de altura. Os resultados mostraram que a capacidade de produção do pó sofreu efeito dos diferentes tipos de gorduras utilizadas e que o processo de secagem foi favorecido com a adição de oleína ou gordura de palma em pó, amido e pectina.

Almeida (2009) analisou o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa da secagem de pasta em regime transiente, para duas configurações de leito (coluna cheia e meia coluna). O leito de jorro de coluna cheia foi construído em aço inox com coluna cilíndrica de 1,00 m de altura, diâmetro de 0,50 m e base cônica de 60°, altura de 0,50 m,

diâmetro do bocal de entrada de 0,03 m. Como pastas foram utilizadas água destilada, lodo de esgoto, leite desnatado, ovo integral de galinha homogeneizado e carbonato de cálcio. Os resultados mostraram que o tempo necessário para alcançar o regime permanente foi dependente da vazão de alimentação da pasta e das condições operacionais aplicadas como temperatura e velocidade do ar de entrada. Além disso, verificou-se que o regime de jorro sofreu alterações de acordo com o tipo de pasta, concentração e vazão de alimentação. A expressão proposta para descrever a taxa de secagem mostrou-se fortemente dependente da concentração e densidade da pasta utilizada. O meio leito, por sua vez, era composto por uma parede plana de vidro temperado de 10,00 mm, que dividia o leito ao meio no sentido longitudinal. As dimensões do leito em meia coluna foram as mesmas utilizadas para o leito de coluna cheia descrito anteriormente. Os resultados mostraram que a inserção de água como pasta padrão no interior do leito diminuiu a velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte. Entretanto, não foi verificada nenhuma alteração da velocidade das partículas na região anular. Além disso, a presença da água no sistema diminuiu a altura da fonte quando comparado ao leito seco.

Nascimento (2013) estudou o efeito da composição química das pastas durante o processo de secagem em leito de jorro sob diferentes condições operacionais. Para isso, foi utilizado um leito de jorro construído em aço inox com coluna cilíndrica de 1,00 m de altura e diâmetro de 0,50 m, base cônica de 60°, 0,50 m de altura e diâmetro do bocal de entrada de 0,03 m. Os ensaios de secagem foram conduzidos com água destilada, ovo homogeneizado, própolis, soro de leite doce, leite integral, desnatado, semidesnatado e de baixo teor de lactose. Foi constatado que a presença de açúcares e gorduras modificou o comportamento do leito de jorro, principalmente nos parâmetros de umidade relativa e queda pressão do leito. Segundo Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993) este comportamento está relacionado com as características colantes da pasta, o que provocam dificuldade de circulação dos inertes, acúmulo da pasta nas superfícies das partículas e, por consequência aumento dos valores da queda de pressão.

2.4.3 Influência das Condições Operacionais e Características Geométricas do Leito

Rodrigues (1993) estudou a evaporação de água em leito de jorro empregando três ângulos distintos de base cônica (30, 45 e 60°) e alturas distintas de leito estático (7, 17 e

27 cm). Os resultados obtidos por este autor mostram que a capacidade de evaporação de água do leito elevou-se com o aumento do ângulo do cone, considerando as demais variáveis operacionais constantes. De acordo com o autor, este resultado era esperado para um valor fixo de altura de leito estático, visto que o aumento do ângulo do cone representa um aumento da massa de material inerte no leito, e conseqüentemente uma elevação da área específica do leito. Assim como a evaporação ocorre na superfície dos inertes, um aumento desta área específica ocasiona uma elevação da vazão máxima de alimentação de água. Da mesma forma, foi verificado que uma elevação da altura de leito estático favoreceu a capacidade de evaporação do leito. A explicação para este fato dado pelo autor foi similar a utilizada para o aumento da evaporação de água devido ao aumento do ângulo de base cônica.

Almeida (2009) estudou também a secagem de pastas em leito de jorro para velocidades do ar de entrada de 15 e 30% acima da velocidade mínima de jorro para dois valores de temperaturas do ar de entrada de 80 e 100°C. Foi constatado que o tempo necessário para que o sistema atingisse o regime permanente foi dependente das condições operacionais empregadas e que a maior capacidade de evaporação de água do leito foi obtida quando utilizada menores valores de temperatura e velocidade do ar de entrada, o que mostrou que o aumento da velocidade do ar de entrada é mais canalizado para a o centro da região de jorro. O autor propôs ainda uma expressão para descrever a taxa de secagem e foi verificada uma forte dependência com a vazão de alimentação da pasta, da temperatura e da velocidade do ar de entrada.

Nascimento et al. (2012) avaliaram a influência das características das partículas inertes, da temperatura e velocidade do ar de entrada na secagem de pastas em leito de jorro. Para isso, foram utilizadas água destilada e leite desnatado. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que o tempo necessário para o sistema atingir o regime permanente foi dependente das condições operacionais, sendo menor quando utilizados valores mais elevados de temperatura e velocidade do ar de entrada. Com relação ao efeito das partículas inertes, verificou-se que foi necessário um maior tempo para o sistema atingir o regime permanente quando foram utilizadas partículas de polietileno do que para as esferas de vidro. Os autores relataram que este comportamento está relacionado com a taxa de circulação dos inertes e com a área de troca para que os fenômenos de transferência ocorram, sendo estes dois parâmetros menores para as partículas de polietileno. Foi constatado ainda que a capacidade de evaporação de água no leito foi a mesma para as partículas de polietileno e

esferas de vidro, o que sugere que o leito não percebeu a diferença da intensidade de circulação das partículas, bem como o aumento da área de troca proporcionada pelas esferas de vidro. Entretanto, para a secagem do leite desnatado, comportamento semelhante foi observado apenas para o menor valor de temperatura e velocidade do ar de entrada. Para as demais condições operacionais a maior capacidade de secagem do leito foi obtida, como esperado, para o leito com esferas de vidro. Já para o adimensional da queda de pressão, a característica do material inerte não exerceu efeito significativo, em termos qualitativos.

Bitti (2012) estudou o efeito das condições operacionais na capacidade de evaporação de água em um leito de jorro construído em aço inox com coluna cilíndrica de 120 cm de altura, 30 cm de diâmetro, base cônica de 60° e 23 cm de altura. Foram utilizadas ainda duas geometrias distintas de bocal de entrada de ar, diferentes valores de massa de material inerte, temperatura e vazão do ar de entrada. As informações obtidas revelaram que a geometria do bocal de entrada de ar não apresentou forte efeito sobre a vazão máxima de alimentação de água do leito, visto que a capacidade máxima de evaporação de água foi a mesma para ambas as configurações de bocal de entrada de ar utilizadas. Referindo-se às demais condições de operação, verificou-se que a capacidade de evaporação de água elevou-se com o aumento da massa de material inerte, temperatura e velocidade do ar de entrada.

2.5 Comentários Finais

Com base na revisão bibliográfica apresentada, constatou-se que a fluidodinâmica do leito de jorro sem a presença de pasta é fortemente influenciada pelas condições operacionais e características geométricas do leito e das partículas inertes empregadas. Da mesma forma, a secagem de pasta em leito de jorro é um processo complexo que envolve diversas variáveis operacionais. Entretanto, ainda existe uma escassez de dados na literatura, visto que as pesquisas em geral avaliam as características geométricas do equipamento apenas para a fluidodinâmica sem a presença de pasta, e quando abordam a secagem de pastas avaliam na grande maioria as características da pasta para geometria fixa de leito. O Quadro 2.1 apresenta o resumo dos trabalhos fornecidos pela literatura sobre a fluidodinâmica e secagem de pastas em leito de jorro.

Quadro 2.1 - Resumo dos trabalhos fornecidos na literatura sobre a fluidodinâmica e secagem de pastas em leito de jorro.

Autor	inerte	pasta	T	θ	u/u_{mj}	H_0	bocal	Tubo draft
Olazar et al. (1992)	<i>x</i>			<i>x</i>		<i>x</i>	<i>x</i>	
Rodrigues (1993)		<i>x</i>		<i>x</i>		<i>x</i>		
Medeiros (2001)		<i>x</i>						
Olazar et al. (2004)	<i>x</i>			<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	
San José et al. (2004)	<i>x</i>			<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	
Wang et al. (2004)				<i>x</i>		<i>x</i>	<i>x</i>	
Salam e Bhattacharya (2006)	<i>x</i>					<i>x</i>	<i>x</i>	
Souza (2009)		<i>x</i>						
Almeida (2009)		<i>x</i>	<i>x</i>		<i>x</i>			
Nascimento (2013)		<i>x</i>	<i>x</i>		<i>x</i>			
Altzibar et al. (2013)	<i>x</i>			<i>x</i>		<i>x</i>		<i>x</i>
Altzibar et al. (2014)	<i>x</i>			<i>x</i>		<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>

Fonte: Pessoal (2014).

Em que T corresponde a temperatura do ar de entrada, θ o ângulo de base cônica, u/u_{mj} a razão entre a velocidade do ar de entrada e a velocidade mínima de jorro e H_0 a altura de leito estático.

Com base na revisão bibliográfica apresentada, verificou-se a necessidade de realizar um estudo mais amplo, o qual relacione a secagem de pastas para diferentes configurações de leito e condições operacionais, o que possibilitará a obtenção de informações essenciais para uma maior compreensão e análise do processo de secagem de pastas em leito de jorro.

CAPÍTULO 3

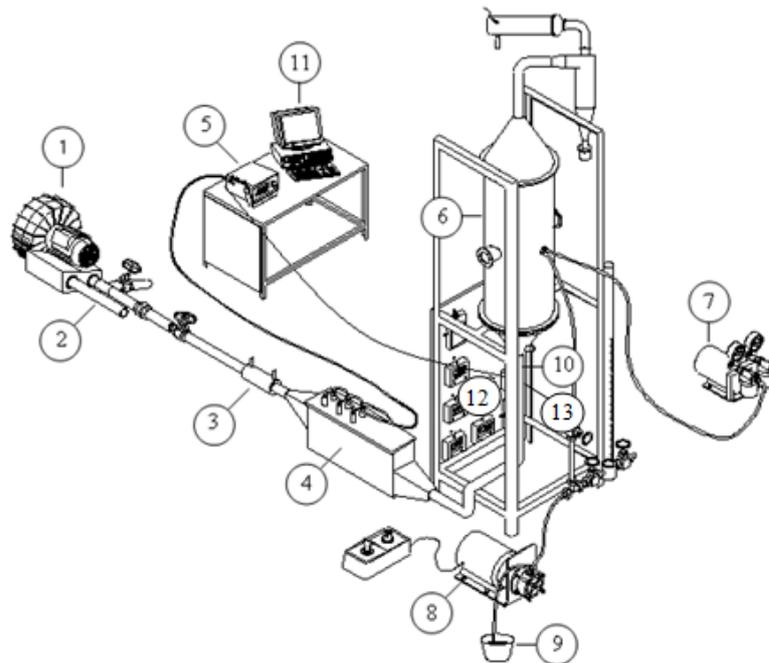
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o detalhamento da unidade experimental utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como a descrição dos materiais e procedimentos experimentais adotados.

3.1 Unidade Experimental

O procedimento experimental foi conduzido em uma unidade de secagem localizada no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos – CS/DEQ/UFSCar, cujas especificações são mostradas na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Esquema da unidade experimental: soprador (1); sistema by pass (2); medidor de vazão tipo Venturi (3); trocador de calor (4); controlador de temperatura (5); câmara de secagem (6); compressor de ar (7); bomba peristáltica (8); reservatório de pasta (9); bocal de entrada de ar (10), um sistema de aquisição de dados (11), termopar (12) e transdutor de pressão (13).

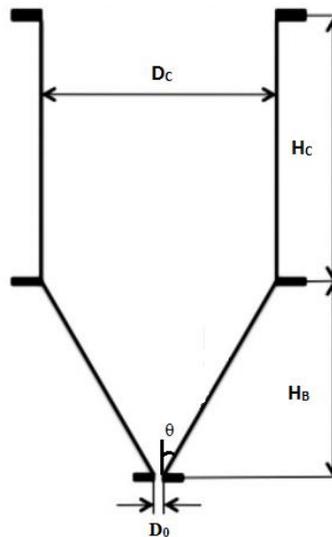


Fonte: Pessoal (2012).

Conforme apresentado na Figura 3.1, o ar de secagem foi fornecido ao sistema por um soprador de ar (1) da marca IBRAM com potência de 7,5 HP e o ajuste de vazão foi feito por meio de um sistema *by-pass* (2) composto por duas válvulas do tipo gavetas de 2 pol. de diâmetro que direcionavam o ar proveniente do soprador em duas direções distintas, o interior da câmara de secagem e o ambiente (purga). A vazão volumétrica do ar foi obtida mediante a medida de diferença de pressão existente durante seu escoamento em um medidor do tipo Venturi (3). Um trocador de calor (4) constituído de quatro resistências elétricas de 1000 W de potência cada uma foi empregado para o aquecimento do ar. O conjunto de resistências era acionado mediante um controlador de temperatura (5) da marca Flyever FE50SN, que por sua vez permitiu o controle da potência de aquecimento e o ajuste da temperatura de operação do ar desejada.

A câmara de secagem (6) foi composta por uma coluna cilíndrica construída em aço inox de 120 cm de altura e 30 cm de diâmetro, bases cônicas inferiores com ângulos de 45°, 60° e 75° e diâmetro de entrada de 3 cm e base cônica superior com ângulo de 60°. A Figura 3.2 mostra as especificações da câmara de secagem.

Figura 3.2 - Detalhamento da câmara de secagem.

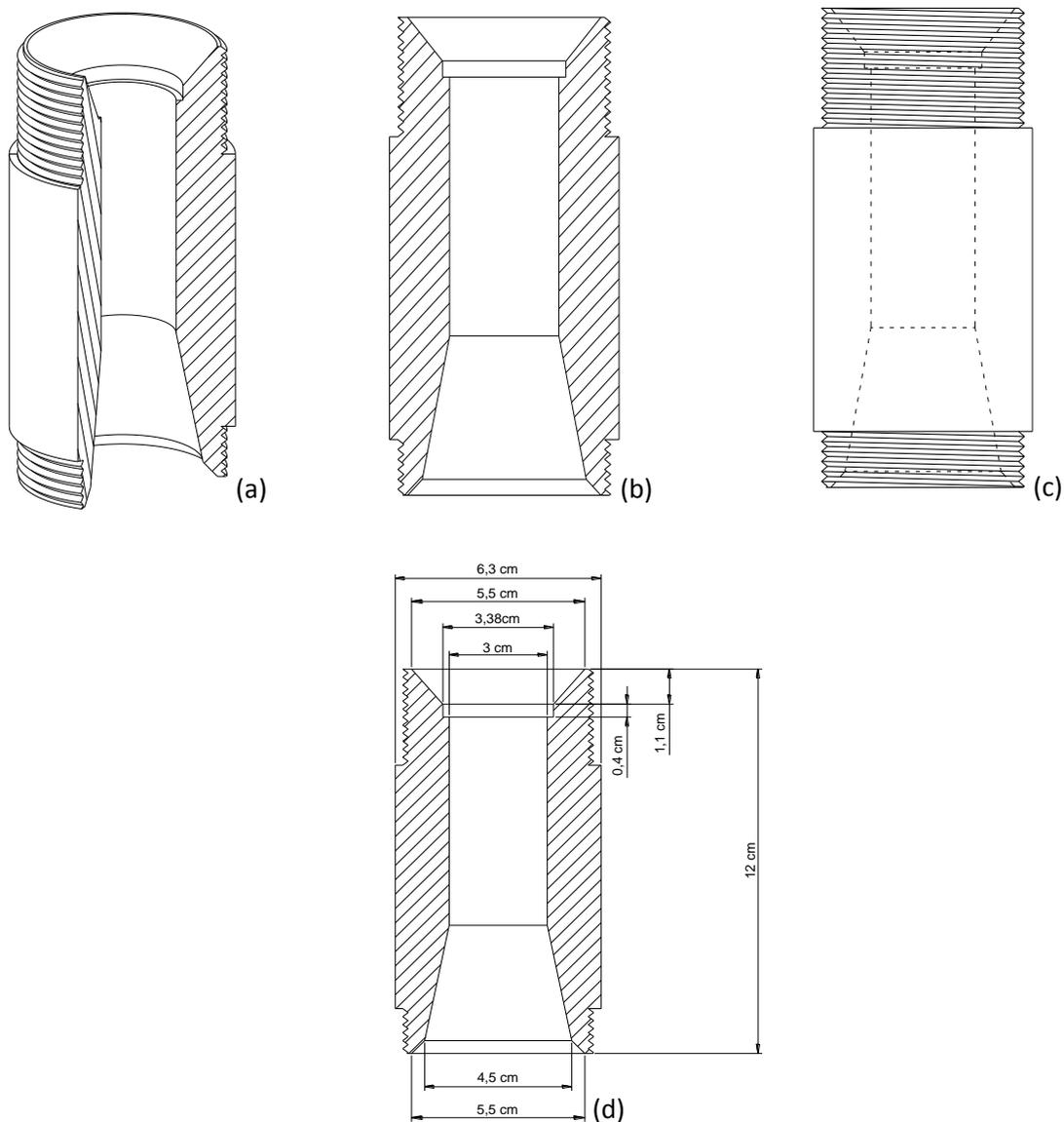


Fonte: Pessoal (2015).

Em que D_c é o diâmetro da coluna cilíndrica, H_c é a altura da coluna cilíndrica, θ é o ângulo da base cônica inferior, H_b é a altura da base cônica inferior e D_0 é o diâmetro do bocal de entrada de ar.

Duas configurações distintas de bocal de entrada de ar (10) foram avaliadas neste trabalho, o bocal tipo Venturi e o bocal do tipo tubo reto. O bocal do tipo Venturi possui um estrangulamento de área que aumenta a velocidade do ar de entrada do leito, bem como melhora o escoamento de ar nesta região. Este tipo de bocal tem sido amplamente utilizado nas pesquisas realizadas pelo Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, onde podem ser citados os trabalhos de Almeida (2009) e Nascimento (2013). A Figura 3.3 apresenta o bocal de entrada de ar do tipo Venturi e suas respectivas características e dimensões.

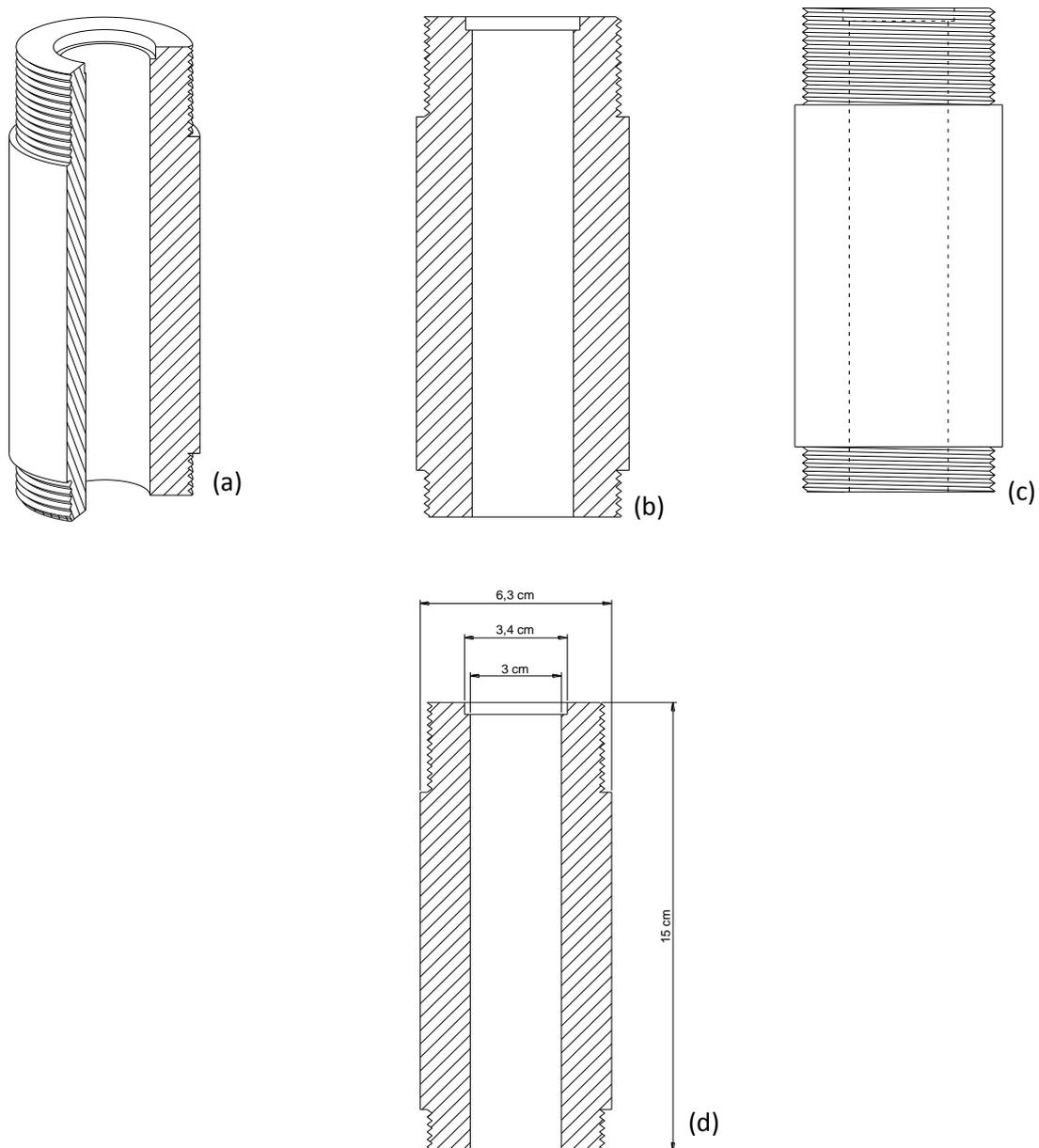
Figura 3.3 - Bocal de entrada de ar do tipo Venturi: (a) Vista frontal com corte lateral, (b) vista frontal com corte transversal, (c) vista frontal sem corte e (d) dimensões do bocal.



Fonte: Bitti (2012).

O segundo bocal é basicamente um tubo reto, cujas dimensões foram determinadas com base no trabalho de Olazar et al. (1992), em que os autores afirmam que os valores para a relação entre o diâmetro de entrada da base cônica e o diâmetro de entrada do bocal de entrada de ar (D_0/D_i) deve estar entre 0,50 e 0,83. Desta forma, o valor para esta razão utilizado neste trabalho foi igual a 0,60. A Figura 3.4 apresenta o bocal de entrada de ar do tipo tubo e suas respectivas características e dimensões.

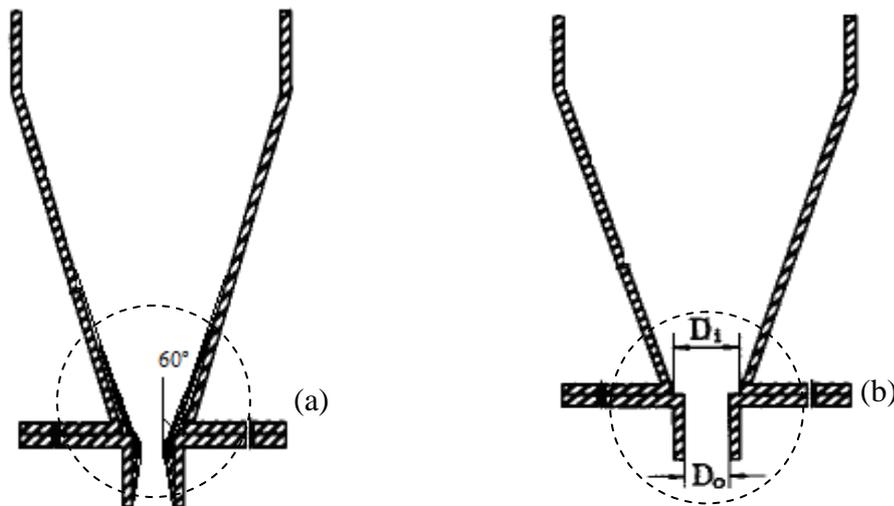
Figura 3.4 - Bocal de entrada de ar do tipo tubo reto: (a) Vista frontal com corte lateral, (b) vista frontal com corte transversal, (c) vista frontal sem corte e (d) dimensões do bocal.



Fonte: Bitti (2012).

Os bocais de entrada de ar apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4 foram conectados abaixo da base cônica inferior do leito, conforme mostra a Figura 3.5. Como foram utilizadas partículas inertes, fez-se necessário inserir uma tela metálica, impedindo a saída destas partículas na extremidade inferior do leito.

Figura 3.5 - Conexão entre o bocal de entrada de ar e a base cônica inferior do leito: (a) bocal do tipo Venturi e (b) bocal do tipo tubo reto.



Fonte: Bitti (2012).

Foi utilizado apenas um bocal de entrada de ar do tipo Venturi para as três bases cônicas estudadas (45°, 60° e 75°). No entanto, o ângulo da região superior do bocal em conexão com a base cônica do leito era de 60° (Figura 3.5a), desta forma o encaixe com os os ângulos de cone de 45° e 75° não era exato. Já, o bocal do tipo tubo reto apresentava um degrau entre sua conexão com as bases cônicas inferiores do leito, conforme apresentado na Figura 3.5b.

A pasta foi inserida no interior da câmara de secagem por meio de um alimentador duplo fluido posicionado na região central da coluna cilíndrica. Este ejetor possuía duas entradas, onde eram acoplados um compressor de ar (7) e uma bomba peristáltica (8) responsável pela alimentação da pasta, que por sua vez estava conectada a um reservatório de pasta (9) com capacidade para 5 litros. O produto final foi coletado por meio de um ciclone do tipo Lapple construído em aço inox acoplado à saída da câmara de secagem, cujo diâmetro de coluna foi correspondente a 10 cm.

Para as medidas de temperatura, foram utilizados cinco termopares do tipo T de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, sendo um termopar localizado na entrada do leito, um na base cônica inferior da câmara de secagem, um na saída do leito e dois na saída do ciclone, sendo uma para a determinação da temperatura de bulbo seco e o outro para a obtenção da temperatura de bulbo úmido. Todos os termopares foram calibrados em um poço de calibração da marca Block Calibrator DB-35L, no qual o desvio médio entre as medidas de temperatura fornecidas pelo calibrador e pelos termopares foi de aproximadamente $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Para as medidas de pressão referentes ao medidor do tipo Venturi e à queda de pressão no leito (determinada antes do bocal de entrada de ar) foram utilizados dois transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated com faixa operacional de 0-5 psi (modelo 600) e 0-1 psi (modelo 860), respectivamente.

Um sistema de aquisição de dados (11) foi utilizado para monitoramento e aquisição dos dados experimentais. Este sistema era composto por uma placa de aquisição de dados LYNX modelo ADS0500, sendo esta conectada a um microcomputador que processou e armazenou os dados com o auxílio de uma rotina computacional desenvolvida em código LabVIEW (Nationals Instruments, versão 7.0).

3.2 Procedimento Experimental

3.2.1 Caracterização Fluidodinâmica da Unidade Experimental

A caracterização fluidodinâmica da unidade experimental foi realizada conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). Primeiramente, foram realizados testes fluidodinâmicos com o leito vazio sem a presença de partículas inertes, também conhecido como teste em “branco” e em seguida os ensaios fluidodinâmicos para o leito preenchido com partículas inertes. O procedimento experimental adotado em cada uma destas etapas está detalhado nos itens a seguir.

3.2.1.1 “Teste em Branco”

Inicialmente foram realizados os experimentos com o leito vazio sem a presença de partículas inertes, o "teste em branco". O procedimento experimental foi iniciado

com a montagem do leito de jorro, conforme especificações de bocal de entrada de ar e ângulo do cone mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Configurações do leito de jorro empregadas nos testes em branco à 100°C.

Ângulo do cone (°)	Bocal de entrada de ar
45	Venturi
60	Venturi
75	Venturi
45	Tubo reto
60	Tubo reto
75	Tubo reto

Fonte: Pessoal (2014).

Foi fixada a temperatura do ar de entrada em 100°C e uma vazão de ar e desejada. Esperou-se um determinado tempo até que o sistema atingisse o regime permanente. Posteriormente, a vazão de ar foi rapidamente reduzida até zero, sendo em seguida aumentada gradativamente. Ao ser alcançada a máxima vazão de operação permitida pelo leito, foi realizado o processo inverso onde a vazão de ar foi novamente reduzida gradativamente até zero. Os dados de vazão do ar e da queda de pressão no leito foram coletados com auxílio de um sistema de aquisição de dados, onde foram obtidos 1024 leituras a uma frequência de 500Hz. A rotina labVIEW utilizada fornecia automaticamente a média e o desvio padrão dos dados coletados.

3.2.1.2 Caracterização Fluidodinâmica do Leito com Partículas Inertes

A caracterização da unidade experimental para o leito de jorro com partículas inertes permitiu a obtenção dos valores da velocidade mínima de jorro e da queda de pressão do leito para cada uma das condições operacionais estudadas. Para isso, foram utilizadas partículas de polietileno com 4,38 mm de diâmetro e massa específica de $930,5 \pm 0,3 \text{ kg/m}^3$. O procedimento experimental foi iniciado com a montagem do equipamento e preenchimento do mesmo com uma quantidade pré-determinada de partículas inertes, conforme especificações apresentadas na Tabela 3.2.

O procedimento experimental adotado foi similar ao empregado nos "testes em branco" mostrado no item 3.2.1.1, em que inicialmente o ar foi aquecido a 100°C e foi fixada uma vazão de ar de entrada suficiente para promover a formação do jorro no interior da câmara de secagem. Esperou-se um tempo até que o sistema atingisse o regime permanente. Posteriormente, a vazão de ar foi rapidamente reduzida até zero, sendo em seguida aumentada gradativamente. Ao ser alcançada a máxima vazão de operação (vazão de ar na qual, não houvesse elutriação das partículas inertes e saída destas pelo ciclone), foi realizado o processo inverso onde a vazão de ar foi novamente reduzida gradativamente até zero.

Tabela 3.2 - Condições operacionais empregadas na caracterização fluidodinâmica do leito de jorro com partículas inertes.

Temperatura do ar de entrada de 100°C				
Ângulo do cone (°)	Massa de inerte (kg)	Altura de leito estático (cm)	D _H (cm)	Bocal de entrada de ar
45	1,50	18,00	20,00	Venturi
60	1,50	15,00	22,00	Venturi
75	1,50	13,00	25,00	Venturi
45	3,00	24,00	25,50	Venturi
60	3,00	20,00	28,00	Venturi
75	3,00	17,50	30,00	Venturi
45	4,50	28,70	30,00	Venturi e tubo reto
60	4,50	23,50	30,00	Venturi e tubo reto
75	4,50	21,00	30,00	Venturi e tubo reto

Fonte: Pessoal (2014).

Como a queda de pressão não foi causada somente pelo leito de partículas inertes, mas também pelo equipamento, foi utilizada uma equação de ajuste da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar para os dados obtidos no "teste em branco", conforme apresenta a Equação 3.1.

$$\Delta P = au^b \quad (3.1)$$

Em que u é a velocidade do ar na entrada do leito de jorro, P é a pressão e a e b os coeficientes de ajuste da função.

Os valores da queda de pressão provocada pelo leito sem as partículas inertes obtidos no teste em “branco” foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo leito de partículas inertes. A partir dos dados de queda de pressão em função da velocidade do ar de entrada foram estimadas a queda de pressão de jorro estável e máxima do leito, bem como a velocidade mínima de jorro para todas as configurações de leito estudadas.

3.2.2 Secagem

Os ensaios de secagem foram conduzidos inicialmente empregando-se água destilada como pasta "padrão". Isto por que, a água é constituinte principal das demais pastas a ser removida durante a secagem, cerca de 75 a 97%. Com os ensaios de evaporação de água, foi possível obter um conhecimento prévio do comportamento do leito de jorro com a inserção de uma pasta com comportamento bem definido no sistema. O procedimento experimental adotado foi conduzido conforme as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Condições operacionais utilizadas nos ensaios de evaporação de água.

Ângulo do cone (°)	Massa de inerte (kg)	Bocal de entrada de ar
45	3,00	Venturi
60	3,00	Venturi
75	3,00	Venturi
45	4,50	Venturi
60	4,50	Venturi
75	4,50	Venturi

Fonte: Pessoal (2014).

Para cada condição experimental utilizada, a temperatura e a velocidade do ar de entrada empregada foram correspondentes a 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente. Inicialmente, esperava-se um tempo até que o sistema atingisse o regime permanente. Em seguida, era iniciada a atomização da água destilada no interior da câmara de secagem, sendo

a vazão inicial de 10ml/min. O processo era monitorado em tempo real por um sistema de aquisição de dados por um período de 60 minutos, no qual era garantido que o sistema atingisse o regime permanente. Ao final deste procedimento, iniciava-se uma nova alimentação com o acréscimo de 5 ml/min. O processo era finalizado para a vazão de alimentação de água destilada em que o ar de saída do leito estivesse saturado ou o leito de jorro apresentasse problemas operacionais.

Para analisar a secagem de pastas em leito de jorro, utilizou-se como pasta real o leite desnatado da marca Parmalat, adquirido em comércio local, cuja composição para 200 ml fornecida pelo fabricante corresponde a 6,30g de proteína, 9,40g de carboidratos, 0 g de gordura, 143 mg de sódio e 240 mg de cálcio. A escolha deste material está relacionada ao fato de que a ausência de gordura do leite desnatado proporciona altos valores de queda de pressão e dificuldade de movimentação dos inertes durante a secagem, conforme relatado previamente por Almeida et al. (2010) e Nascimento (2013). Desta forma, verificou-se neste estudo se a modificação das características geométricas do leito permitiriam obter um processo mais estável durante a secagem do leite desnatado.

A secagem do leite desnatado foi conduzida adotando o mesmo procedimento experimental utilizado durante os ensaios de evaporação de água. Entretanto, a partir do início da alimentação da pasta, foram realizadas simultaneamente coletas do pó obtido na saída do ciclone em um intervalo de 10 minutos, com a finalidade de obter a umidade do produto final. Inicialmente determinou-se a massa inicial das amostras de pó com o auxílio de uma balança analítica da marca AND modelo FR-200 MKII com precisão de $0,50 \times 10^{-4}$ g, posteriormente as amostras foram levadas para uma estufa de circulação forçada de ar até atingir massa constante a uma temperatura de 93°C, conforme recomendado pelas normas do instituto Adolfo Lutz (1985). A determinação da umidade das amostras de pó coletadas na saída do ciclone foi obtida com o auxílio da Equação 3.2.

$$U(b.u) = 100 \frac{m_a}{m_{as} + m_a} \quad (3.2)$$

Em que, $U(b.u)$ é a umidade em base úmida, m_a é a massa de água, m_{as} é a massa da amostra seca.

A Tabela 3.4 apresenta as condições operacionais utilizadas nos ensaios de secagem do leite desnatado, sendo estas determinadas com base nos ensaios de evaporação de água, na qual selecionou-se a condição operacional em que o leite de jorro apresentou maior capacidade de evaporação. Além disso, selecionou-se uma altura de leite estático fixa de 23,50 cm para a secagem da pasta real.

Tabela 3.4 - Condições operacionais empregadas na secagem do leite desnatado.

Ângulo do cone (°)	Massa de inerte (kg)	Altura de leite estático (cm)	Bocal de entrada de ar
45	4,50	28,70	Venturi e tubo reto
60	4,50	23,50	Venturi e tubo reto
75	4,50	21,00	Venturi e tubo reto
45	2,56	23,50	Venturi
60	4,50	23,50	Venturi
75	5,00	23,50	Venturi

Fonte: Pessoal (2014).

Durante o procedimento experimental foram monitorados e determinados os valores da velocidade do ar de entrada, da queda de pressão do leite, da temperatura do ar de entrada, do ar de saída, de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone. A coleta dos dados foi conduzida automaticamente em um intervalo de 30 segundos pelo sistema de aquisição de dados. Assim como para a caracterização da unidade experimental, a rotina labVIEW utilizada fornecia a média e o desvio padrão dos dados coletados. Por meio de uma rotina computacional desenvolvida em MATLAB, os dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido foram utilizados para determinar a umidade relativa e absoluta do ar na saída da unidade experimental com base em cálculos psicrométricos.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho e as respectivas discussões. A fim de se obter uma melhor análise e compreensão dos dados experimentais, os resultados foram divididos em três itens principais. No primeiro item é apresentada a caracterização fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes valores de massa de material inerte, ângulos de cone e geometrias de bocal de entrada de ar. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de evaporação de água. Por fim, encontra-se a análise do efeito do ângulo de base cônica e da geometria do bocal de entrada de ar na secagem de leite desnatado.

4.1 Caracterização Fluidodinâmica do Leito de Jorro

A princípio serão apresentados os resultados experimentais referentes à caracterização fluidodinâmica do leito de jorro empregando apenas o bocal de entrada de ar do tipo Venturi. A comparação entre as duas geometrias de bocal de entrada de ar são apresentadas no item 4.1.2.3.

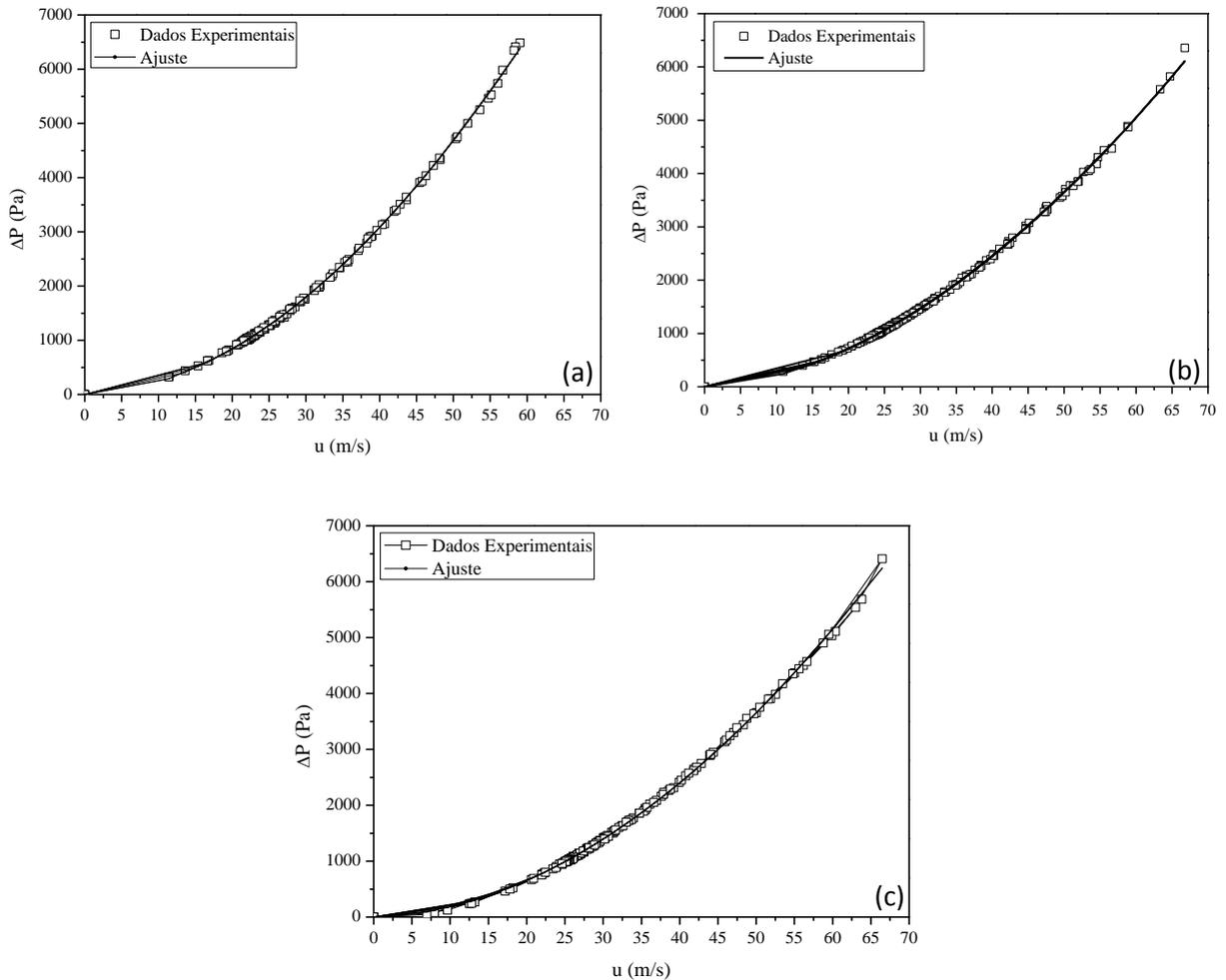
4.1.1 “Teste em Branco”

Inicialmente, foi realizada a caracterização fluidodinâmica do leito de jorro sem a presença de partículas inertes, denominada de “teste em branco”, conforme descrito anteriormente no capítulo 3. As Figuras 4.1a, 4.1b e 4.1c apresentam a queda de pressão do leito vazio em função da velocidade do ar de entrada para o bocal de entrada de ar do tipo Venturi, ângulos de base cônica de 45, 60 e 75° e temperatura do ar de entrada de 100°C.

Conforme os dados apresentado na Figura 4.1 verificou-se que já no teste em branco, a geometria do leito exerceu efeito no comportamento fluidodinâmico do leito, visto

que para um mesmo valor de velocidade do ar de entrada a queda de pressão foi mais elevada para o ângulo de cone de 45° quando comparada aos demais ângulos de cone.

Figura 4.1 - Queda de pressão no leito de jorro vazio em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.



Fonte: Pessoal (2014).

Os dados obtidos por meio do “teste em branco” foram ajustados a uma função conforme já apresentado no capítulo 3 (Equação 3.1).

$$\Delta P = au^b \quad (3.1)$$

A Tabela 4.1 apresenta o ajuste dos dados obtidos durante a caracterização fluidodinâmica da unidade experimental sem a presença de partículas inertes para o bocal de

entrada de ar do tipo Venturi, temperatura do ar de entrada de 100°C e ângulos de cone de 45°, 60° e 75°, respectivamente.

Tabela 4.1 – Ajuste dos dados obtidos por meio dos testes em branco.

Ângulo do Cone (°)	Função Potência	R ²	Equação
45	$\Delta P = 3,07u^{1,87}$	0,9996	(4.1)
60	$\Delta P = 3,43u^{1,78}$	0,9995	(4.2)
75	$\Delta P = 2,30u^{1,88}$	0,9995	(4.3)

Fonte: Pessoal (2014).

Conforme os dados apresentados na Tabela 4.1, verificou-se que a função utilizada apresentou bom ajuste aos dados experimentais, visto que os coeficientes de determinação, R², para todas as configurações de leito estudadas foram próximos a 1. Foi possível constatar ainda que os valores dos coeficientes de ajuste (a e b) foram distintos para cada ângulo de cone. Isto sugere mais uma vez que a geometria do leito exerce efeito no comportamento fluidodinâmico do leito, já no teste em branco.

4.1.2 Fluidodinâmica do Leito com Partículas Inertes

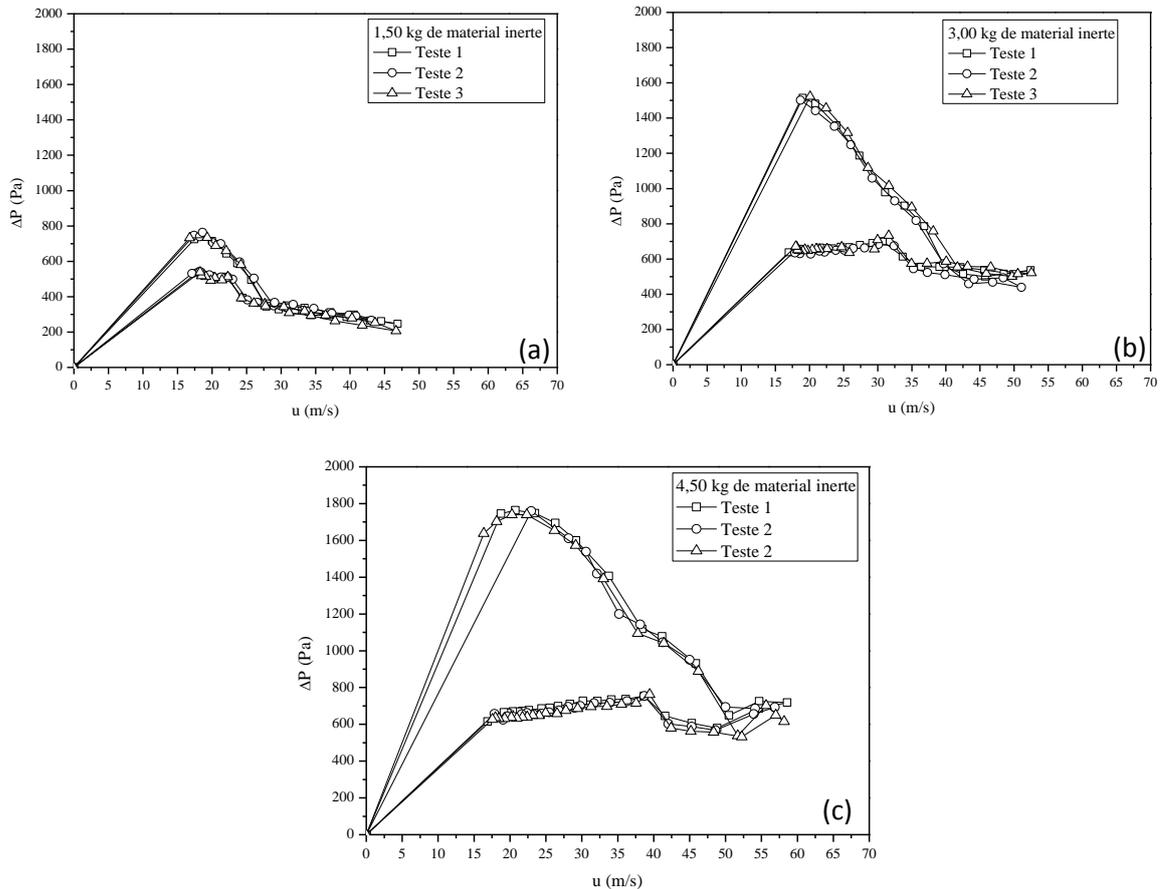
4.1.2.1 Influência da Massa de Partículas Inertes

Com a finalidade de avaliar apenas o efeito da massa de material no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, os resultados apresentados neste item serão referentes a um valor fixo de ângulo de cone de 45°, no qual utilizou-se apenas configuração de leito cônico.

Referindo-se aos ensaios fluidodinâmicos para o leito preenchido com partículas inertes, as Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c mostram em triplicata os dados de queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada, sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, ângulo de cone de 45° e massa de material inerte de 1,50; 3,00 e 4,50 kg, respectivamente. Para a obtenção das curvas fluidodinâmicas apresentadas nas Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c, os dados obtidos

durante o procedimento experimental com a presença de partículas inertes foram subtraídos da Equação 3.1.

Figura 4.2 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada: (a) 1,50 kg de material inerte, (b) 3,00 kg de material inerte e (c) 4,50 kg de material inerte.



Fonte: Pessoal (2014).

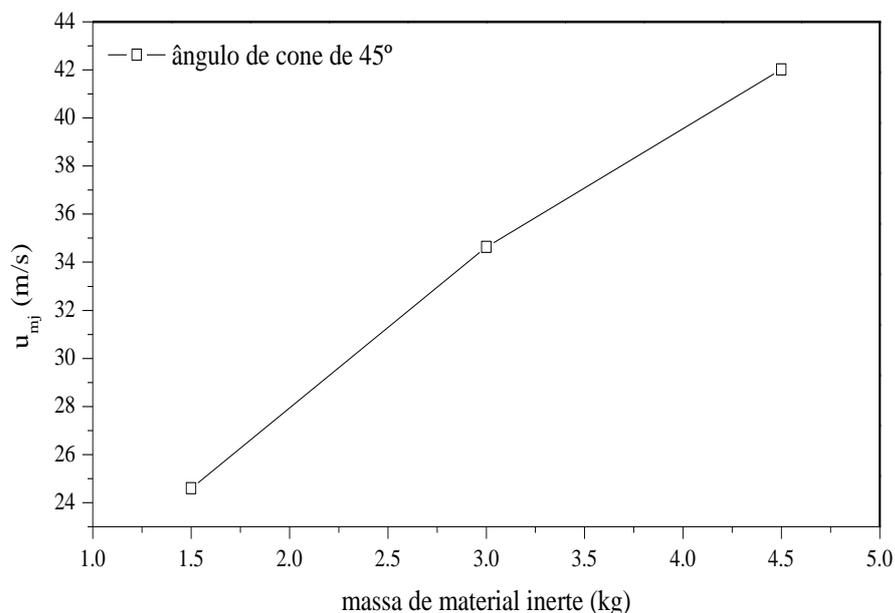
Com base nos dados apresentados nas Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c, constatou-se que todas as curvas apresentam um comportamento típico de leito de jorro, conforme resultados apresentados em Mathur e Epstein (1974). Estes resultados mostraram uma histerese expressiva entre os dados de vazão de ar ascendente e descendente. Isso ocorre porque a energia necessária para o rompimento do leito de partículas e formação do canal de jorro é muito maior do que a energia utilizada para manter o leito na condição de jorro estável, condição na qual, as partículas já se encontram em movimento cíclico que é

característico deste processo. Desta forma, a queda de pressão máxima do leito é muito maior do que a queda de pressão de jorro estável.

Os dados apresentados nessas figuras foram obtidos em triplicata, o que permitiu a constatação da boa reprodutibilidade dos dados experimentais e também a determinação dos valores médios de velocidade mínima de jorro, queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável, conforme apresenta-se a seguir.

A Figura 4.3 apresenta os valores médios da velocidade mínima de jorro em função da massa de material inerte, sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo Venturi e ângulo de cone de 45°.

Figura 4.3 – Valores médios de velocidade mínima de jorro em função da massa de material inerte.

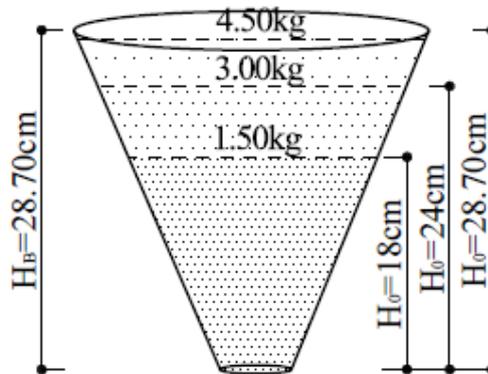


Fonte: Pessoal (2014).

Os resultados apresentados na Figura 4.3 mostraram uma elevação dos valores de velocidade mínima de jorro com o aumento da massa de material inerte, m_p . Sendo a velocidade mínima de jorro, u_{mj} , definida como a velocidade mínima de ar necessária para que o regime de jorro exista (MATHUR e EPSTEIN, 1974), um aumento na quantidade de partículas no interior do leito exige uma maior velocidade de ar para manter as partículas em movimento cíclico característico do sistema. Isso sugere que a velocidade do ar tem de ser suficiente para equilibrar o peso aparente das partículas. Uma possível explicação também para este fato é que um aumento dos valores de m_p eleva a altura de leito estático, H_0 ,

utilizada para o preenchimento da base cônica. Em leitos cônicos a velocidade mínima de jorro é proporcional a altura de leito estático (OLAZAR et al., 1992 e CHOI e MEISEN, 1992). Em concordância com estes autores, resultados semelhantes também foram observados por Kmiec (1983), Lin and Grace (1987), Kachan (1988), Rodrigues (1993), Wang et al. (2004), Salam and Bhattacharya (2006) e Qin et al. (2012). A Figura 4.4 ilustra a altura do leito de partículas para cada massa de material inerte correspondente.

Figura 4.4 – Massa de material inerte e suas respectivas alturas de leito estático para o ângulo de cone de 45°.



Fonte: Pessoa (2015).

Existem na literatura diversas correlações para a previsão dos valores de velocidade mínima de jorro. Com a finalidade de verificar a validade destas correlações na determinação dos valores de u_{mj} para a faixa operacional estudada neste trabalho, utilizaram-se equações para a configuração de leito cônico mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Correlações para previsão dos dados valores de velocidade mínima de jorro em leitos cônicos.

Autor	Correlação	Equação
Gorshtein and Mukhlenov (1964)	$Re_{mj} = 0,174Ar^{0,5}(D_H/D_i)^{0,85} \tan(\theta/2)^{-1,25}$	(4.4)
Tsvik et al. (1967)	$Re_{mj} = 0,4Ar^{0,52}(H_0/D_i)^{1,24} \tan(\theta/2)^{0,42}$	(4.5)
Olazar et al. (1992)	$Re_{mj} = 0,126Ar^{0,5}(D_H/D_i)^{1,68} \tan(\theta/2)^{-0,57}$	(4.6)
Bi et al. (1997)	$Re_{mj} = 0,3Ar^{0,5}[1 - 0,9/(D_H/D_i)^2] \sqrt{(D_H/D_i)[(D_H/D_i)^2 + (D_H/D_i)}$	(4.7)

Fonte: Bi (2011).

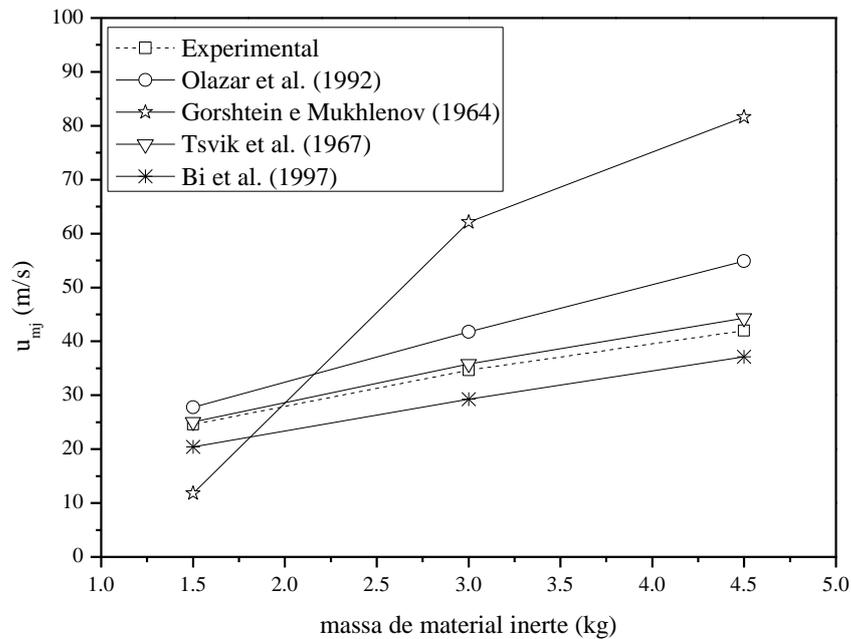
Nas Equações 4.4 a 4.7, o número de Archimedes, Ar , e o número de Reynolds, Re_{mj} , são definidos pelas Equações 4.8 e 4.9, respectivamente.

$$Ar = d_p^3 \rho g (\rho_p - \rho) / \mu^2 \quad (4.8)$$

$$Re_{mj} = d_p u_{mj} \rho / \mu \quad (4.9)$$

A Figura 4.5 apresenta a comparação entre os valores de velocidade mínima de jorro obtidos experimentalmente e os previstos pelas correlações da literatura.

Figura 4.5 – Dados experimentais e previstos pelas correlações para a velocidade mínima de jorro para ângulo de cone de 45°.



Fonte: Pessoal (2015).

Com base nos dados apresentados na Figura 4.5, verificou-se que a correlação que forneceu valores de velocidade mínima de jorro mais próximos aos obtidos experimentalmente para diferentes valores de massa de material inerte foi a equação de Tsvik et al. (1967). As demais correlações da literatura não foram capazes de prever adequadamente os valores da velocidade mínima de jorro para todas as condições operacionais avaliadas neste item. Verificou-se ainda que, além de não prever satisfatoriamente os dados de u_{mj} , a

(correlação de Gorshtein and Mukhlenov (1964) apresentou uma tendência distinta à apresentada pelos dados experimentais e pelas demais correlações testadas. Estes resultados mostraram que, apesar das diversas modificações realizadas nas correlações com o objetivo de se obter uma melhor previsão dos valores de velocidade mínima de jorro, a aplicação destas ainda é limitada, isto porque a faixa operacional na qual estas correlações se aplicam é muito restrita, conforme mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Limites de aplicação das correlações para previsão dos valores de u_{mj} .

Correlação	θ (°)	D_i (cm)	H_0 (cm)	d_p (mm)	ρ_s (Mg/m ³)
Gorshtein and Mukhlenov (1964)	12 - 60	2 - 5	3 - 15	0,50 - 2,50	0,98 - 2,36
Tsvik et al. (1967)	20 - 50	2 - 4,20	10 - 50	1,50 - 4	1,65 - 1,70
Olazar et al. (1992)	28 - 45	2 - 6,20	2 - 55	0,50 - 25	*
Bi et al. (1997)	*	*	*	*	*

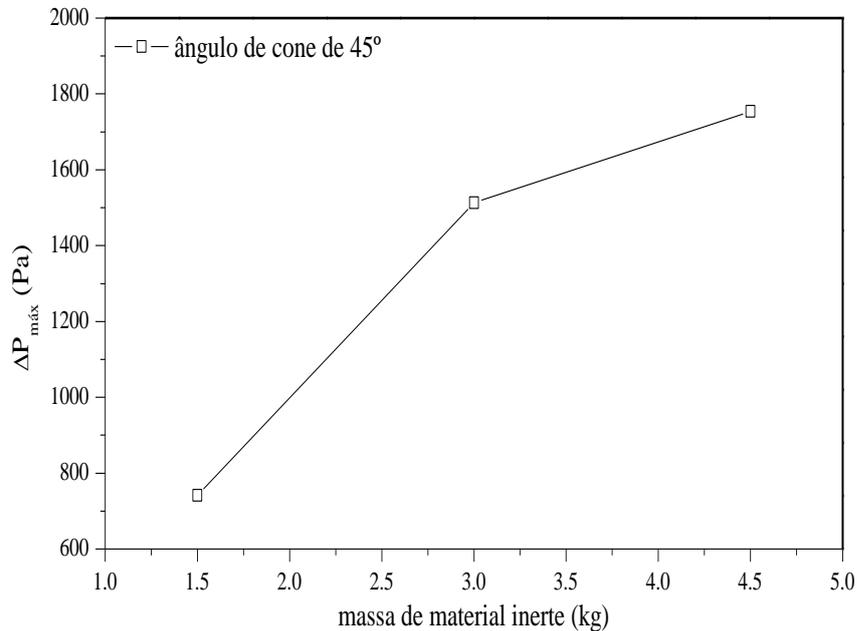
* Informações não encontradas

Fonte: Mathur e Epstein (1974).

Com o propósito de averiguar a influência da massa de material inerte nos valores da queda de pressão máxima do leito, são apresentados na Figura 4.6 os dados de $\Delta P_{máx}$ em função de m_p sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo Venturi e ângulo de cone de 45°.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.6, verificou-se uma elevação dos valores da queda de pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$, com o aumento da massa de material inerte. Isso porque, quando se eleva a quantidade de sólidos utilizada para o preenchimento do leito de jorro, a altura de leito estático também se eleva, conforme mostra a Figura 4.4. Isto faz com que uma maior energia seja necessária para perturbar as partículas e formar todas as características necessárias para a transição de leito fixo para leito de jorro. Tal necessidade de energia é refletida no aumento de $\Delta P_{máx}$ com a massa de partículas inertes, pois é necessário superar o atrito do fluido nas partículas. Dessa maneira, quanto maior é a quantidade de partículas, maior será a resistência que o meio impõe ao escoamento do fluido em seus interstícios, refletindo em um aumento da perda de carga no sistema.

Figura 4.6 – Valores médios de queda de pressão máxima em função da massa de material inerte.



Fonte: Pessoal (2015).

Os resultados apresentados na Figura 4.6 mostraram ainda um aumento mais acentuado dos valores de $\Delta P_{\text{máx}}$, com o aumento da massa de material inerte de 1,50 para 3,00kg. A variação de 3,00 para 4,50 kg de partículas também elevou os valores de $\Delta P_{\text{máx}}$, porém de forma um pouco menos expressiva. Isto ocorre porque, apesar da variação da massa de material inerte ser a mesma (1,50 kg), a diferença da altura de leito estático é maior entre os valores de m_p de 1,50 e 3,00kg ($\Delta H_0 = 6$ cm). Para a mudança de 3,00 para 4,50 kg de partículas o valor de ΔH_0 é equivalente a 4,70 cm. Esta variação de ΔH_0 está relacionada com as características geométricas da base cônica de 45°. Conforme mostra a Figura 4.4, esta base cônica possui paredes menos inclinadas em relação a vertical, assim um aumento qualquer da massa inerte nesta base eleva o valor de ΔH_0 , porém à medida que o diâmetro do cone se aproxima do diâmetro da coluna cilíndrica (neste caso 30 cm), a variação de H_0 é menor. Estes resultados mostraram que a quantidade de material inerte exerce efeito nos valores de $\Delta P_{\text{máx}}$, porém o que determina a intensidade do efeito é a altura do leito estático. Assim, quanto maior o valor de ΔH_0 , mais expressivo será o aumento dos valores de $\Delta P_{\text{máx}}$, uma vez que, será necessária uma maior energia para o rompimento do leito de partículas e formação do canal de jorro, conforme discutido anteriormente. A influência da altura de leito estático na

queda de pressão máxima do leito também foi verificada por diversos autores da literatura, nos quais podem ser citados (OLAZAR et al., 1993; RODRIGUES, 1993; SALAM e BHATTACHARYA, 2006; ALTZIBAR et al., 2009; BI, 2011; ZHONG et al., 2011; SARI, KULAH e KOKSAL, 2012 e ALTZIBAR et al., 2014.

Avaliou-se também a eficiência de algumas correlações da literatura para a previsão dos valores da queda de pressão máxima do leito. A Tabela 4.4 apresenta as correlações da literatura testadas para estimação dos valores de $\Delta P_{\text{máx}}$ em leitos cônicos.

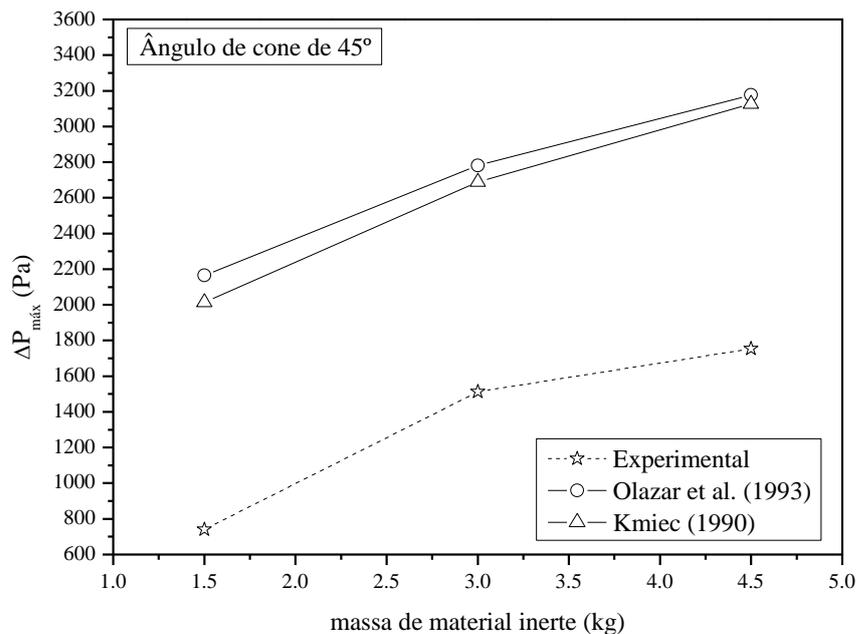
Tabela 4.4 - Correlações da literatura para previsão dos dados valores de queda de pressão máxima do leito em leitos cônicos.

Autor	Correlação	Equação
Kmiec (1980)	$-\Delta P_{\text{máx}} / \rho_b g H = 1 + 0,206 \exp(1,24 H_0 / D_i)$	(4.10)
Olazar et al. (1993)	$-\Delta P_{\text{máx}} / \Delta P_{\text{mj}} = 1 + 0,116 (H_0 / D_i)^{0,50} (\tan(\theta / 2))^{-0,80} Ar^{0,0125}$	(4.11)

Fonte: Olazar, San José e Bilbao (2011).

A comparação entre os valores de queda de pressão máxima do leito obtidos experimentalmente e os valores previstos via correlação são apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão máxima do leito.

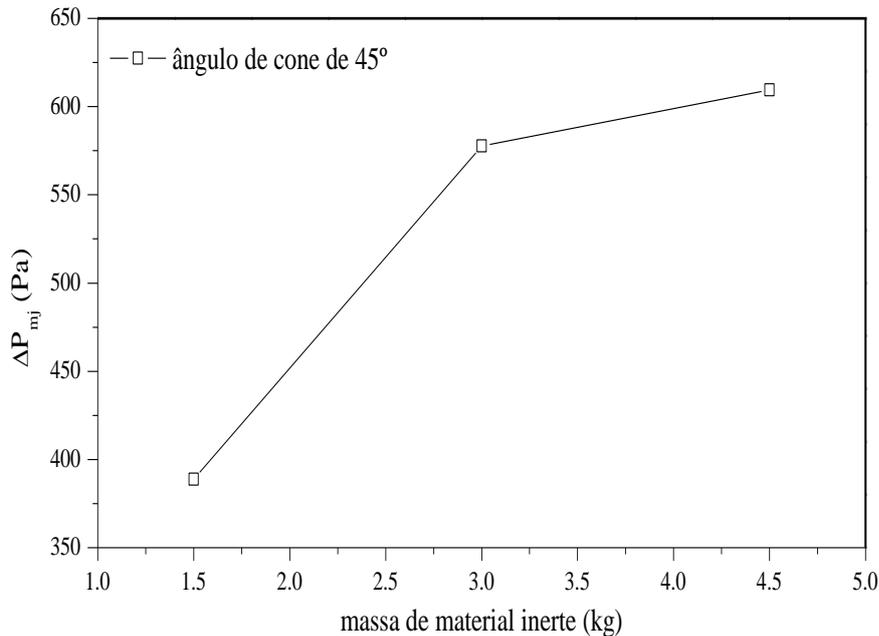


Fonte: Pessoal (2015).

Conforme os dados apresentados na Figura 4.7, verificou-se que as correlações empregadas não previram satisfatoriamente os valores de queda de pressão máxima do leito. Tendo em vista que estas correlações superestimaram os valores de $\Delta P_{\text{máx}}$.

A Figura 4.8 apresenta os valores médios da queda de pressão de jorro estável, ΔP_{mj} , em função da massa de material inerte, parametrizado o ângulo de base cônica sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C e bocal de entrada de ar do tipo Venturi.

Figura 4.8 - Queda de pressão de jorro estável em função da massa de material inerte.



Fonte: Pessoal (2015).

O comportamento dos valores de queda de pressão de jorro estável com relação a massa de material inerte, apresentado na Figura 4.8 foi similar aos resultados apresentados na Figura 4.6 para a queda de pressão máxima do leito, isto é, ocorreu um aumento dos valores de ΔP_{mj} mais acentuado com a massa de inerte de 1,50 kg para 3,00 kg. Após este valor o aumento dos valores da queda de pressão de jorro estável é mais sutil. A diferença principal neste caso é que o meio não se comporta como um leito fixo, no qual a resistência é imposta sobre o ar em escoamento, mas sim há a resistência no regime de transporte pneumático (resistência no canal de jorro, no transporte em fase diluída) e há a resistência no regime de leito deslizante (resistência na região anular), a qual é caracterizada pelo movimento descendente das partículas em contra-corrente com o gás descendente (MATHUR

e EPSTEIN, 1974). O aumento dos valores de queda de pressão de jorro estável com o aumento da massa de material inerte ou altura de leito estático também foi constatado por Altzibar et al. (2014), Bitti (2012) e Qin et al. (2012).

Algumas correlações da literatura também foram testadas para a previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável em leitos cônicos, conforme mostra a Tabela 4.5.

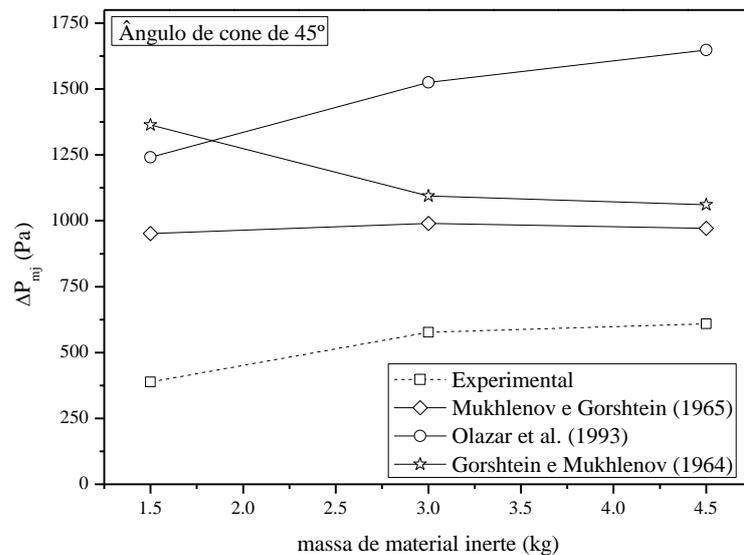
Tabela 4.5 - Correlações para previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável.

Autor	Correlação	Equação
Gorshtein and Mukhlenov (1964)	$-\Delta P_{mj} / H_0 \rho_p (1 - \varepsilon_0) g = 7,68 (\tan(\theta / 2))^{0,2} (Re_{mj})^{-0,2} (H_0 / D_i)^{-0,33}$	(4.12)
Mukhlenov e Gorshtein (1965)	$-\Delta P_{mj} / H_0 \rho_p = 7,68 (\tan(\theta / 2))^{0,2} (Re_{mj})^{-0,2} (H_0 / D_i)^{-0,33}$	(4.13)
Olazar et al. (1993)	$-\Delta P_{mj} / H_0 \rho_p (1 - \varepsilon_0) g = 1,20 (\tan(\theta / 2))^{-0,11} (Re_{mj})^{-0,06} (H_0 / D_i)^{0,88}$	(4.14)

Fonte: Olazar, San José e Bilbao (2011).

A Figura 4.9 apresenta o comparativo entre os valores de queda de pressão de jorro estável obtidos experimentalmente e os previstos empregando correlações da literatura mostradas na Tabela 4.5.

Figura 4.9 - Dados experimentais e previstos pelas correlações da literatura para a queda de pressão de jorro estável.



Fonte: Pessoal (2015).

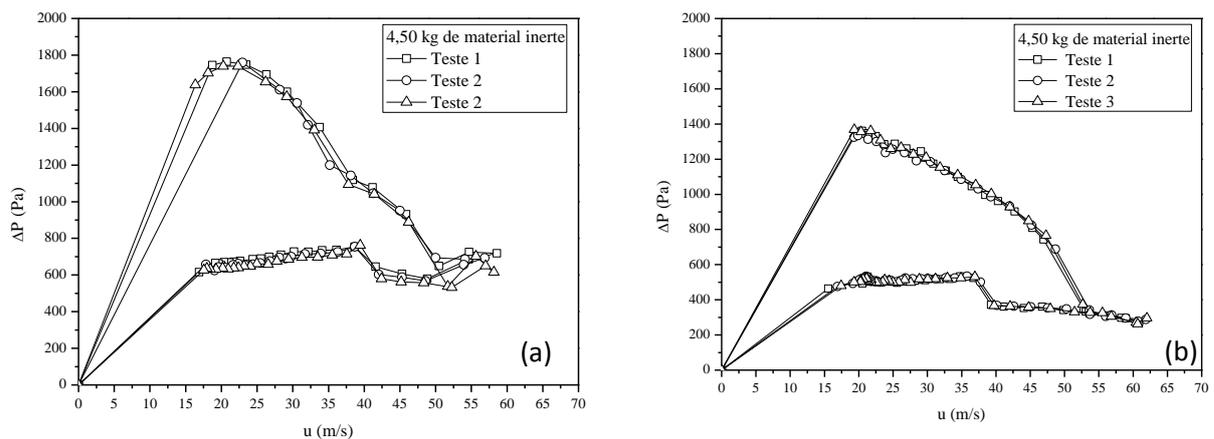
Com base nos resultados apresentados na Figura 4.9, verificou-se que as correlações da literatura para a previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável também não estimaram satisfatoriamente os dados experimentais, tendo em vista que os valores obtidos por estas correlações foram superestimados. Estes resultados mostraram a limitação destas correlações para a previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável em leito de jorro cônico.

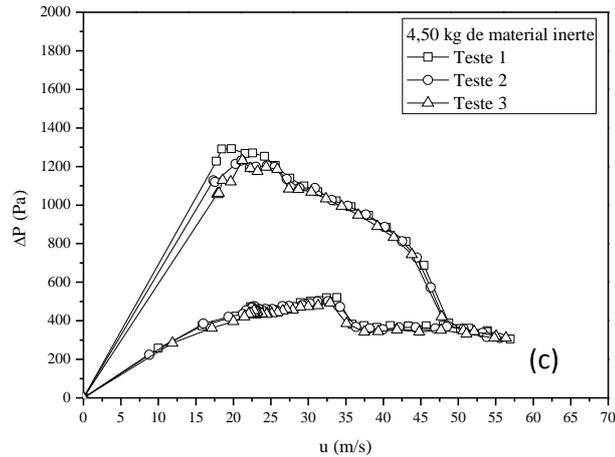
4.1.2.2 Influência do Ângulo de Base Cônica

Os resultados apresentados neste item têm como principal objetivo avaliar o efeito do ângulo de base cônica nos valores de velocidade mínima de jorro, u_{mj} , queda de pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$, e queda de pressão de jorro estável, ΔP_{mj} . Deste modo, os dados aqui apresentados são referentes à caracterização fluidodinâmica do leito de jorro com partículas inertes para diferentes valores de ângulos de base cônica.

As Figuras 4.10a, 4.10b e 4.10c apresentam as curvas fluidodinâmicas do leito de jorro em triplicata para 4,50 kg de massa de material inerte, temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo Venturi e ângulos de cone de 45°, 60° e 75°, respectivamente.

Figura 4.10 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.





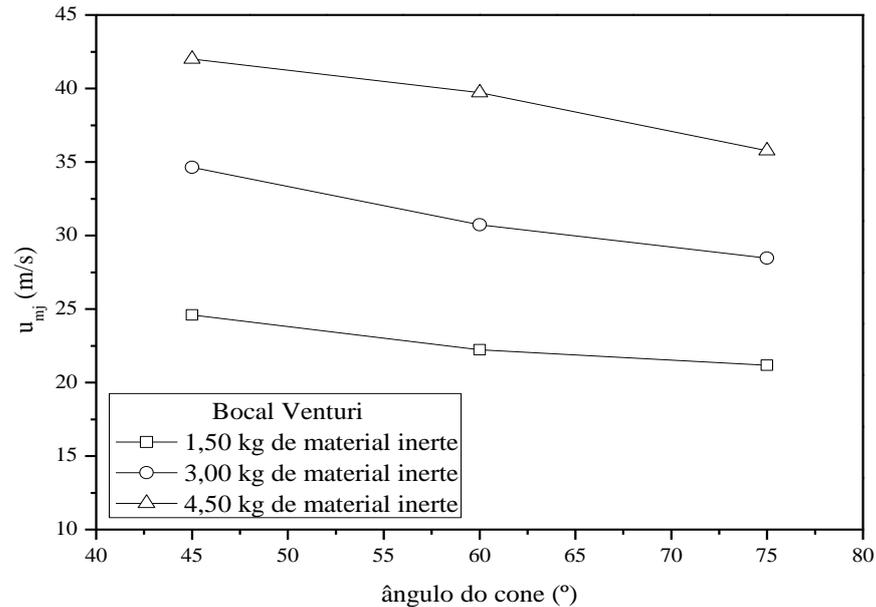
Fonte: Pessoal (2014).

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.10a, 4.10b e 4.10c constatou-se como esperado, que todas as curvas obtidas apresentaram um comportamento típico de leito de jorro, conforme apresentado em Mathur e Epstein (1974). A caracterização fluidodinâmica realizada para cada ângulo de base cônica apresentou boa reprodutibilidade dos dados experimentais e nos forneceu os valores médios de velocidade mínima de jorro e de queda de pressão máxima do leito e queda de pressão de jorro estável, conforme é mostrado a seguir.

A Figura 4.11 apresenta os valores médios da velocidade mínima de jorro em função do ângulo do cone, parametrizada a massa de partículas inertes sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C e bocal de entrada de ar do tipo Venturi.

Conforme os dados apresentados na Figura 4.11, foi possível verificar que os valores de velocidade mínima de jorro diminuíram com o aumento do ângulo do cone para todos os valores de massa de material inerte avaliados. Isto porque, para um valor fixo de m_p , o aumento do ângulo de cone diminui a altura de leito estático utilizada para o preenchimento do leito, conforme mostra a Figura 4.12. Esta diminuição do valor de H_0 é devido às características distintas apresentadas pelas paredes das bases cônicas estudadas. Como o ângulo de cone de 45° apresenta paredes menos inclinada em relação à vertical, qualquer aumento da massa de material inerte eleva mais significativamente a altura de leito estático em relação aos demais ângulos de cone estudados. Assim, tomando como exemplo a massa fixa de partículas de 1,50 kg, os valores de H_0 referentes aos ângulos de cone de 45°, 60° e 75° são 18, 15 e 13 cm, respectivamente.

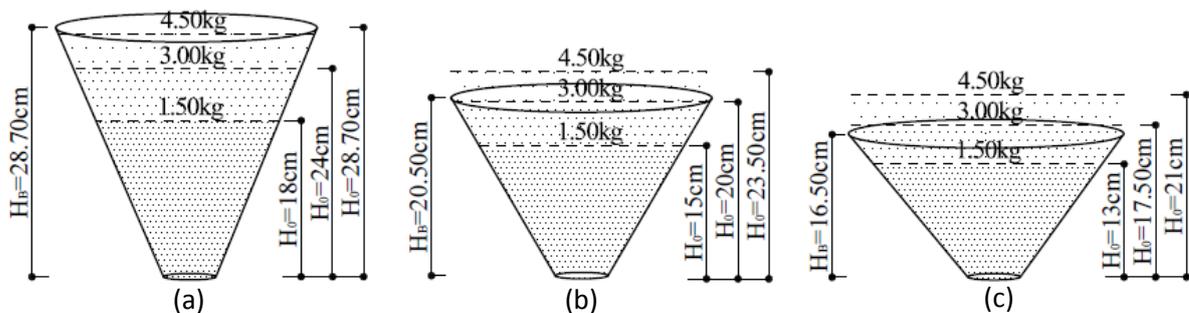
Figura 4.11 - Velocidade mínima de jorro em função do ângulo de cone.



Fonte: Pessoal (2014).

Como já discutido anteriormente, quanto maior a altura de leito estático maior é a resistência imposta pelo meio ao escoamento de ar e, como consequência, maior é a velocidade de ar necessária para manter o leito na condição de jorro mínimo. Em concordância com estes resultados Mathur e Epstein (1974) mencionaram que a velocidade mínima de jorro é dependente das propriedades dos sólidos e do fluido, bem como das características geométricas do leito. Estes autores verificaram também que a intensidade do efeito que o ângulo de cone exerce nos valores de u_{mj} é dependente do diâmetro da coluna, D_c , visto que, verificou-se efeito mais significativo do ângulo de cone para leitos com colunas maiores que 30 cm.

Figura 4.12 - Altura de leito estático correspondente para cada ângulo de cone considerando uma massa fixa de material inerte: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.



Fonte: Pessoal (2015).

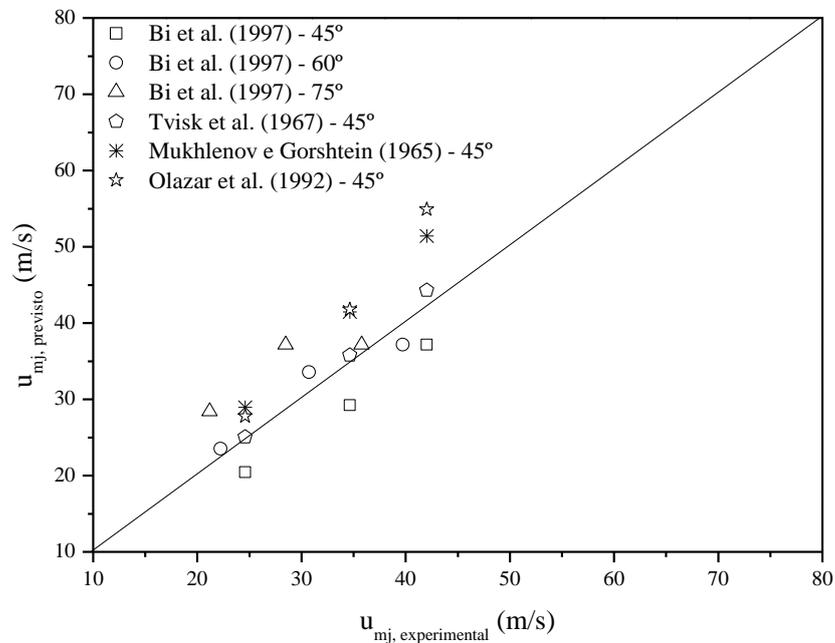
Em que H_B é a altura da base cônica e H_0 é a altura de leito estático.

Conforme pode ser verificado por meio da Figura 4.12, os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos para duas configurações distintas de leito de jorro: Cônico e cônico-cilíndrico.

Com o propósito de verificar a validade das correlações da literatura na determinação dos valores de u_{mj} para a faixa operacional estudada neste trabalho, utilizou-se as correlações apresentadas na Tabela 4.2.

Os dados de velocidade mínima de jorro previstos pelas correlações em função dos dados observados experimentalmente são apresentados na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a velocidade mínima de jorro.



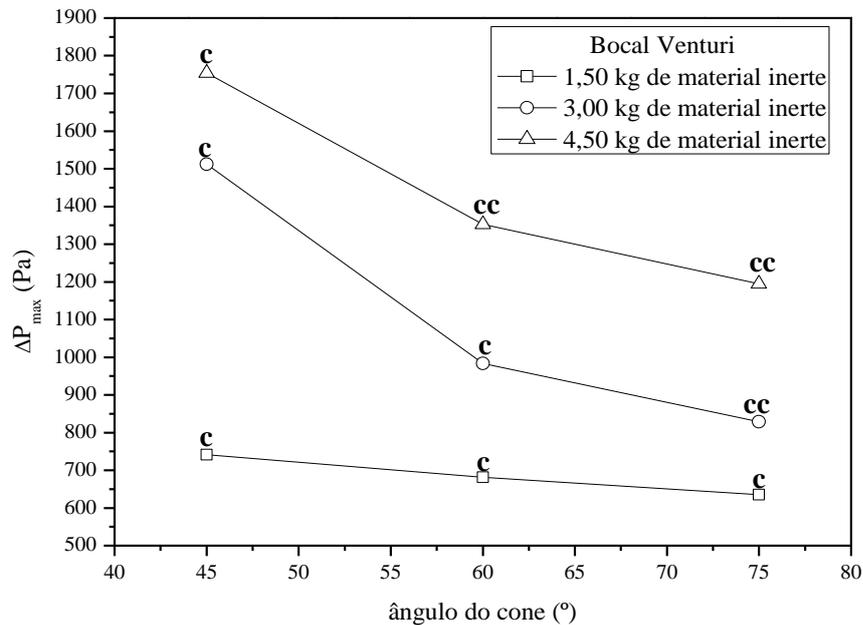
Fonte: Pessoal (2015)

Com base nos dados apresentados na Figura 4.13, verificou-se que a correlação que forneceu valores de velocidade mínima de jorro mais semelhantes aos obtidos experimentalmente para diferentes valores de massa de material inerte e ângulos de cone foi a equação proposta por Tsvik et al. (1967). As demais correlações da literatura não estimaram adequadamente os valores da velocidade mínima de jorro para todas as condições operacionais avaliadas neste item. Foi verificado ainda que a correlação de Tsvik et al. (1967) foi eficiente para a previsão dos valores de u_{mj} apenas quando utilizado o ângulo de cone de 45° , para os demais ângulos de cone não foram obtidos valores reais. Estes resultados

reafirmam que as correlações existentes na literatura ainda são limitadas, isto porque a faixa operacional na qual estas correlações se aplicam é muito restrita.

A Figura 4.14 traz a influência dos três valores de ângulo de cone estudados nos valores de queda de pressão máxima do leito, $\Delta P_{máx}$, parametrizada a massa de partículas sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C e bocal de entrada de ar do tipo Venturi.

Figura 4.14 – Valores médios de queda de pressão máxima do leito em função do ângulo do cone.



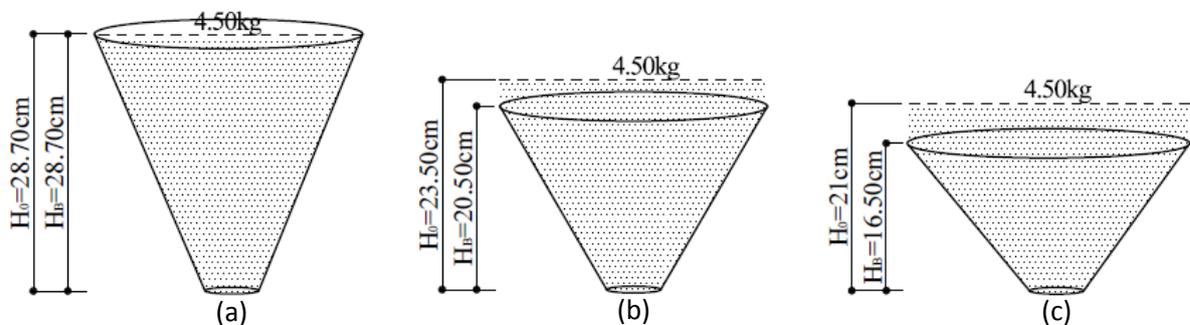
c – leito cônico e cc – leito cônico cilíndrico

Fonte: Pessoal (2014).

Com base nos dados apresentados na Figura 4.14, verificou-se uma diminuição expressiva dos valores de $\Delta P_{máx}$ com o aumento do ângulo de base cônica de 45° para 60° referente às operações em leito de jorro com massa de partículas inertes de 3,00 e 4,50 kg. No entanto, uma variação um pouco mais sutil de $\Delta P_{máx}$ com a modificação do ângulo de cone de 60° para 75° pôde ser constatada. Para as condições experimentais nas quais se utilizou estes valores de massa de material inerte, 3,00 e 4,50 kg, a variação do ângulo de cone inevitavelmente modificou a configuração de leito cônico para cônico-cilíndrico, uma vez que o aumento do ângulo diminui a altura da base cônica, permitindo que, para uma massa fixa de material inerte, a coluna cilíndrica também seja preenchida com as partículas sólidas, fazendo com que a variação do valor de H_0 entre estas configurações seja distinta.

Tomando como exemplo na análise a massa fixa de partículas de 4,50 kg (Figura 4.15), a modificação do ângulo de cone de 45° para 60° apresenta uma diferença de altura de 5,20 cm. Por outro lado, modificando-se o ângulo de 60° para 75°, a diferença de altura é menor, equivalendo a 2,50 cm. Essas diferenças sugerem, mais uma vez, que o aumento da altura de leito estático influencia significativamente na queda de pressão máxima do leito. Isso implica que uma maior energia é necessária para promover o rompimento do leito de partículas e ocasionar a formação do canal de jorro, refletindo diretamente numa perda de carga maior para o menor ângulo de cone utilizado (45°). A estrutura, neste e também nos demais casos, é semelhante a de um leito fixo e a partícula passa a ter contato íntimo com as vizinhanças. O conjunto de partículas é distribuído de maneira relativamente uniforme no interior do leito de modo que este se mantém estático na região anular ao escoar uma determinada vazão do gás entre os interstícios formados entre as partículas, ocasionando a perda de energia por atrito (contato fluido-partícula) e as perdas cinéticas, maiores para o leito de maior altura de partícula. Já para a operação em leito de jorro com 1,50 kg de material inerte, a modificação do ângulo do cone não influenciou na configuração de leito utilizada (leito cônico). Desta maneira, a variação de altura de leito estático foi proporcional com o aumento do ângulo do cone e, como consequência, o decréscimo dos valores de $\Delta P_{máx}$ foi praticamente linear. É importante ressaltar que os resultados obtidos podem estar relacionados com outros fatores além da altura de leito estático, como por exemplo, a força de sustentação da parede.

Figura 4.15 – Massa de material inerte e suas respectivas alturas de leito estático para cada ângulo de cone estudado: (a) leito cônico com ângulo de cone de 45°, (b) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 60° e (c) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 75°.



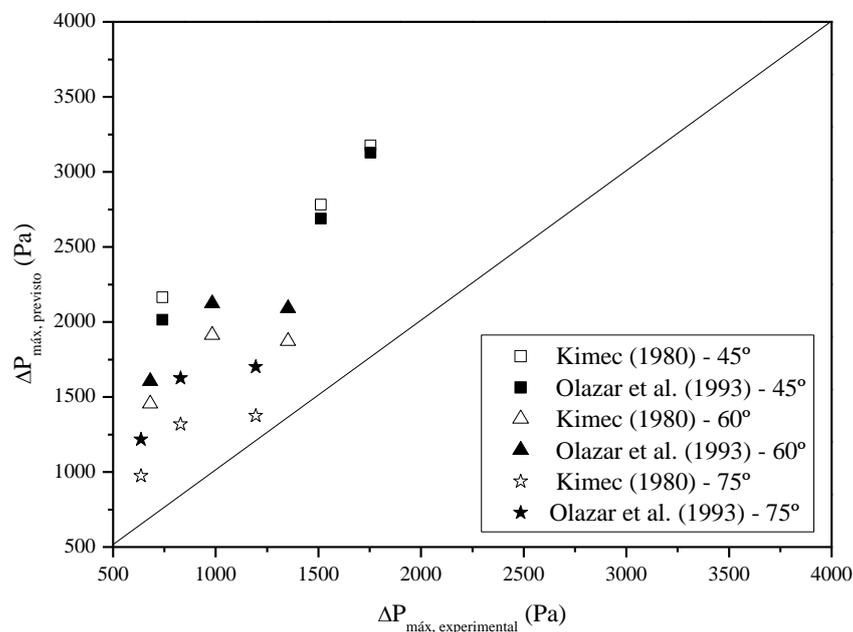
Fonte: Pessoal (2015).

Em que H_B é a altura da base cônica e H_0 a altura de leito estático.

Na literatura ainda existe uma escassez de trabalhos referentes ao efeito do ângulo de base cônica na fluidodinâmica do leito de jorro para massa fixa de material inerte. Os trabalhos encontrados abordam o efeito do ângulo do cone apenas para altura fixa de leito estático, nos quais podem ser citados Mathur e Epstein (1974), Rodrigues (1993), Alzibar et al. (2014) e Bi (2011). Em geral, estes trabalhos apresentaram resultados opostos aos obtidos neste trabalho, tendo em vista que para um valor fixo de altura de leito estático, um aumento do ângulo de cone eleva a massa de material inerte utilizada para o preenchimento do equipamento, assim maiores valores de $\Delta P_{máx}$ são requeridos para a ruptura e movimentação do leito de partículas.

De modo a verificar a validade das correlações da literatura na determinação dos valores de $\Delta P_{máx}$ para a faixa operacional estudada neste trabalho, utilizou-se as equações apresentadas anteriormente na Tabela 4.4. A comparação entre os valores da queda de pressão máxima do leito obtidos experimentalmente e os valores fornecidos pelas correlações da literatura é apresentada na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão máxima do leito.



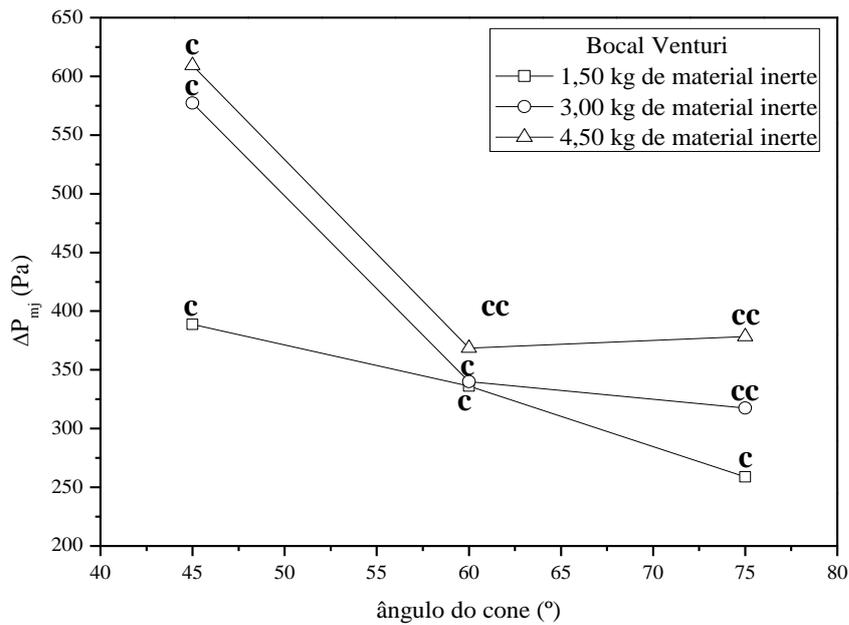
Fonte: Pessoal (2015)

Baseado nos resultados apresentados na Figura 4.16, constatou-se que as correlações da literatura testadas neste trabalho para a previsão dos valores da queda de pressão máxima do leito não foram eficientes para estimar os dados experimentais. Estes

resultados reafirmam as limitações destas correlações para a previsão dos valores $\Delta P_{m\acute{a}x}$. Isto porque os valores fornecidos por estas equações em geral foram superestimados.

A Figura 4.17 mostra os valores médios de queda de jorro estável, ΔP_{mj} , parametrizada a massa de partículas, sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C e bocal de entrada de ar do tipo Venturi.

Figura 4.17 – Valores médios de queda de pressão de jorro estável em função do ângulo do cone.



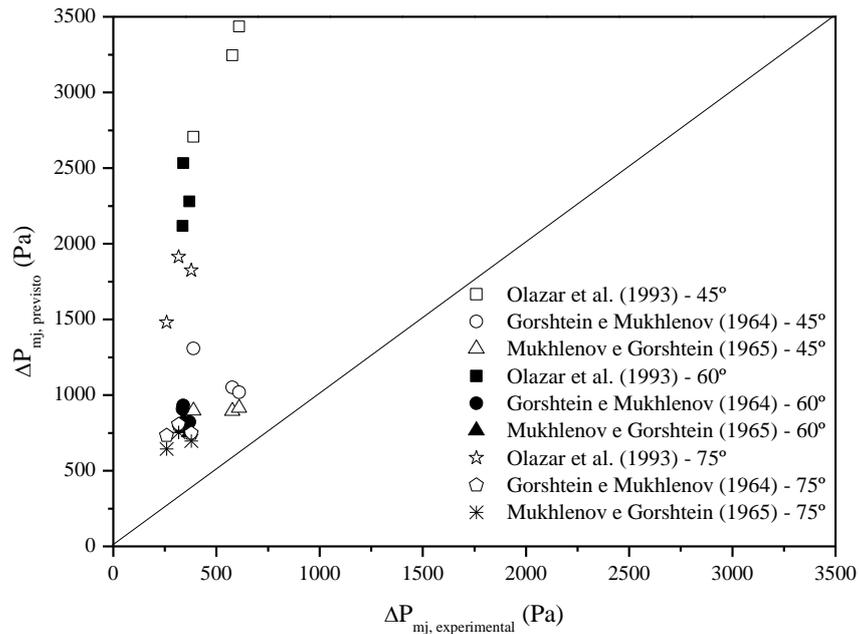
c – leito cônico e cc – leito cônico cilíndrico

Fonte: Pessoal (2014).

O comportamento de ΔP_{mj} com relação ao ângulo de cone, apresentado na Figura 4.17, é similar aos resultados apresentados na Figura 4.14 para as operações em leito de jorro utilizando-se 3,00 e 4,50 kg de partículas, ou seja, ocorre uma diminuição brusca da queda de pressão com o aumento do ângulo do cone até um valor de 60°. Após este valor, é mínima a influência do aumento do ângulo do cone em ΔP_{mj} . Assim como discutido anteriormente, uma diferença importante neste caso é que o meio não se apresenta mais como um leito fixo, no qual a resistência é imposta sobre o ar em escoamento, mas sim há a resistência no regime de transporte pneumático (resistência no canal de jorro, no transporte em fase diluída) e há a resistência no regime de leito deslizante (resistência na região anular), a qual é caracterizada pelo movimento descendente das partículas em contra-corrente com o gás descendente (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

As correlações da literatura apresentadas anteriormente na Tabela 4.5 também foram testadas para a previsão dos valores de queda de pressão de jorro estável para o leito com diferentes valores de ângulos de cone. A comparação entre os valores de ΔP_{mj} obtidos experimentalmente e os previstos pelas correlações da literatura são apresentados na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Dados experimentais e previstos pelas correlações para a queda de pressão de jorro estável.



Fonte: Pessoal (2015)

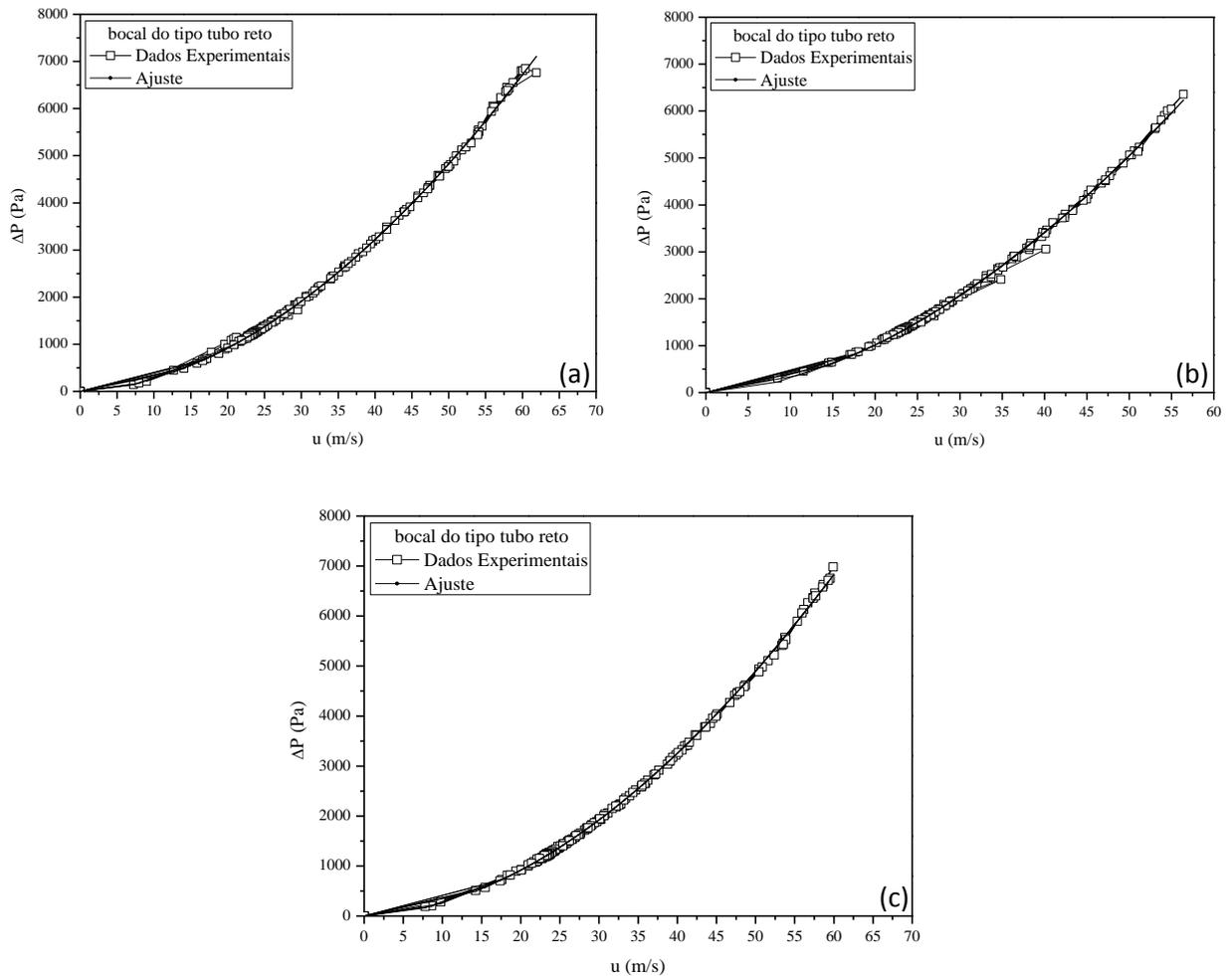
Os resultados apresentados na Figura 4.18, mostraram que as correlações da literatura testadas neste trabalho para a previsão dos valores da queda de pressão de jorro estável também não foram capazes de prever adequadamente os dados experimentais. Estes resultados reafirmam a limitação destas correlações para a previsão dos valores ΔP_{mj} , tendo em vista que os valores preditos foram superestimados.

4.1.2.3 Influência da Geometria do Bocal de Entrada de Ar

Neste item, é apresentado um estudo do efeito que a geometria do bocal de entrada de ar exerce na fluidodinâmica do leito de jorro. Para isso, foram empregadas duas configurações distintas de bocal de entrada de ar: bocal do tipo Venturi e bocal tipo tubo reto, conforme descrito anteriormente no Capítulo 3.

A caracterização fluidodinâmica do leito vazio, "teste em branco", para o leito de jorro com o bocal de entrada de ar do tipo tubo reto, diferentes ângulos de cone e temperatura do ar de entrada de 100°C é apresentada nas Figuras 4.19a, 4.19b e 4.19c.

Figura 4.19 - Queda de pressão no leito de jorro vazio em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.



Fonte: Pessoal (2014).

Assim como conduzido anteriormente para o bocal do tipo Venturi (item 4.1), os dados obtidos por meio dos testes em branco foram ajustados a uma função representada pela Equação 3.1. O ajuste dos dados obtidos durante a caracterização fluidodinâmica da unidade experimental sem a presença de partículas inertes para o bocal de entrada de ar do tipo tubo reto, temperatura do ar de 100°C e ângulos de cone de 45°, 60° e 75° é apresentado na Tabela 4.6.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.6 verificou-se que, a função utilizada apresentou bom ajuste aos dados experimentais, visto que os coeficientes de determinação, R^2 , para todas as configurações de leito empregadas foram próximos a unidade.

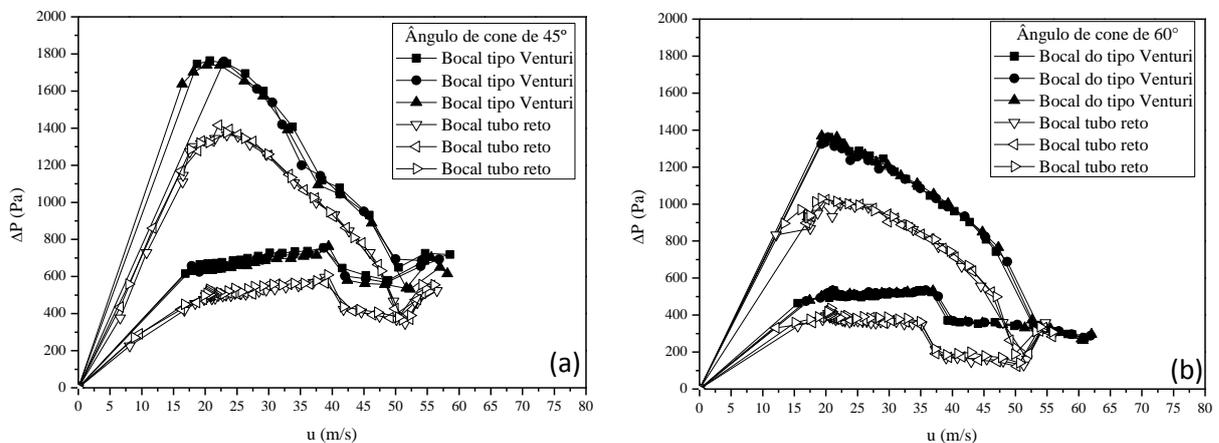
Tabela 4.6 – Ajuste dos dados obtidos por meio dos testes em branco.

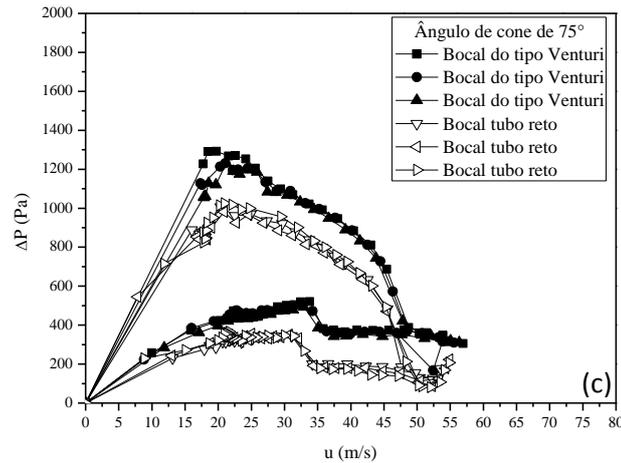
Ângulo do Cone (°)	Função Potência	R^2	Equação
45	$\Delta P = 4,02u^{1,81}$	0,9993	(4.15)
60	$\Delta P = 5,37u^{1,75}$	0,9988	(4.16)
75	$\Delta P = 3,80u^{1,83}$	0,9996	(4.17)

Fonte: Pessoal (2014).

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro com a presença de partículas inertes foi conduzida apenas para um valor fixo de massa de material inerte (4,50 kg), visto que a influência da geometria do bocal de entrada de ar empregando diferentes valores de massa de material inerte já foi previamente estudada por Bitti (2012). Com a finalidade de verificar a reprodutibilidade dos dados experimentais e determinar ainda valores médios da queda de pressão e da velocidade do ar na condição de mínimo jorro, o procedimento experimental para ambas as geometrias de bocal de entrada foi conduzido em triplicata. As Figuras 4.20a, 4.20b e 4.20c apresentam dados de queda de pressão do leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada, sob as condições de 4,50 kg de partículas inertes, temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo tubo reto e ângulos de cone de 45°, 60° e 75°, respectivamente.

Figura 4.20 - Queda de pressão no leito de jorro em função da velocidade do ar de entrada: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.





Fonte: Pessoal (2014).

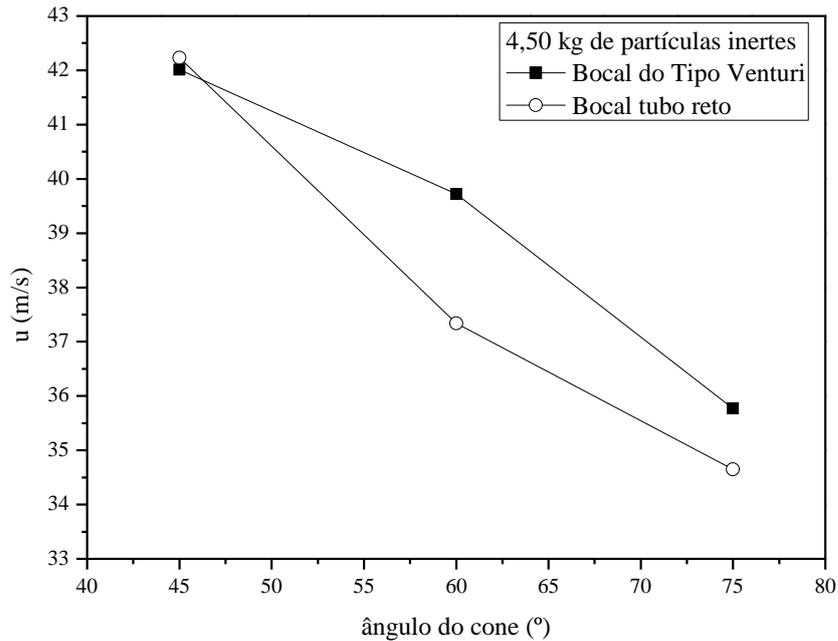
Com base nos dados apresentados nas Figuras 4.20a, 4.20b e 4.20c, constatou-se que todas as curvas apresentaram um comportamento típico de leito de jorro. Os resultados obtidos mostraram nitidamente o efeito significativo da geometria do bocal de entrada de ar no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, principalmente no que se refere à queda de pressão de jorro estável e máxima do leito. Uma melhor análise destes resultados pode ser obtida com base nos valores médios de velocidade mínima de jorro, queda de pressão máxima do leito e queda de pressão de jorro estável, conforme apresenta-se a seguir.

A Figura 4.21 apresenta os valores médios da velocidade mínima de jorro em função do ângulo do cone, parametrizada a geometria do bocal de entrada de ar sob as condições de 4,50 kg de material inerte e temperatura do ar de entrada de 100°C.

Conforme os dados apresentados na Figura 4.21, constatou-se que os valores de velocidade mínima de jorro, u_{mj} , foram mais elevados quando utilizado o bocal de entrada de ar do tipo Venturi para todas as configurações de leito, com exceção do ângulo de 45°, em que os valores de u_{mj} foram muito semelhantes. Isto porque, a principal função do bocal de entrada de ar é aumentar a velocidade do fluido, por meio da diminuição da seção transversal do escoamento de ar, bem como direcionar o fluido de modo a diminuir as perdas de carga. Entretanto, o bocal tubo reto apresenta uma brusca redução da área de escoamento de ar o que provoca turbulência na entrada do bocal, porém a vazão de ar que sai do bocal é direcionada principalmente para a região central do leito (Figura 4.22a), facilitando a ruptura do leito de partículas e formação do canal de jorro. Assim, a vazão de ar necessária para manter o leito na condição de mínimo jorro é menor. Por sua vez, o bocal de entrada de ar do tipo Venturi promove uma contração e expansão gradual da seção de escoamento de ar. Isto reduz a

turbulência na entrada do leito, porém a expansão da área na saída do bocal funciona como um difusor na base do leito e, como consequência, além da direção central, o ar também é direcionado para as laterais da base cônica (Figura 4.22b). Desta forma, é necessária uma maior vazão de ar para manter a movimentação dos inertes.

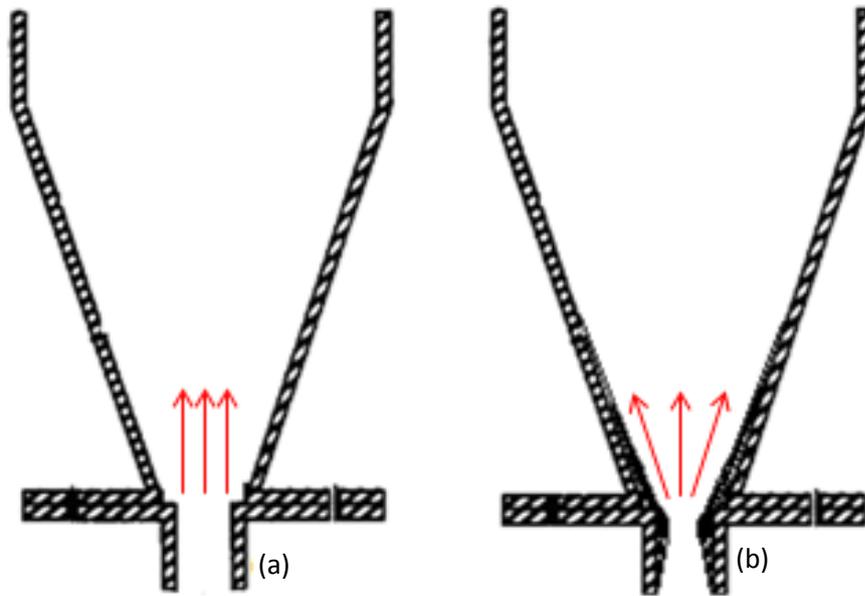
Figura 4.21 – Valores médios de velocidade mínima de jorro em função do ângulo do cone, para diferentes tipos de bocal de entrada de ar.



Fonte: Pessoal (2014).

Por outro lado, os valores de u_{mj} foram muito semelhantes para ambos os bocais de entrada de ar quando empregado o ângulo de cone de 45°. Isto porque, esta configuração de base cônica possui paredes menos inclinadas em relação à vertical, e, portanto a distância da parede (posição $r = 0$) é menor quando comparado aos demais ângulos de cone estudados. Assim o ar que seria distribuído em direção às laterais (bocal Venturi) fica mais próximo da região central do leito de partículas. Deste modo, os valores de u_{mj} para ambos os bocais foram similares quando empregado o ângulo de cone de 45°. É válido ressaltar que a configuração de leito utilizada para o ângulo de cone de 45° foi cônica, diferente das demais bases cônicas no qual foi utilizada configuração de leito cônico-cilíndrica.

Figura 4.22 – Esquema da distribuição de ar no interior do leito de jorro: (a) tubo reto e (b) Venturi.



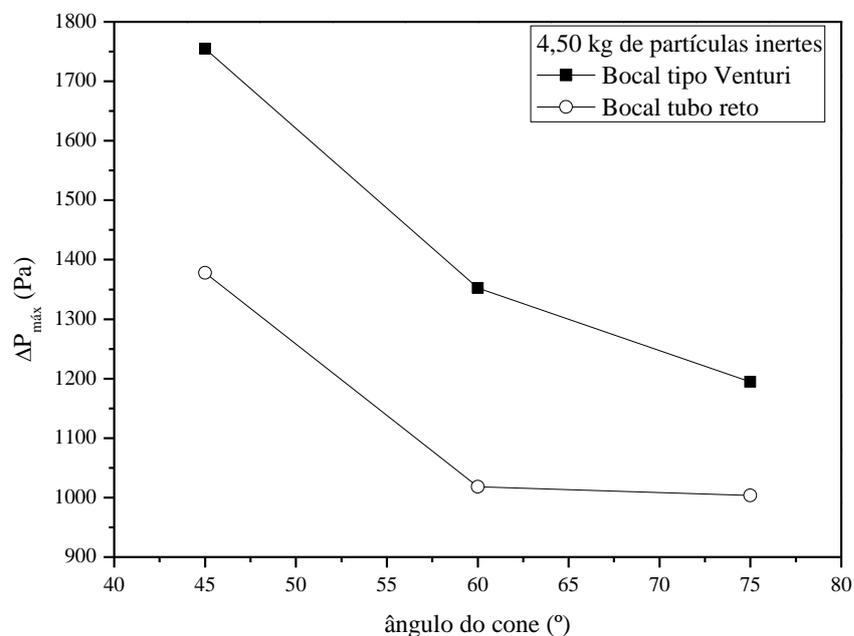
Fonte: Pessoal (2014).

Na literatura, é possível encontrar diversos trabalhos que avaliam o efeito do bocal de entrada de ar na fluidodinâmica do leito de jorro, dos quais podem ser citados (OLAZAR et al., 1992; SALAM e BHATTACHARYA, 2006; BITTI, 2012, ALTZIBAR et al., 2013). Entretanto, em sua maioria, estes trabalhos estudaram a influência do diâmetro do orifício de entrada de ar. Altzibar et al. (2013), por exemplo, relataram que um aumento no diâmetro do orifício de entrada de ar proporcionou uma diminuição significativa nos valores de u_{mj} . Já Bitti (2012) avaliou o efeito da geometria do bocal de entrada de ar na velocidade mínima de jorro empregando os mesmos bocais utilizados neste estudo. Entretanto, foram empregados valores distintos de massa de material inerte, ângulo fixo de base cônica de 60° e esferas de vidro como partículas inertes. Foi verificado que, para as condições operacionais empregadas, a geometria do bocal de entrada de ar não exerceu efeito expressivo, visto que os valores de u_{mj} foram similares para ambos os bocais estudados. Isto mostra que outros fatores, como o tipo e a quantidade de partículas inertes utilizada, também interferem no efeito que o bocal de entrada de ar exerce nos valores de velocidade mínima de jorro. Salam e Bhattacharya (2006) também verificaram uma dependência das condições de operação nos valores de velocidade mínima de jorro. Os autores avaliaram o efeito da geometria do bocal de entrada de ar na velocidade mínima de jorro, para isso utilizaram um bocal de jato central e um bocal circular com fenda. Foi constatado que, para uma dada altura de leito de partículas e

diâmetro de entrada de ar, os valores de velocidade mínima de jorro foram muito mais elevados para o bocal circular com fenda do que para o bocal com jato central. Porém, quando era aumentada a altura do leito de partículas ou a área de entrada de ar, os valores de u_{mj} para ambas as configurações de bocal de entrada de ar na entrada do leito tendiam ao mesmo valor. Isto porque o aumento da área de entrada de ar, eleva proporcionalmente o diâmetro do canal de jorro e aumenta a dissipação do ar na direção radial. Isso resulta em um aumento da velocidade mínima de jorro. Para o bocal circular com fenda, o aumento da área da fenda era obtido diminuindo o diâmetro interno, enquanto que o diâmetro externo era mantido constante. Uma pequena diminuição do diâmetro interno foi suficiente para dobrar a área da fenda. No entanto, a variação da área da fenda não exerceu muito efeito na área na interface jorro-ânulo, e como consequência, os valores de u_{mj} para o bocal de entrada de ar do tipo circular com fenda circular variaram pouco com o aumento da área da fenda.

A Figura 4.23 apresenta os valores médios da queda de pressão máxima do leito em função do ângulo do cone, parametrizada a geometria do bocal de entrada de ar sob as condições de 4,50 kg de material inerte e temperatura do ar de entrada de 100°C.

Figura 4.23 - Valores médios da queda de pressão máxima do leito em função do ângulo do cone para diferentes tipos de bocal de entrada de ar.



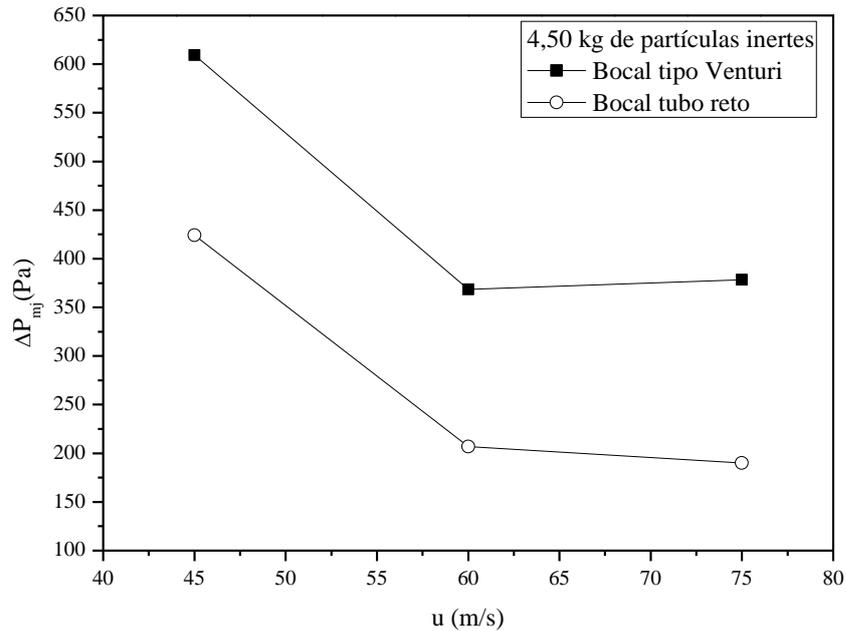
Fonte: Pessoal (2014).

Os dados apresentados na Figura 4.23 mostraram nitidamente que, para as condições operacionais estudadas, o bocal de entrada de ar exerceu efeito expressivo nos valores da queda de pressão máxima do leito, visto que foram obtidos valores mais elevados de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ quando empregado o bocal do tipo Venturi. A explicação para este comportamento é a mesma apresentada anteriormente para a velocidade mínima de jorro, em que devido a expansão da área na saída do bocal do tipo Venturi funcionar como um difusor de ar na base do leito, faz-se necessário uma maior energia para romper o leito de partículas e formação do canal de jorro. No entanto, verifica-se que os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ não foram semelhantes para o ângulo de base cônica de 45° , assim como observado anteriormente para os valores de u_{mj} . Isto possivelmente se deve ao fato de que, mesmo que esta configuração de leito (ângulo de cone de 45°) possua paredes menos inclinadas em relação a vertical e o ar seja direcionado mais ao centro do leito pelo bocal do tipo Venturi, uma mínima dissipação do ar na base do leito faz com que o ar perca pressão e não movimente as partículas. Assim, é necessária uma maior energia para romper o leito de partículas. Foi constatado ainda que os valores da queda de pressão máxima do leito para o bocal do tipo tubo reto apresentaram uma tendência similar a já discutida anteriormente para o bocal do tipo Venturi, em que os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ foram mais elevados para o menor ângulo de cone estudado (45°). Isto porque, considerando uma massa fixa de material inerte, a redução do ângulo de cone eleva a altura do leito de partículas e, como consequência maior energia é requerida para que o leito se comporte como um leito de jorro.

A Figura 4.24 apresenta os valores médios da queda de pressão de jorro estável em função do ângulo do cone, parametrizada a geometria do bocal de entrada de ar sob as condições de 4,50 kg de material inerte e temperatura do ar de entrada de 100°C .

Os dados apresentados na Figura 4.24 mostraram nitidamente que, para as condições operacionais estudadas, o bocal de entrada de ar também exerceu efeito expressivo nos valores da queda de pressão de jorro estável, visto que foram obtidos valores mais elevados de ΔP_{mj} quando empregado o bocal do tipo Venturi. A explicação para este comportamento é a mesma apresentada anteriormente para a velocidade mínima de jorro, em que devido à área de expansão na saída do bocal Venturi funcionar como um difusor de ar na base do leito, é necessário uma maior energia manter o leito na condição mínima de jorro.

Figura 4.24 – Valores médios de queda de pressão de jorro estável em função do ângulo do cone.



Fonte: Pessoal (2014).

Comportamento semelhante foi observado por Bitti (2012) para as mesmas configurações de bocal de entrada de ar, porém empregando condições de operação distintas. Salam e Bhattacharya (2006) relataram que, para uma dada altura de leito estático e diâmetro de partícula, os valores de ΔP_{mj} elevaram-se com o aumento da área de entrada de ar no caso do bocal de entrada de ar do tipo jato central, enquanto que para o bocal do tipo circular com fenda, os valores permaneceram praticamente constantes. Os dados apresentados na Figura 4.24 mostraram ainda que os valores de ΔP_{mj} apresentaram tendência semelhante para todos os ângulos de cone estudados.

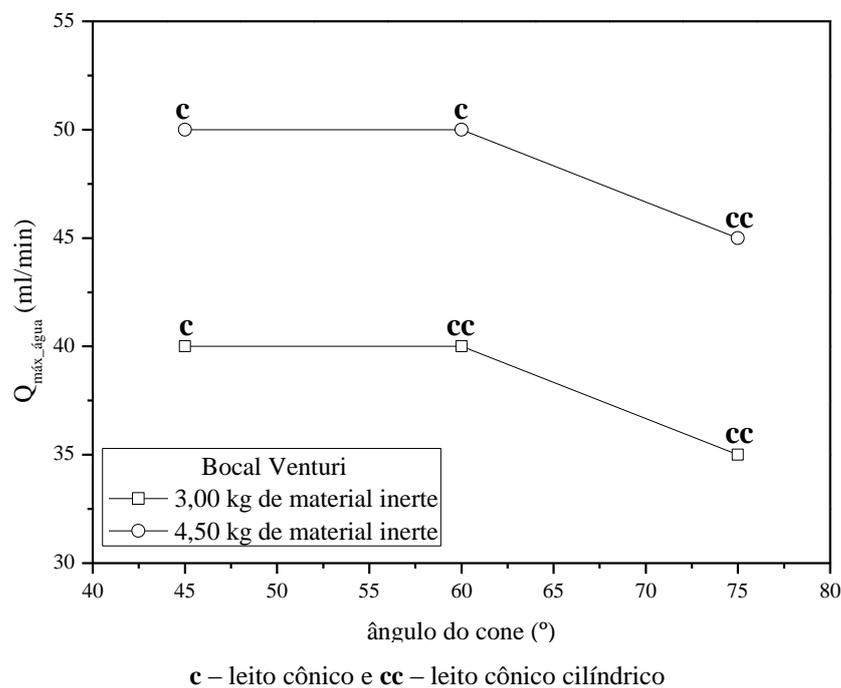
4.2 Evaporação de Água

O principal objetivo dos ensaios de evaporação de água foi obter um conhecimento prévio do comportamento do leito de jorro com a inserção de um fluido de “melhor comportamento” ao sistema, que por sua vez, permitiu obter a capacidade máxima de evaporação de água do leito de jorro nas condições operacionais testadas. A capacidade máxima de evaporação foi definida neste trabalho como sendo a vazão máxima de alimentação de água no qual foi possível operar o leito de jorro sem que este apresentasse

instabilidades ou entrasse em colapso. Para isso utilizou-se como “pasta ideal” a água destilada, a qual é o componente majoritário das pastas reais, 75 a 97% aproximadamente.

A Figura 4.25 apresenta a vazão máxima de alimentação de água destilada alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica, parametrizada a massa de material inerte sob as condições de temperatura do ar de entrada de 100°C, bocal de entrada de ar do tipo Venturi e velocidade do ar de entrada de $1,30u_{mj}$.

Figura 4.25 - Vazão máxima de alimentação de água alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica.



Fonte: Pessoal (2014).

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.25, verificou-se que, assim como para a fluidodinâmica do leito seco, a massa de material inerte também apresentou influência positiva sobre a vazão máxima de alimentação de água alcançada pelo leito de jorro, $Q_{m\acute{a}x_ \acute{a}gua}$. Para todos os ângulos de cone estudados, a capacidade de evaporação de água foi mais elevada para 4,50 kg de material inerte. A maior capacidade de evaporação de água com o aumento da massa de partículas se deve ao fato de que a pasta é atomizada no interior do leito sobre as partículas inertes já aquecidas, região onde ocorre a evaporação. Assim, um aumento da quantidade de partículas, eleva a área específica do leito e, como consequência, existe uma maior área de troca térmica e mássica disponível para a evaporação. Os resultados

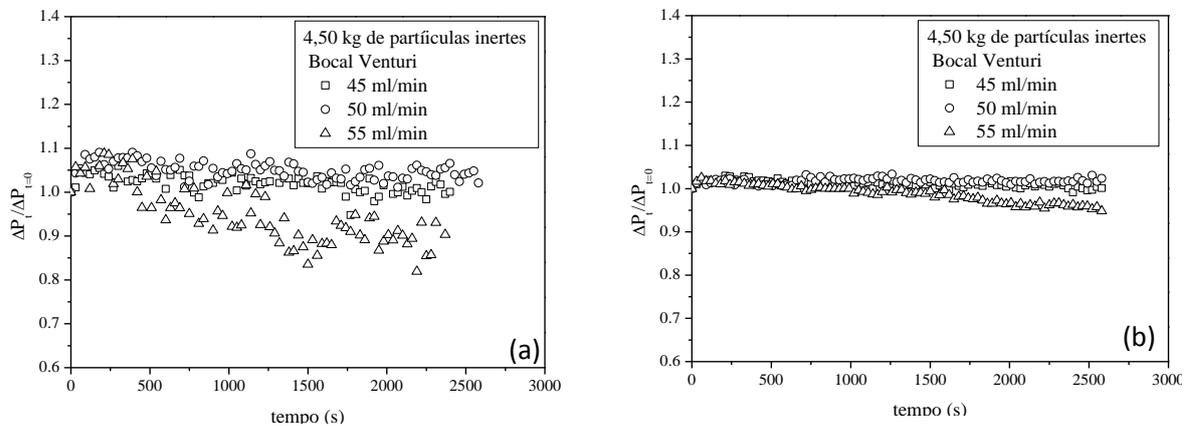
obtidos neste trabalho concordam com os dados observados por Almeida et al. (2010) e Bitti (2012).

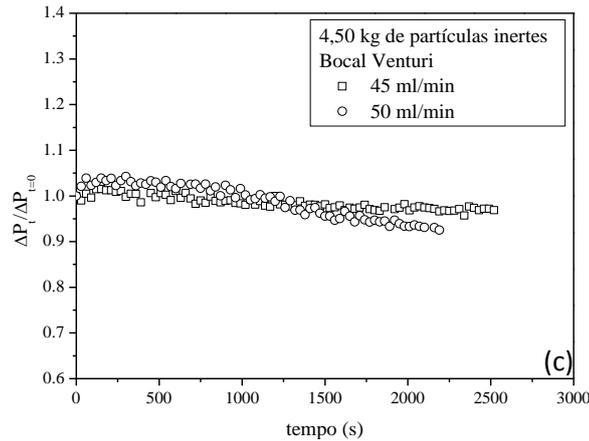
Os dados apresentados na Figura 4.25 mostraram ainda que, para ambos os valores de massa de material inerte, a vazão máxima de alimentação de água destilada alcançada pelo leito de jorro obteve uma pequena redução para as condições nas quais utilizou-se configuração de leito cônico-cilíndrica, representada pelas letras cc. Apesar da redução da capacidade de evaporação de água ter sido muito pequena, estes resultados sugerem que a configuração de leito cônica é a mais indicada para a secagem de pastas. Esta informação está de acordo com a literatura, que indica a configuração de leito cônico para a secagem de soluções e pastas (MUJUMDAR, 1984; OLAZAR, SAN JOSÉ e BILBAO, 2011).

As Figuras 4.26a, 4.26b e 4.26c apresentam o adimensional da queda de pressão do leito de jorro em função do tempo, parametrizado na vazão de alimentação de água destilada, sob as condições de 4,50 kg de material inerte, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Figura 4.26 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo para evaporação de água:

(a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.





Fonte: Pessoal (2014).

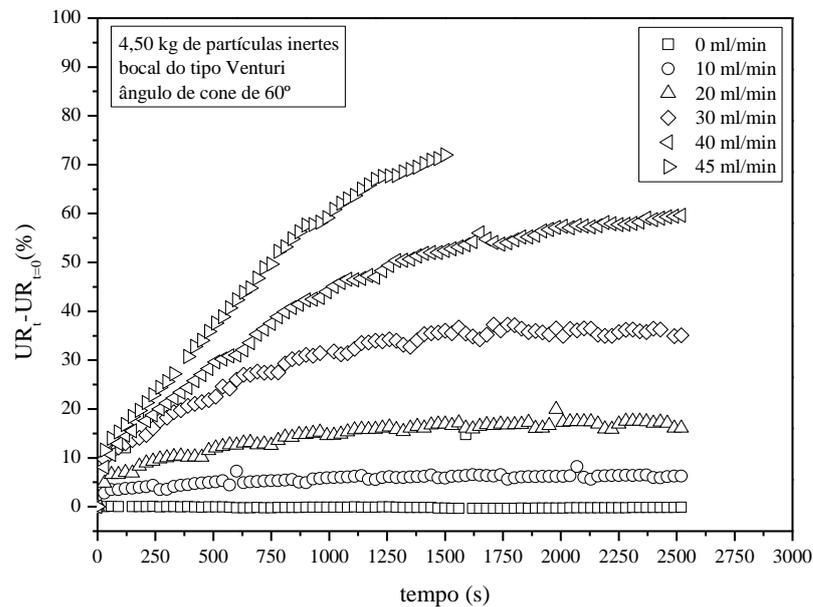
Os resultados apresentados nas Figuras 4.26a, 4.26b e 4.26c mostraram que o adimensional da queda de pressão, $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$, obtido para os ensaios de evaporação de água apresentou comportamento semelhante para todos os ângulos de cone, visto que os valores de $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ mantiveram-se constantes e em torno de 1 ao longo do tempo, com exceção das vazões de alimentação em que o leito de jorro entrou em colapso ou aproximou-se da saturação. Patel et al. (1986), Schneider e Brigwater (1993) relacionaram este comportamento com o fato de que, a medida que uma substância líquida ou pastosa é introduzida no interior do leito, a vazão do ar na região anular diminui. Deste modo, a queda de pressão total (jorro e ânulo) é reduzida face à canalização do ar preferencialmente para a região de jorro. O comportamento obtido neste trabalho está coerente com os trabalhos de Spitzner Neto (1997), Cunha (1999), Almeida (2009), Bitti (2012) e Nascimento (2013). Nesta seção não serão apresentados os resultados referentes ao adimensional da queda de pressão para diferentes valores de massa de material inerte, uma vez que o comportamento obtido foi similar ao apresentado nas Figuras 4.26a, 4.26b e 4.26c.

A Figura 4.27 apresenta os dados de umidade relativa em função do tempo para os ensaios de evaporação de água sob as condições de 100°C, $1,30u_{mj}$, 3,00 kg de material inerte, bocal de entrada de ar do tipo Venturi e ângulo de cone de 60°.

De acordo com os dados apresentados na Figura 4.27 verificou-se que os valores de umidade relativa elevaram-se até um valor em que o sistema atingiu o regime permanente, com exceção da vazão de alimentação de água de 45 mL/min, na qual o leito tornou-se instável e entrou em colapso. Constatou-se ainda que o tempo necessário para que o regime permanente fosse alcançado pelo sistema dependeu da vazão de alimentação de água

destilada. Conforme mostra a Figura 4.27 foram necessários aproximadamente 1750s para que o sistema atingisse o regime estacionário para uma vazão de alimentação de água de 30 mL/min e cerca de 2000s para 40 mL/min. Esta informação é importante para este tipo de processo, visto que, quando o regime permanente é alcançado, a taxa de recobrimento das partículas inertes se iguala à taxa de remoção do filme (FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2009). Os resultados obtidos estão em concordância com os trabalhos de Almeida (2009), Bitti (2012) e Nascimento (2013).

Figura 4.27 – Valores de umidade relativa em função do tempo para a evaporação de água.



Fonte: Pessoal (2014).

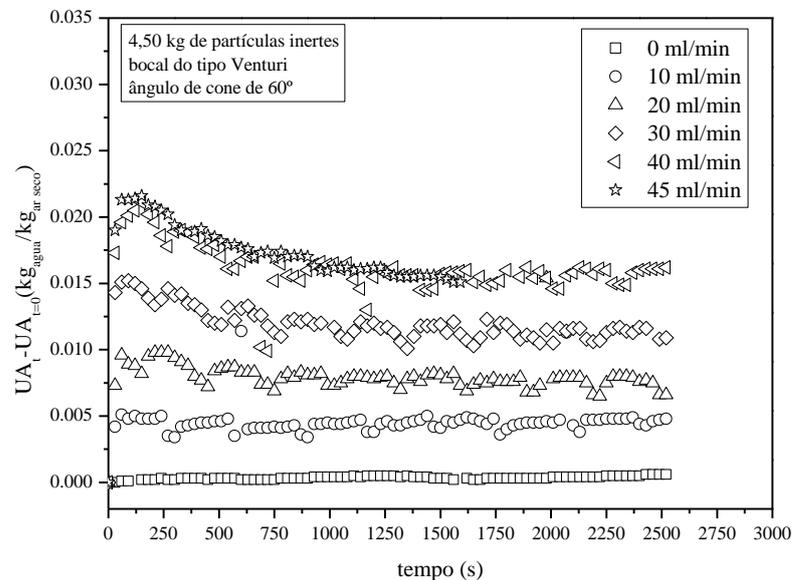
Os dados de umidade relativa para as demais condições experimentais não serão apresentados neste item, visto que estes apresentaram comportamento semelhante.

A Figura 4.28 apresenta os dados de umidade absoluta em função do tempo para os ensaios de evaporação de água sob as condições de 3,00 kg de material inerte, ângulo de cone de 60°, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C e 1,30u_{mj}, respectivamente.

Com base nos dados apresentados na Figura 4.28, constatou-se que no início dos ensaios de evaporação de água a umidade absoluta atingiu um valor máximo e diminuiu gradativamente com o tempo até alcançar o regime permanente (para vazões de alimentação de água maiores que 10 mL/min). Este comportamento foi evidenciado para as vazões de

alimentação mais elevadas. Nascimento (2013) atribuiu a este comportamento ao procedimento experimental adotado, visto que o leito de jorro seco foi mantido a uma dada temperatura e velocidade do ar de entrada até que o sistema atingisse o regime permanente, desta forma as partículas inertes apresentavam inicialmente temperatura próxima à temperatura do ar de entrada e ao inserir a pasta no sistema, além da energia fornecida pelo ar de secagem, também existia a energia interna das partículas inertes disponíveis para a secagem. Com o tempo a temperatura das partículas inertes tendeu à temperatura de bulbo úmido e rapidamente a umidade absoluta decresceu até que novamente atingisse o regime permanente. Resultados semelhantes foram apresentados por Almeida (2009) e Bitti (2012).

Figura 4.28: Valores de umidade absoluta em função do tempo para a evaporação de água.



Fonte: Pessoal (2014).

Os ensaios de evaporação de água apresentados neste item também foram úteis para determinação da condição experimental na qual seria realizada a secagem da pasta real (leite desnatado). Dentre os valores de massa de material inerte avaliados nos ensaios de evaporação de água (3,00 e 4,50 kg), verificou-se que a maior capacidade de evaporação de água do leito foi obtida quando utilizado 4,50 kg de material inerte para todas as configurações de leito estudadas. Desta forma, a secagem da pasta real foi conduzida apenas para 4,50 kg de partículas inertes e ângulos de cone de 45, 60 e 75°.

4.3 Secagem de Leite Desnatado

Os resultados apresentados nesta seção são referentes aos ensaios de secagem conduzidos utilizando leite desnatado como pasta real. Esta pasta foi selecionada por apresentar altos valores de queda de pressão durante a secagem em leito de jorro, conforme relatado por Almeida (2009) e Nascimento (2013). Altos valores da queda de pressão não são interessantes para o processo, uma vez que, representam um alto custo energético e, conseqüentemente, um sistema economicamente inviável. Desta forma, decidiu-se realizar experimentos de secagem de leite desnatado para diferentes configurações de base cônica 45, 60 e 75°, visto que estes autores utilizaram base cônica com ângulo fixo de 60°.

O principal objetivo deste estudo foi avaliar se uma modificação na configuração da base cônica inferior do leito possibilitaria uma melhora nos problemas encontrados durante a secagem deste tipo de pasta em leito de jorro.

A secagem de leite desnatado foi realizada tanto para um valor fixo de massa de material inerte quanto para altura fixa de leito estático, 4,50 kg e 23,50 cm, respectivamente. Optou-se por realizar a secagem do leite desnatado com 4,50 kg de material inerte, visto que foi a condição na qual foi alcançada a maior capacidade de evaporação de água, conforme apresentado no item 4.3.2. Com relação à altura de leito estático, optou-se por utilizar 23,50 cm, uma vez que foi a altura de leito estático que permitiu a operação do leito empregando os três ângulos de base cônica estudados neste trabalho em condições ainda estáveis.

4.3.1 Influência do Ângulo de Base Cônica

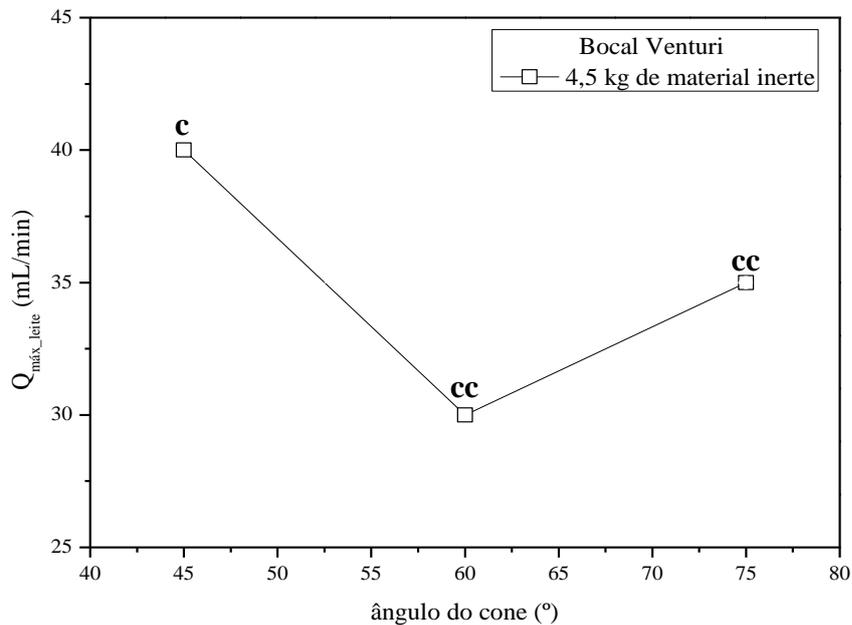
4.3.1.1 Massa Fixa de Material Inerte

A Figura 4.29 apresenta a vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica sob as condições de operação de 4,50 kg de material inerte, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C e 1,30u_{mj}, respectivamente.

A partir dos dados apresentados na Figura 4.29 foi possível constatar que a vazão máxima de alimentação de leite desnatado, $Q_{m\acute{a}x_leite}$, alcançada pelo leito de jorro para

cada ângulo de cone foi inferior à obtida empregando-se água destilada, $Q_{m\acute{a}x_\acute{a}gua}$ (Figura 4.25). Estes resultados estão coerentes com a literatura. De acordo com Rodrigues (1993), as pastas reais apresentaram taxas de evaporação em média 20 a 60% menores, em relação à água pura. Uma melhor análise sobre o efeito da pasta no processo de secagem em leito de jorro pode ser encontrada nos trabalhos de Pham (1983), Spitzner Neto (2001), Medeiros (2001), Almeida (2009) e Nascimento (2013).

Figura 4.29 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro.



c – leito cônico e cc – leito cônico cilíndrico

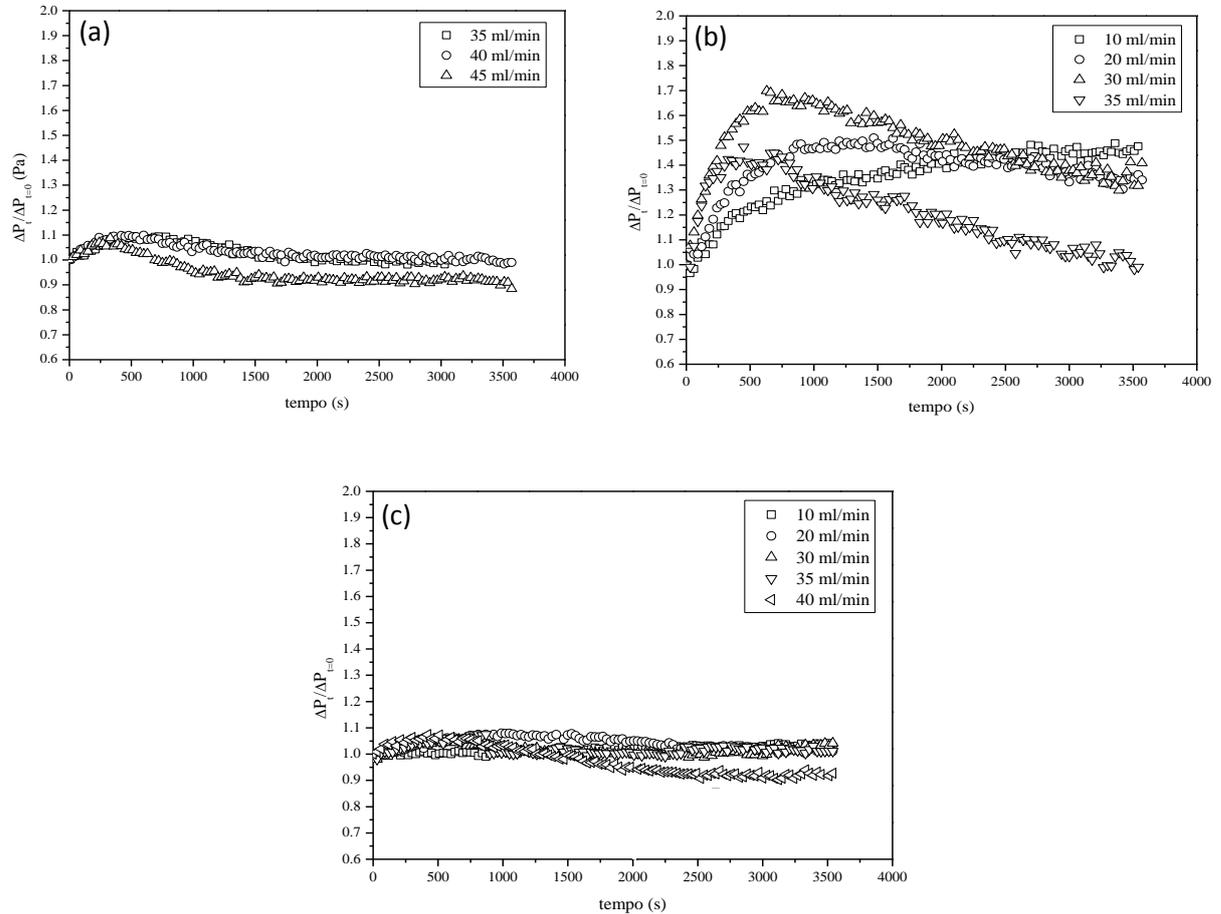
Fonte: Pessoal (2014).

Estes resultados mostraram ainda que a menor vazão de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito jorro foi obtida para o ângulo de cone intermediário (60°). Esperava-se que o pior desempenho do leito fosse obtido para o ângulo de cone de 75°, tendo em vista o grande número de pesquisas que utilizam o ângulo de cone de 60° para a secagem de pastas em leito de jorro, no qual podem ser destacados (RÉ, 1986; MORRIS, 1990; CORREIA, 1996; ALMEIDA, 2009 e NASCIMENTO 2013).

Uma melhor compreensão dos resultados apresentados pode ser obtida ao serem analisadas as Figuras 4.30a, 4.30b e 4.30c, onde é apresentado o adimensional da queda de pressão do leito de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado utilizando

4,50kg de material inerte, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e 1,30 u_{mj} , respectivamente.

Figura 4.30 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo para 4,50 kg de material inerte, 100°C e 1,30 u_{mj} : (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.



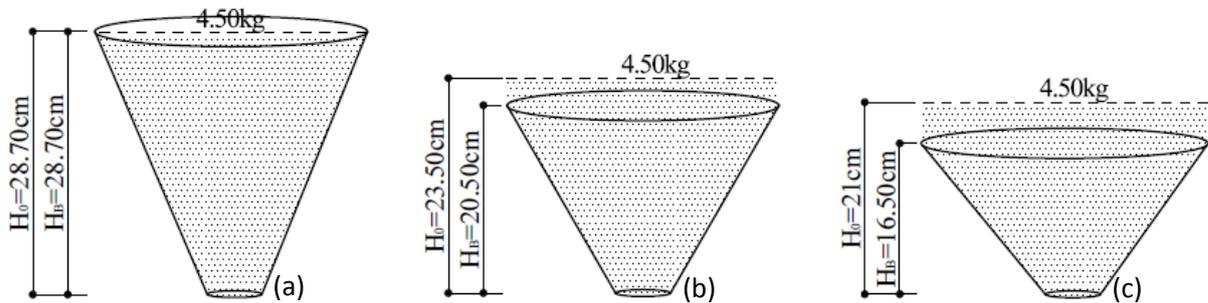
Fonte: Pessoal (2014).

Os resultados apresentados nas Figuras 4.30a, 4.30b e 4.30c mostraram nitidamente que, para as condições operacionais testadas, o ângulo de cone de 60° obteve valores mais elevados do adimensional da queda de pressão no leito, $\Delta P_t / \Delta P_{t=0}$, quando comparado aos demais ângulos de base cônica estudados. O valor máximo de $\Delta P_t / \Delta P_{t=0}$ para 60° foi aproximadamente 1,70 enquanto que para os demais ângulos de cone, este não passou de 1,10. Os elevados valores do adimensional da queda de pressão proporcionados pelo ângulo de cone de 60° já eram esperados, visto que, estes resultados confirmam o comportamento já observado anteriormente por Almeida (2009) e Nascimento (2013) durante a secagem de leite desnatado em um leito de jorro com ângulo de base cônica de 60°, coluna

cilíndrica de 50 cm de diâmetro, 100 cm de altura e partículas de polietileno de 4,38 mm de diâmetro e massa específica de $930,5 \pm 0,3 \text{ kg/m}^3$. Nascimento (2013) atribuiu este comportamento ao fato de que, a ausência de gordura do leite desnatado e a presença do açúcar causaram dificuldade de circulação dos inertes, acúmulo de pasta na superfície das partículas, e por consequência elevaram os valores de $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$. Devido aos problemas observados por estes autores durante a secagem do leite desnatado em um leito de jorro com base cônica de 60° , decidiu-se realizar a secagem de leite desnatado para diferentes configurações de base cônica, tendo em vista a escassez de informações sobre a secagem de pastas para diferentes configurações de leito de jorro. Entretanto, os resultados obtidos foram contrários ao esperado, uma vez que o ângulo de 75° proporcionou ao leito maior estabilidade e capacidade de secagem em relação a base cônica de 60° . Foi possível verificar, por meio da Figura 4.30^a, que o adimensional da queda de pressão utilizando o ângulo de cone de 45° sofreu um aumento sutil nos instantes iniciais da secagem do leite desnatado e que ao longo da secagem tendeu a 1, com exceção da vazão de alimentação de leite desnatado de 45 mL/min, vazão na qual o leito de jorro entrou em colapso. Comportamento muito semelhante foi constatado utilizando o ângulo de base cônica de 75° . O adimensional da queda de pressão apresentado pelos ângulos de 45° e 75° para a secagem de leite desnatado foi muito semelhante ao obtido nos ensaios de evaporação de água apresentado anteriormente no item 4.2. Estes resultados mostraram que, para essas configurações de base cônica, o processo de secagem não sofreu forte influência da composição da pasta. A princípio pode parecer incoerente que o ângulo de cone de 75° proporcione ao leito maior estabilidade durante a secagem do leite desnatado do que o ângulo de cone de 60° , entretanto algumas hipóteses podem ser feitas.

Trabalhou-se com massa fixa de material inerte de 4,50 kg, o que inevitavelmente nos fez operar com leitos de jorro com configurações distintas, uma vez que os ângulos de cone foram variados. A secagem foi conduzida em configuração de leito cônico para o ângulo de 45° e cônico-cilíndrico para os ângulos de cone de 60° e 75° , conforme mostram as Figuras 4.31a, 4.31b e 4.31c. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, o comportamento do leito foi avaliado separadamente para cada configuração de leito utilizada.

Figura 4.31 – Configurações de leito utilizadas para a secagem do leite desnatado: (a) leito cônico com ângulo de cone de 45°, (b) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 60° e (c) leito cônico-cilíndrico com ângulo de cone de 75°.



Fonte: Pessoal (2015).

Em que H_B é a altura da base cônica e H_0 a altura de leito estático.

Preliminarmente referindo-se ao leito de jorro cônico com ângulo de cone de 45°, acredita-se que seu bom desempenho neste caso deveu-se, principalmente, ao fato de se ter utilizado unicamente leito de configuração cônica e ângulo de cone inferior a 60°, pois, segundo a literatura, esta configuração possui a característica intrínseca de favorecer elevadas taxas de circulação de inertes, proporcionando um bom contato gás-sólido (OLAZAR, SAN JOSÉ e BILBAO, 2011) e uma melhor aeração anular (PASSOS et al., 1997). Isso porque, em evidências experimentais obtidas por Romankov et al. (1971), para ângulos de cone maiores que 20°, o canal de jorro possui uma concentração reduzida de partículas sólidas e também uma intensa mistura de partículas, as quais se movem rapidamente para baixo ao longo das paredes. Essa característica de leito é mantida até um valor de ângulo de cone de aproximadamente 40°. Acima deste valor, a agitação e a velocidade descendentes das partículas são reduzidas e tendem a diminuir com o aumento do ângulo do cone. A redução da velocidade e movimentação das partículas deve-se, possivelmente, à característica mais inclinada em relação a vertical da parede da base cônica, o que faz com que haja a formação de regiões estagnadas de partículas sólidas na base do leito, conforme observado por Mathur e Epstein (1974), Lim e Grace (1987) e He, Lim e Grace (1992). Reforçando estes resultados, Elperin et al. (1967), descrito em Mathur e Epstein (1974), verificaram que para leitos cônicos com ângulos de cone entre 40-45°, a taxa de circulação dos sólidos no leito foi maximizada e Olazar, San José e Bilbao (2011) relataram que ângulos de cone maiores que 60° não são recomendados, visto que apresentam taxa de circulação de inertes baixa, principalmente para leitos com grande quantidade de partículas. Com relação ao tempo de circulação das

partículas no interior do leito, San José et al., (2004) verificaram que em leitos cônicos, o aumento do ângulo do cone de 30° para 120° promoveu um aumento no tempo de circulação dos sólidos, de 3,68 para 7,64s, o que vem a ressaltar que, para leitos cônicos com ângulo de cone elevado, a velocidade das partículas tende a diminuir, dificultado a agitação e a circulação dos inertes.

Dessa forma, acredita-se que ocorra um maior número de colisões entre as partículas e a maior agitação no interior do leito de jorro cônico (com ângulo de cone de 45°). Devido aos efeitos de sua elevada circulação, a adesão entre as partículas e a formação de aglomerados, foram minimizados, favorecendo o processo de secagem da pasta estudada por meio do aumento da capacidade de secagem e proporcionando menores valores do adimensional da queda de pressão, o que confere maior estabilidade ao leito. Um fator determinante é que a taxa de circulação de sólidos define o tempo necessário para que os inertes sejam novamente recobertos (FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2009), equilibrando a taxa de remoção e recobrimento das partículas no leito para o ângulo de cone de 45°.

Mathur e Epstein (1974), por outro lado, recomendam que o limite de ângulo de cone para a obtenção de um jorro estável é de aproximadamente 40°, visto que quando o ângulo de cone apresenta inclinação da parede praticamente vertical, isto é, ângulos de cone muito pequenos, o jorro torna-se instável, uma vez que todo o leito de partículas tende a ser levantado pelo jato de gás. O limite mínimo de ângulo de cone é 28°, conforme sugerido por Olazar, San José e Bilbao (2011).

É interessante o fato de que a capacidade de secagem do leite desnatado foi menor para os leitos com configuração cônico-cilíndrica (Figuras 4.30b e 4.30c) quando comparada com a configuração cônica (Figura 4.30a). Estes resultados são reforçados a partir de informações obtidas na literatura, que indicam a configuração de leito cônico para a secagem de pastas, como por exemplo, os trabalhos de Mujumdar (1984), Olazar, San José e Bilbao (2011) e Povrenovic et al. (1992). Mujumdar (1984) ressaltou que a configuração de leito cônica com altura aproximadamente igual ao diâmetro da coluna cilíndrica é especialmente indicada para a secagem de pastas com altas taxas de alimentação, uma vez que leitos cônicos apresentam a vantagem de poder ser operado com elevados valores de velocidade de ar caso sejam necessárias elevadas taxas de transferência. Olazar, San José e Bilbao (2011), por sua vez, verificaram que, apesar da versatilidade de operação do leito de jorro convencional (cônico-cilíndrico), existem situações na qual o contato gás-sólido não é

inteiramente satisfatório. Assim, para a secagem de suspensões, soluções e materiais pastosos no qual o contato gás-sólido é de extrema importância, a configuração de leito cônico tem sido sugerida pela literatura para ser utilizada. Em adição, Povrenovic et al. (1992) mencionaram em seu trabalho que a vantagem de se utilizar leitos de jorro cônicos é a sua operação com menores valores de queda de pressão e de velocidade do gás na região anular em relação ao leito cônico-cilíndrico, o que permite sua aplicação em maior escala.

No que se refere aos resultados apresentados nas Figuras 4.30b e 4.30c, surge a questão de que o ângulo de cone de 75° proporcionou ao leito maior estabilidade e maior capacidade de secagem em relação ao ângulo de cone de 60° , o que a princípio, iria contradizer o que foi discutido até o momento a respeito da secagem do leite desnatado. Entretanto, todas as discussões apresentadas referem-se a apenas leitos de jorro cônicos, não podendo ser atribuída a mesma análise para os resultados apresentados nas Figuras 4.30b e 4.30c.

Para bases retas e bases cônicas que possuem paredes mais inclinadas em relação a vertical, como é o caso dos ângulos de cone de 60° e 75° investigados neste trabalho, ocorre a formação de zonas mortas de sólidos, isto é, regiões na base do leito no qual não há virtualmente movimentação das partículas (MATHUR e EPSTEIN, 1974; LIM e GRACE, 1987; HE, LIM e GRACE, 1992; GREEN e BRIDWATER, 1983; SAN JOSÉ et al., 1996 e TAKEUCHI, WANG e RHODES, 2004). A partir das evidências experimentais obtidas nestes trabalhos, foi possível atribuir a instabilidade do leito de jorro para o ângulo de 60° durante a secagem do leite desnatado, esta caracterizada pelos elevados valores de adimensional de queda de pressão, à formação de regiões com partículas estagnadas entre o canal de jorro e a parede da base cônica, nas quais a velocidade das partículas é próxima a zero. Acredita-se, dessa forma, que estas zonas de estagnação podem ser interpretadas como um conjunto de partículas que estão submetidas a uma força de arraste de baixa intensidade, ocasionada por uma velocidade muito pequena do gás nessa região de instabilidade, resultando em uma menor quantidade de partículas em movimento no leito, fato este também influenciado pelas características de adesividade do leite desnatado (ausência de gordura) durante a secagem do leito de jorro. Em complemento às informações sobre a formação de zonas mortas na base do leito, Takeuchi et al. (2008) verificaram, por meio de simulação de linhas de corrente, que a distribuição do ar no interior do leito de jorro ocorre de forma distinta para cada configuração de base de leito utilizada. Para uma base reta, por exemplo, o

gás tende a se espalhar em direção radial e um vórtice é formado na base do leito. Já para uma base cônica com paredes menos inclinadas em relação à vertical, o gás flui ao longo da superfície cônica e as linhas de corrente são aproximadamente paralelas umas das outras. Estas informações frisam o fato de que, para ângulos de cone com paredes mais inclinadas em relação à vertical, existe um menor fluxo de ar na base do leito, o que ocasiona a formação de zonas de estagnação, conforme já discutido anteriormente.

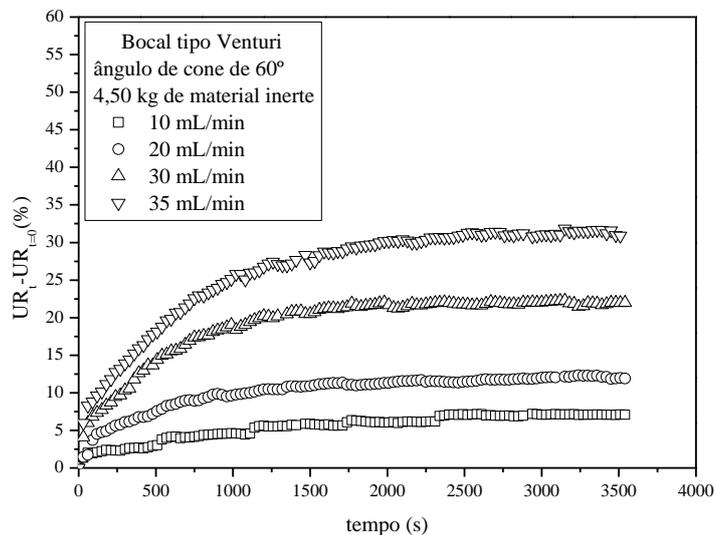
Com base nas discussões realizadas até o momento, acredita-se que durante a secagem de leite desnatado em leito de jorro com ângulo de cone de 75° também houve a formação de zonas mortas na base do leito, visto que, esta base cônica possui paredes mais horizontais do que o cone com ângulo de 60° . Os valores do adimensional da queda de pressão obtidos para esta configuração de leito (Figura 4.30c), no entanto, mostraram justamente o contrário, isto é, uma estabilidade do sistema, apesar de não ter sido alcançada uma elevada taxa de alimentação de leite desnatado. O fato é que a formação de zonas mortas, que a princípio poderia ser um problema para o processo de secagem de pastas, pode ter sido compensada (equilibrada) pelo fato de ter sido utilizada a configuração de leito cônico-cilíndrica. Isso porque, esse tipo de configuração favorece uma elevada taxa de circulação de sólidos e velocidade das partículas acima do cone, proporcionando uma maior agitação das partículas e minimizando o efeito de adesividade do leite desnatado. Possivelmente, na região acima do cone, há uma intensa transferência de momento entre o ar em escoamento ascendente e as partículas, o que favorece sua aceleração e também uma forte energia de colisão entre as mesmas. As zonas mortas possuem baixa interação com o fluido face à pequena troca de momento nessa região. Convém ressaltar que o número de colisões entre as partículas define a “eficiência da secagem”, pois segundo Barret e Fane (1990), o número de colisões efetivas deve ser suficientemente elevado para que a taxa de remoção do filme não seja excedida pela taxa de recobrimento de pasta. Caso contrário, a quantidade de material úmido no jorro aumentará e a circulação das partículas poderá ser interrompida devido à aglomeração (FREIRE, FERREIRA e FREIRE, 2009), o que possivelmente ocorreu com o ângulo de cone de 60° no qual a circulação não foi suficiente para garantir a estabilidade do leito.

A velocidade vertical das partículas, próxima à parede da coluna cilíndrica, é apenas um pouco menor do que a velocidade próxima ao canal de jorro para o mesmo nível horizontal, segundo Mathur e Epstein (1974). Assim, a velocidade das partículas na parede

pode ser considerada como uma aproximação para a velocidade média das partículas no leito e, portanto, um indicador da taxa de circulação de sólidos para uma determinada altura da coluna, diferente da base do leito, onde a velocidade das partículas próxima à parede é próxima a zero (formação de zonas mortas). Ainda segundo Mathur e Epstein (1974), acima do cone, a taxa de circulação de sólidos aumenta linearmente com a altura do leito de partículas na coluna cilíndrica. Dessa maneira, a taxa de circulação máxima de sólidos é simplesmente aquele valor determinado no topo do leito, na coluna cilíndrica. Tal agitação das partículas nessa região compensa a dificuldade de circulação dos sólidos na base do leito, ocasionada pela camada de estagnação. Mathur e Epstein (1974) verificaram que a circulação das partículas na região da coluna cilíndrica é elevada com o aumento do ângulo de cone, o que justifica a maior estabilidade do leito de jorro operando com o ângulo de cone de 75° em relação ao ângulo de cone de 60° .

A Figura 4.32 apresenta os dados de umidade relativa do leito em função do tempo para a secagem de leite desnatado utilizando 4,50 kg de material inerte, ângulo de cone de 60° , bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Figura 4.32 - Valores de umidade relativa do leito de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado com ângulo de cone de 60° .



Fonte: Pessoal (2014).

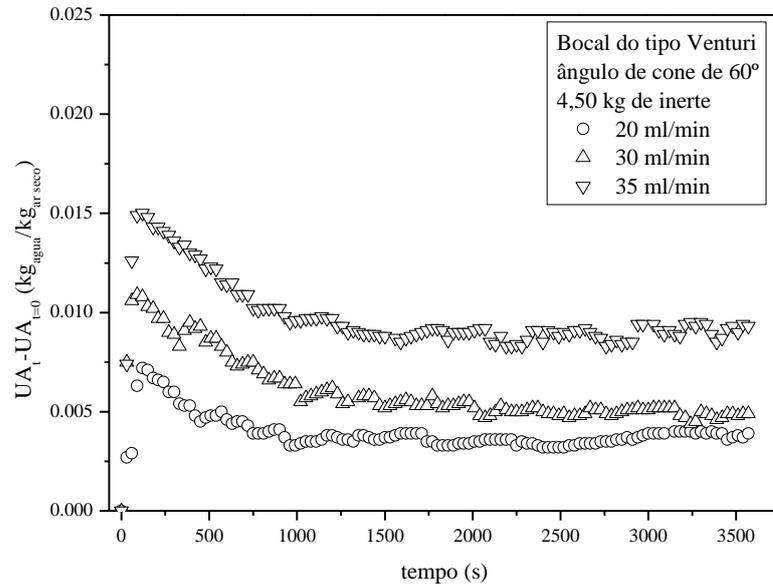
Os resultados apresentados na Figura 4.32 mostraram que, assim como observado para os ensaios com água destilada, os dados de umidade relativa para o leite

desnatado elevaram-se até alcançar um valor máximo quando o regime permanente é alcançado. Quando é dado início o processo de secagem de pastas em leite de jorro e se inicia a transferência de umidade contida no filme líquido (depositado na superfície da partícula) na forma de vapor para a corrente de ar, a umidade relativa da fase gasosa aumenta em regime transiente até atingir um patamar que indica a entrada no estado estacionário. O patamar máximo de umidade é atingido para a maior vazão de pasta empregada (35 mL/min) devido a uma maior quantidade de vapor d'água transferida para a fase gasosa, ocasionado sua maior saturação. Além disso, foi verificado que para o leite desnatado os valores máximos de $UR_t - UR_{t=0}$ foram inferiores quando comparados aos obtidos para a água destilada. Para o leite desnatado, a umidade relativa máxima obtida foi em torno de 20% e para a água destilada sob as mesmas condições operacionais o valor máximo foi de 50%. Isto mostra a dependência dos valores de umidade relativa não só com a vazão de alimentação da pasta, mas também com o tipo de pasta empregada. Segundo Nascimento (2013), este baixo aproveitamento do seu potencial de secagem é um dos grandes problemas apresentados pelo leite de jorro, dificultando a sua aplicação em escala industrial. Comportamento semelhante também foi observado por Almeida (2009).

A Figura 4.33 apresenta os dados de umidade absoluta do leite em função do tempo para a secagem de leite desnatado utilizando 4,50 kg de material inerte, ângulo de cone de 60°, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Os dados apresentados na Figura 4.33 mostraram que, assim como observado anteriormente nos ensaios de evaporação de água, os dados de umidade absoluta foram alcançados nos primeiros instantes da secagem e diminuíram até atingir novamente o regime permanente. A explicação para este comportamento é a mesma apresentada anteriormente no item 4.2 para a água destilada. Foi verificado ainda que este comportamento foi mais evidenciado para as vazões de alimentação de pasta mais elevadas. Nascimento (2013) relacionou este comportamento com a quebra brusca dos valores de temperatura no sistema, quando vazões de alimentação de pasta mais elevadas são aplicadas.

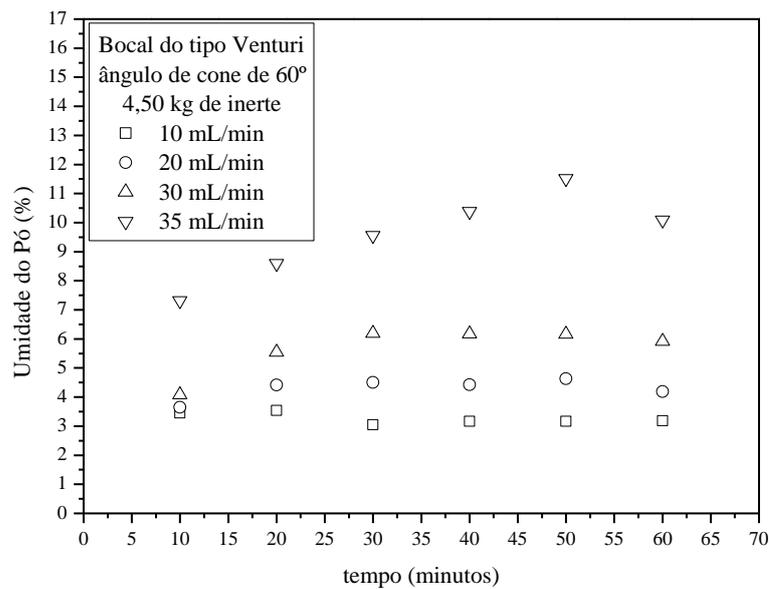
Figura 4.33 - Dados de umidade Absoluta do leite de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado com ângulo de cone de 60°.



Fonte: Pessoal (2014).

A Figura 4.34 apresenta os dados de umidade do pó de leite desnatado em função do tempo sob as condições de 4,50 kg de material inerte, ângulo de cone de 60°, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Figura 4.34 - Dados de umidade do leite desnatado em pó em função do tempo para ângulo de cone de 60°.



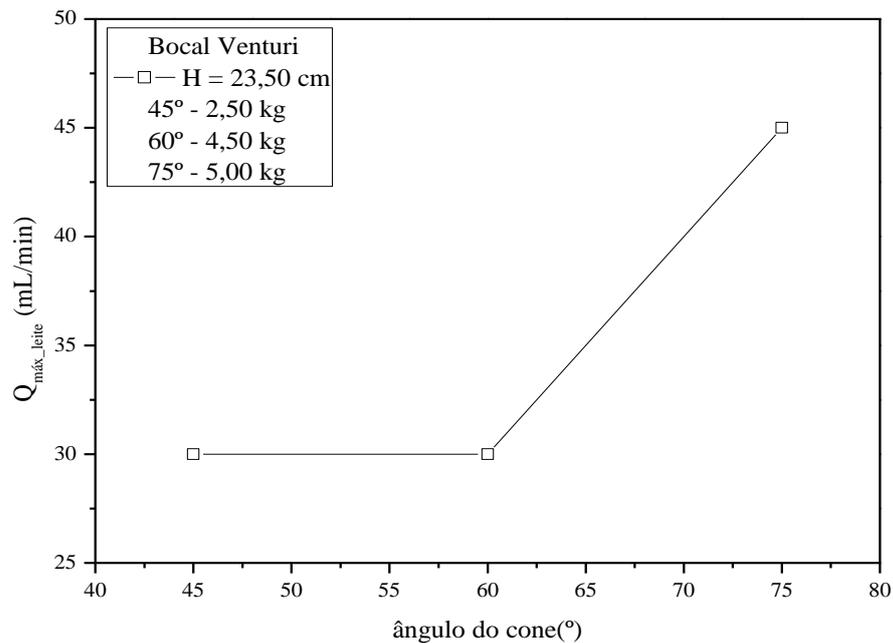
Fonte: Pessoal (2014).

Com base nos dados apresentados na Figura 4.34, constatou-se que a umidade do pó apresentou variação pouco significativa ao longo de praticamente todo o procedimento experimental, com exceção apenas da condição na qual o leito entrou em colapso, neste caso 35 mL/min. Estes resultados apresentam concordância com os dados apresentados por Almeida (2009) e Nascimento (2013).

4.3.1.2 Altura Fixa de Leito Estático

A Figura 4.35 mostra a vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica para altura fixa de leito estático de 23,50 cm, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C e 1,30u_{mj}, respectivamente.

Figura 4.35 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de base cônica.



Fonte: Pessoal (2014).

Conforme mostram os resultados apresentados na Figura 4.35, a vazão máxima de alimentação de leite desnatado, $Q_{máx_leite}$, alcançada pelo leito de jorro, teve um aumento de 15 mL/min utilizando o ângulo de 75° quando comparado aos demais ângulos de cone em que os valores de $Q_{máx_leite}$ mantiveram-se constantes. Estes resultados são justificados pelo fato de

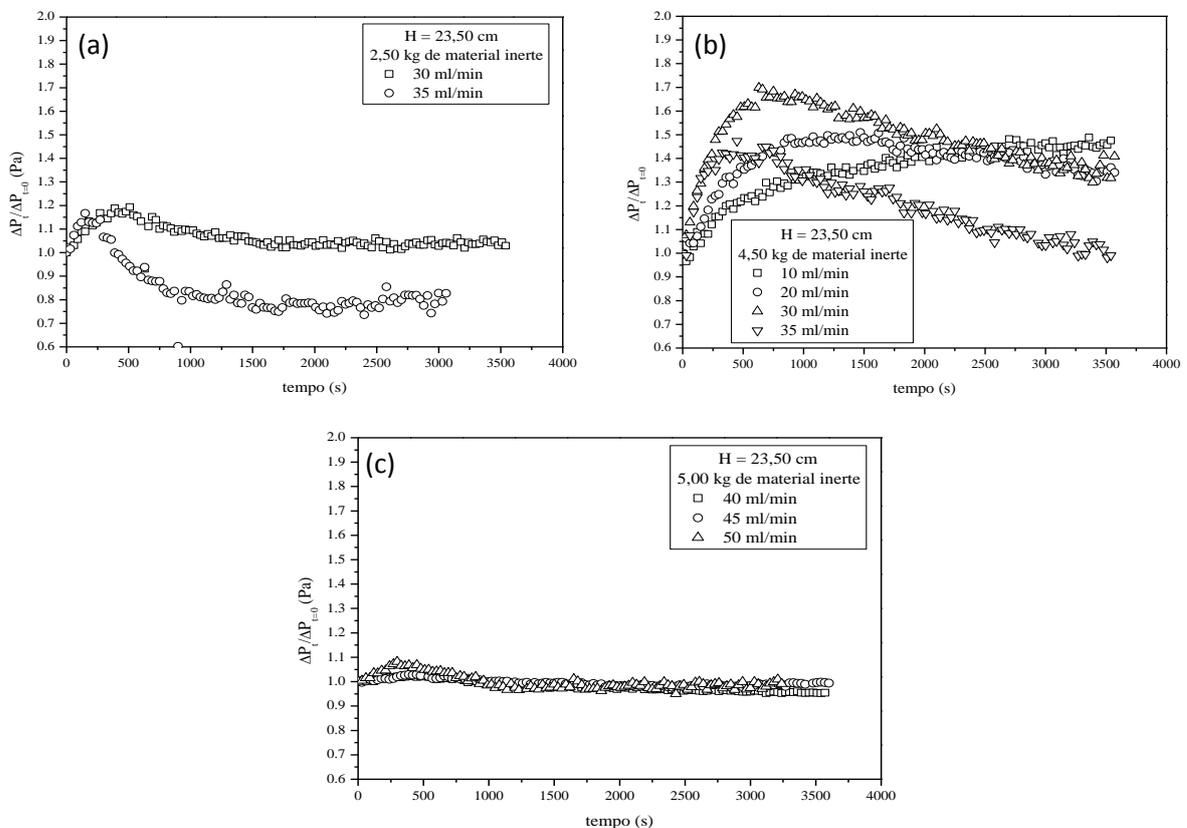
que, para um valor fixo de H_0 , a diminuição do ângulo do cone representa uma menor quantidade de partículas no interior do leito e, como consequência, há uma menor área específica para receber o filme líquido. Em concordância a estes resultados, Rodrigues (1993) constatou que a taxa de evaporação de água elevou-se com o aumento do ângulo do cone. Este comportamento foi justificado pelo fato de que, para uma altura fixa de leito de partículas, uma variação no ângulo do cone acarreta um aumento da massa de partículas no leito, e conseqüentemente aumenta a sua área específica. Desta forma, como a evaporação ocorre na superfície das partículas, um aumento desta área específica acarreta uma elevação da vazão máxima de alimentação de água. Entretanto, os resultados mostraram que, mesmo com uma carga maior de material inerte, o ângulo de 60° apresentou capacidade de secagem igual ao ângulo de 45° . Estes resultados reforçam o que foi obtido anteriormente, no qual o ângulo de cone de 60° não foi satisfatório para a secagem de leite desnatado em leito de jorro. É importante ressaltar que, como o processo de secagem de pastas em leito de jorro é complexo e envolve diversas variáveis de operação, não pode-se afirmar que os resultados apresentados neste trabalho para a secagem do leite desnatado sejam os mesmos para um outro tipo de pasta, material inerte ou dimensões de leito. Quanto ao ângulo de cone de 75° , é oportuno salientar que o leito de jorro está operando na configuração cônico-cilíndrico e, conforme discutido anteriormente, a elevada circulação dos inertes no topo do leito favorece a secagem do leite desnatado para esta configuração, possibilitando trabalhar com maiores vazões de alimentação de pasta.

As Figuras 4.36a, 4.36b e 4.36c mostram o adimensional da queda de pressão do leito de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado utilizando 23,50 cm de leito estático, bocal de entrada de ar do tipo Venturi, temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Os resultados apresentados mostraram mais uma vez que, o ângulo de cone de 60° apresentou elevados valores do adimensional da queda de pressão, enquanto que os ângulos de 45° e 75° foram muito mais estáveis durante a secagem do leite desnatado. Os resultados mostraram ainda que, para uma altura fixa de leito estático, o ângulo de cone de 75° foi o mais estável, visto que os valores de $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ mantiveram-se constantes e em torno de 1, tendo uma elevação sutil apenas no início da secagem. Para o ângulo de cone de 45° , este comportamento também foi observado, porém os valores de $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ foram um pouco mais elevados nos primeiros instantes da secagem. Possivelmente, isto se deve ao fato de que,

mesmo que haja um elevado número de colisões entre as partículas, controlado pela taxa de circulação dos sólidos, a quantidade de material inerte utilizada para o ângulo de 45° diminuiu sua capacidade de secagem, não sendo suficiente para o leito operar com elevadas vazões de pasta. Estes resultados vêm a complementar as discussões apresentadas anteriormente para a secagem de leite desnatado em diferentes ângulos de cone para uma massa fixa de inertes. Assim, está claro que a quantidade de partículas inertes no interior do leito exerce efeito expressivo na capacidade e na estabilidade do leito de jorro.

Figura 4.36 - Adimensional da queda de pressão no leito de jorro em função do tempo: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.



Fonte: Pessoal (2014).

De acordo com o que foi apresentado até o momento, verificou-se que para a análise do efeito do ângulo de base cônica na secagem de pastas em leito de jorro, foi mais eficiente conduzir os experimentos para massa fixa de material inerte, visto que desta forma é possível trabalhar com diferentes configurações de base cônica com mesma carga de partículas. Já para uma altura fixa de leito estático, a massa de material inerte pode variar

significativamente com a modificação do ângulo do cone e desta forma os resultados obtidos são atribuídos à quantidade de inerte utilizada e não ao efeito real que o ângulo do cone pode causar durante a secagem de pastas em leito de jorro.

Neste item não são apresentados os resultados referentes à umidade relativa, umidade absoluta e umidade do pó de leite desnatado, visto que os resultados obtidos foram similares aos apresentados para a secagem do leite desnatado empregando massa fixa de material inerte mostrados anteriormente no item 4.3.1.2.

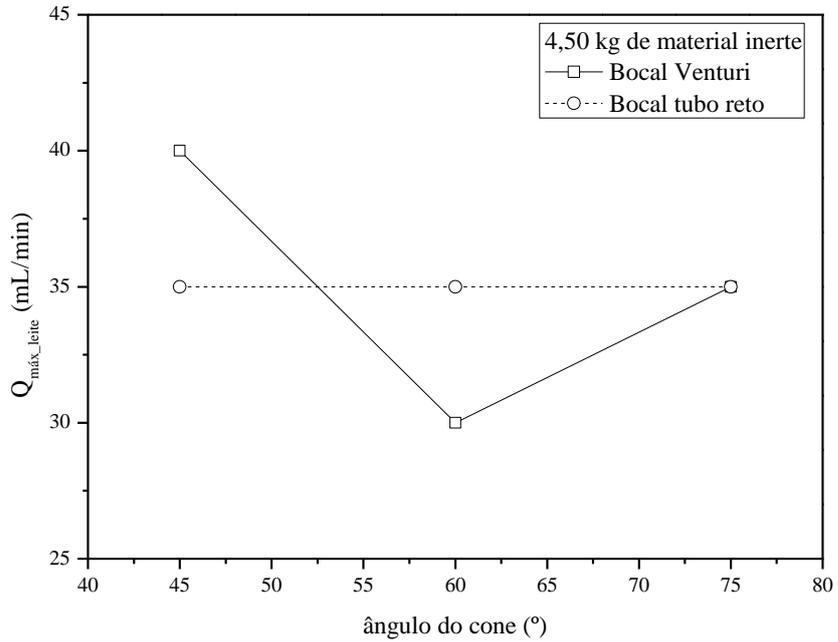
4.3.2 Influência da Geometria do Bocal de Entrada de Ar

Neste item, é apresentado um estudo do efeito que a geometria do bocal de entrada de ar exerceu no processo de secagem de pastas em leito de jorro. Para isso, foram empregadas duas configurações distintas de bocal de entrada de ar: bocal do tipo Venturi e bocal tipo tubo reto, conforme descrito anteriormente no Capítulo 3.

A Figura 4.37 apresenta a vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leito de jorro em função do ângulo de cone parametrizado o bocal de entrada de ar sob as condições de 4,50 kg de material inerte, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C, $1,30u_{mj}$, respectivamente.

Os resultados apresentados na Figura 4.37 mostraram que para as condições operacionais testadas, a geometria do bocal de entrada de ar apresentou efeito expressivo sobre o processo de secagem de pastas em leito de jorro, visto que para o bocal do tipo Venturi foi observado uma modificação da capacidade de secagem do leite desnatado conforme com o ângulo do cone empregado. Já, para o bocal tubo reto foram obtidos valores constantes da vazão máxima de alimentação do leite desnatado alcançados pelo leito, independente do ângulo de base cônica utilizado. Estes resultados mostram mais uma vez que o processo de secagem em leito de jorro é bastante complexo, em que uma série de variáveis está envolvida na operação na qual há uma forte interação entre os mecanismos de transporte de quantidade de movimento, calor e massa.

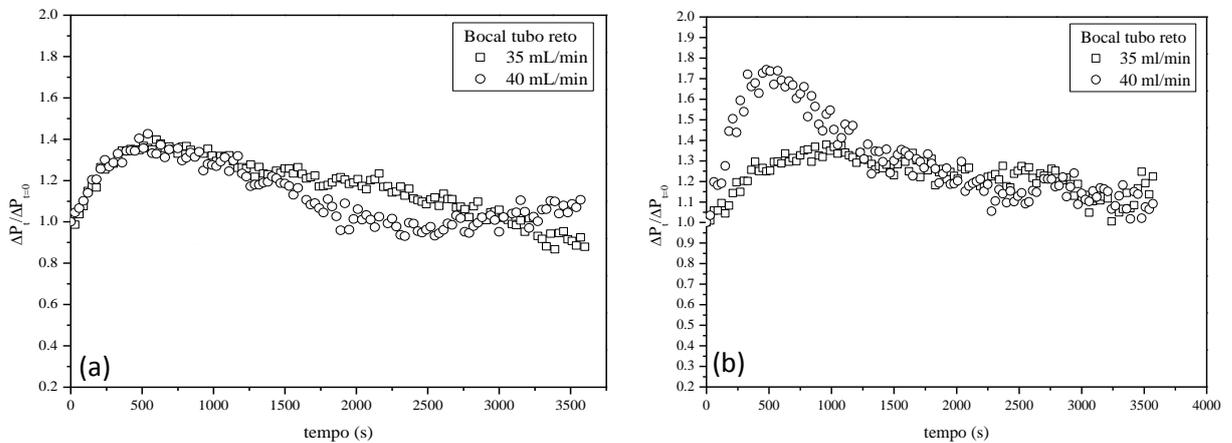
Figura 4.37 - Vazão máxima de alimentação de leite desnatado alcançada pelo leite de jorro em função do ângulo de base cônica.

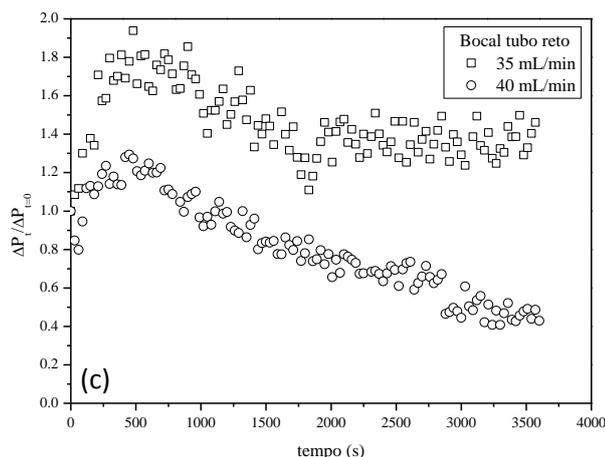


Fonte: Pessoal (2014).

As Figuras 4.38a, 4.38b e 4.38c apresentam o adimensional da queda de pressão do leite de jorro em função do tempo para a secagem de leite desnatado, parametrizando a vazão de alimentação de leite desnatado sob as condições de 4,50 kg de material inerte, bocal de entrada de ar do tipo tubo reto, temperatura e velocidade do ar de entrada de 100°C e 1,30u_{mj}, respectivamente.

Figura 4.38 - Adimensional da queda de pressão no leite de jorro em função do tempo, parametrizado na vazão de alimentação de leite desnatado: (a) ângulo de cone de 45°, (b) ângulo de cone de 60° e (c) ângulo de cone de 75°.

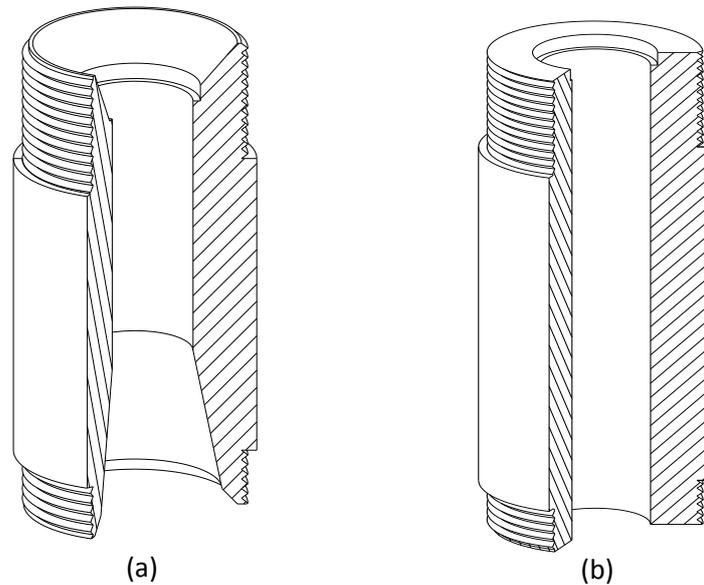




Fonte: Pessoal (2014).

Os resultados apresentados nas Figuras 4.38a, 4.38b e 4.38c mostraram que ao contrário do comportamento do adimensional da queda de pressão apresentado pelo bocal do tipo Venturi, mostrado anteriormente no item 4.31.1, os valores de $\Delta P_t / \Delta P_{t=0}$ foram elevados para todos os ângulos de base cônica estudados. Este comportamento pode estar relacionado com o fato de que, apesar do bocal tubo reto proporcionar menores valores queda de pressão na fluidodinâmica do leito sem a presença de pasta (item 4.1.2.3), o bocal do tipo Venturi dissipa o ar na base do leito, o que favorece uma efetiva troca de quantidade de movimento sólido-fluido e uma intensa mistura entre as fases. A transferência simultânea de calor e massa, por sua vez, será favorecida por tal agitação das partículas e pelo contato gás-sólido. Além disso, conforme mostra a Figura 4.39a, o bocal do tipo Venturi possui uma angulação, o que facilita a movimentação dos inertes na base do leito. Já o bocal do tipo tubo reto (Figura 4.39b) possui uma seção reta de 0,40 cm, onde as partículas podem se depositar na base do leito e dificultar o movimento cíclico característico do regime de jorro. Estes resultados mostraram qual a importância de se realizar o estudo conjunto dos diversos fatores envolvidos no processo de secagem de pastas em leito de jorro. Diante disso, é importante ressaltar que os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos para a secagem de leite desnatado com partículas de polietileno, o que sugere que resultados distintos poderiam ser obtidos caso seja utilizado outro tipo de pasta, dimensões de leito, ou material inerte com características distintas aos utilizados neste trabalho.

Figura 4.39 – Configuração do bocal de entrada de ar: (a) Venturi e (b) tubo reto.



Fonte: Bitti (2012).

O comportamento da umidade relativa, da umidade absoluta e da umidade do pó na saída do ciclone não será apresentado neste item, visto que os resultados obtidos foram semelhantes ao anteriormente apresentado no item 4.3.1.1.

Com base nos resultados e discussões apresentados nesta seção, constatou-se que tanto a fluidodinâmica do leito de jorro sem a presença de pasta quanto à secagem de leite desnatado sofreram interferências significativas das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro. Acredita-se que esta pesquisa demonstrou que a secagem de pastas em leito de jorro deve levar em consideração não somente as características da pasta utilizada no processo, mas também a geometria do secador, fator este não avaliado até essa pesquisa. Os resultados obtidos mostraram ainda que este tema merece ser mais aprofundado, tendo em vista a falta de informações na literatura sobre a secagem de pasta em leito de jorro para diferentes geometrias de leito.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES DA TESE

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, são apresentadas neste capítulo as principais conclusões obtidas referentes à caracterização fluidodinâmica do leito de jorro e da secagem de pastas para diferentes condições operacionais e configurações de leito.

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro mostrou que tanto a massa de material inerte, a altura de leito estático, o ângulo do cone e a geometria do bocal de entrada de ar exerceram efeito sobre o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro.

As correlações da literatura testadas para prever os valores de velocidade mínima de jorro, queda de pressão de jorro estável e queda de pressão máxima do leito na sua maioria não foram satisfatórias, visto que em geral superestimaram os valores dos parâmetros fluidodinâmicos. Isso ocorreu por que a faixa operacional no qual as correlações podem ser aplicadas não se enquadraram nas condições operacionais avaliadas neste trabalho.

Os dados de umidade relativa mostraram que para as condições operacionais avaliadas, o tempo necessário para que o sistema atinja o regime permanente foi dependente tanto da vazão de alimentação e do tipo de pasta empregada no procedimento experimental. Os resultados mostraram ainda que o potencial de secagem do leito empregando o leite desnatado foi inferior do que para a água destilada, o que mostra uma forte influência das características da pasta no processo.

Dos dados de umidade absoluta constatou-se que a quantidade máxima de água evaporada foi alcançada nos primeiros instantes da secagem e que ao longo do tempo este parâmetro diminuiu até atingir novamente o regime permanente, este comportamento foi mais evidente para as vazões de alimentação de pasta mais elevadas. O comportamento obtido foi semelhante para todos os tipos de pasta e configurações de leito utilizadas.

O adimensional da queda de pressão sofreu modificações significativas de acordo com a vazão de alimentação, do tipo de pasta inserido no sistema, bem como da configuração de leito utilizada. Para os ensaios de evaporação de água verificou-se que os

valores de $\Delta P_i/\Delta P_{i=0}$ não sofreram efeito significativo do ângulo do cone. No entanto, para a secagem do leite desnatado empregando o bocal de entrada do tipo Venturi, foi constatado que o ângulo de base cônica exerceu forte efeito no adimensional da queda de pressão, visto que os ângulos de 45° e 75° proporcionaram ao leite um comportamento mais estável do que o ângulo de cone de 60° . Foi verificado um efeito conjunto do ângulo de cone e das configurações cônica e cônico-cilíndricas utilizadas neste trabalho. Entretanto, quando foi utilizado o bocal de entrada do tipo tubo reto, constatou-se que para todos os ângulos de cone estudados foram obtidos elevados valores do adimensional da queda de pressão e nenhuma interferência na capacidade de secagem. Estes resultados mostraram complexidade envolvida no processo de secagem de pastas em leite de jorro.

Com relação à capacidade de secagem do leite, verificou-se que esta foi influenciada pelo tipo de pasta, massa de material inerte, ângulo de base cônica e geometria do bocal de entrada de ar. A capacidade máxima de evaporação de água do leite foi obtida quando foram empregados os maiores valores de massa de material inerte e ângulos de cone de 45° e 60° . Já para a secagem do leite desnatado foi verificado que a capacidade máxima de secagem do leite considerando massa fixa de material inerte foi alcançada para o ângulo de cone de 45° , quando empregado o bocal de entrada de ar do tipo Venturi. Entretanto, quando utilizado o bocal do tipo tubo reto a capacidade de secagem do leite manteve-se constante para todos os ângulos de cone avaliados. Para a secagem do leite desnatado considerando altura fixa de leite estático verificou-se que o leite foi mais eficiente quando utilizado o ângulo de cone de 75° .

Os resultados obtidos mostraram ainda que, o efeito de cada variável, tanto no comportamento fluidodinâmico do leite de jorro, quanto na secagem de pastas, foi dependente da configuração de leite utilizada: cônica ou cônico-cilíndrico. Além disso, foi constatado que a análise do efeito do ângulo de base cônica foi mais eficiente quando considerada a massa de material inerte fixa do que para a altura fixa de leite estático. Isto porque, para uma altura fixa de leite estático, a massa de partículas inertes necessária para preencher o leite pode variar significativamente com a modificação do ângulo do cone e desta forma os resultados obtidos são atribuídos a quantidade de material inerte utilizada e não ao efeito real que o ângulo do cone pode causar durante a secagem de pastas em leite de jorro.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho serviram como base para mostrar que, é necessário avaliar o processo de secagem de pastas em leite de jorro para diferentes

condições operacionais e características distintas de leite. Visto que, até o momento, somente as características da pasta eram levadas em consideração.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas neste trabalho, ficam como sugestões para trabalhos futuros:

Desenvolver correlações para a previsão dos valores de velocidade mínima de jorro, queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro estável levando em consideração uma ampla faixa operacional.

Analisar a influência do ângulo de base cônica na secagem de pastas para as configurações de leito cônico e cônico-cilíndrico separadamente.

Estudar a secagem de pastas em leito de jorro meia coluna para diversos ângulos de base cônica.

Modelagem e simulação numérica do processo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A, R, F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ALMEIDA, A, R, F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J.T. Transient analysis of pasty material drying in a spouted bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 28, p. 330–340, 2010.

ALTZIBAR, H. et al. Hydrodynamics of conical spouted beds using different types of internal devices. **Chemical Engineering Technology**, v. 32, n. 3, p. 463-469, 2009.

ALTZIBAR, H. et al. Minimum spouting velocity of conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v. 52, p. 2995-3006, 2013.

ALTZIBAR, H. et al. Operating and peak pressure drops in conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v. 53, p. 415-427, 2014.

BARRET, H.; FANE, A. Drying of liquid materials in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A. S.; ROQUES, M. A. **Drying'89**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. p. 415-420.

BI, X. Initiation of spouting. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 17-28.

BILBAO, J. et al. Design and operation of a jet spouted bed reactor with continuous catalyst feed in the benzyl alcohol polymerization. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 26, p. 1297-1304, 1987.

BITTI, M. T. **Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro**. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CHOI, M.; MEISEN, A. Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds. **Canadian Journal Chemical Engineering**, v.70, p. 916-924, 1992.

CORREIA, E. S. **Secagem de pasta residual de soja em leito de jorro**. 1996. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

CUNHA, F.O. **Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes**. 1999. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

EPSTEN, N.; GRACE, J. R. Introduction. In: EPSTEN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds. Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 1-16.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Editora Suprema, 2009. p. 95-129.

GRBAVCIC, A. B.; ARSENNIJEVIC, Z. L.; GARIC-GRULOVIC, R. V. Drying of slurries in fluidized bed of inert particles. **Drying Technology**. v.22, p. 1793-1812, 2004.

GREEN, M. C.; BRIDWATER, J. An experimental study of spouting in large sector beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 281-288, 1983.

HE, Y-L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. Spouted bed and spout-fluid bed behaviour in a column of diameter 0.91 m. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 70, p. 848-857, 1992.

KACHAN, G. C. **Contribuição ao estudo da desidratação da pasta de tomate (*Lycopersicon esculentum* L) em secador de leito de jorro**. 1998. 2009 p. Tese (Doutorado em Operações Unitárias) - Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

KMIEC, A. The minimum spouting velocity in conical beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 274-280, 1983.

LIM, C. J.; GRACE, J. R. Spouted bed hydrodynamics in a 0,91 m diameter vessel. **Canadian Journal Chemical Engineering**. v. 65, p. 366-372, 1987.

MARRETO, R. N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para a secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. 2006. 198 p. Tese (Doutorado em Medicamentos e Cosméticos) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão preto, 2006.

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

MEDEIROS, M. F. D. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. 2001. 247 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MORRIS, J. A. **Análise da taxa de evaporação de água de um secador leito de jorro com partículas inertes**. 1990. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.

MUJUMDAR, A. S. Spouted bed technology – a brief review. **Drying**. p. 151-157, 1984.

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

NASCIMENTO, B. S. et al. Influência de dois tipos de materiais inertes na secagem de pastas em leito de jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., 2012, Búzios. **Anais...** Búzios: 2012.

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.

OLAZAR, M. et al. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 31, p. 1784-1792, 1992.

OLAZAR, M. et al. Pressure drop in conical spouted beds. **The Chemical Engineering journal**, v. 51, p. 53-60, 1993.

OLAZAR, M. et al. Fountain geometry in shallow spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 43, p. 1163-1168, 2004.

OLAZAR, M. et al. Minimum spouting velocity for the pyrolysis of scrap tyres with sand in conical spouted beds. **Powder Technology**. v. 165, p.128-132, 2006.

OLAZAR, M. et al. Kinetic modelling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 81, p. 127-132, 2008.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; BILBAO, J. Conical spouted beds. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 82-104.

PASSOS, M. L.; COSTA Jr., E. F. Secagem de sólidos granulados em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Editora Suprema, 2009. p. 165-200.

PASSOS, M. L. et al. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997.

PATEL, K. et al. Spouting behaviour of wet solids. In: MUJUMDAR, A. S.; ROQUES, M. A. **Drying'86**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1986. p. 183-189.

PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 6, p. 426-434, 1983.

POVRENOVIC, D. S. et al. Minimum fluid flowrate, pressure drop and stability of a conical spouted bed. v. 70, p. 216-222, 1992

QUIN, H. et al. Experimental study on spouted bed hydrodynamics for oil shale semi-coke. **Energy Procedia**, v. 17, p. 1740-1746, 2012.

RAMOS, C. M. P. **Polpas de frutas tropicais desidratadas em leito de jorro**. Influência da composição química no desempenho do processo e análise do produto final obtido. Natal-RN:UFRN, 51p. Relatório Interno.

RÉ, M. I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. 1986. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1986.

REYES, A. E.; MASSARANI, G. Hidrodinâmica y evaporacion de agua em um lecho de chorro conivo. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 20., 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: 1992. p. 55-65.

ROCHA, S. C. S.; TARANTO, O. P.; MORIS, V. A. S. Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro e Fluidizado. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Editora Suprema, 2009. p. 131-163.

RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. 1993. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

ROMANKOV, P. G. et al. A study of the structure of spouting beds. **Heat Transfer – Soviet Reaserch**, v.3, n. 2, p. 133-139, 1971.

ROSA, C, A. **Estudo experimental e numérica da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo: uso da técnica CFD**. 2010. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

ROSA, C, A.; FREIRE, J. T. Secagem de Material Particulado em Leito de Jorro Contínuo. In: FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C. **Aplicações em sistemas particulados**. São Carlos: Editora Suprema, 2009. p. 114-140.

SALAM, P. A.; BHATTACHARYA, S. C. A comparative hydrodynamic study of two types of spouted bed reactor designs. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p. 1946-1957, 2006.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry. **The Chemical Engineering Journal**, v. 64, p. 353-359, 1996.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Spouted geometry in shallow spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 40, p. 420-426, 2001.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Fountain geometry in shallow spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.43, p. 1163-1168, 2004.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Solid trajectories and cycle times in spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.43, p. 3433-3438, 2004.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Spout and Fountain Geometry in Conical Spouted Beds Consisting of Solids of Varying Density. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.44, p. 193-200, 2005.

SAN JOSÉ, M. J. et al. Fountain Geometry of Beds Consisting of Plastic Wastes in Shallow Spouted Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 47, p. 6228-6238, 2008.

SARI, S.; KULAN, G.; KOKSAL, M. Characterization of gas-solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 132-139, 2012.

SCHNEIDER, T., BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. **Drying Technology**, v. 11, p. 277-301, 1993.

SOUZA, C. R. F. **Estudo comparativo da produção de extrato seco de bauínia forficata link pelos processos spray dryer e leito de jorro**. 2003. 181 p. Dissertação (Mestrado em Medicamentos e Cosméticos) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão preto, 2003.

SOUZA, C. R. F. **Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro**. 2009. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SPITZNER NETO, P. I. **Secagem de pastas em leito de jorro**. 1997. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

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

TAKEUCHI, S.; WANG, S.; RHODES, M. Discrete element simulation of a flat-bottomed spouted bed in the 3-D cylindrical coordinate system. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 3495-3504, 2004.

TAKEUCHI, S.; WANG, S.; RHODES, M. Discrete element method simulation of three-dimensional conical-base spouted beds. **Powder Technology**, v. 184, p. 141-150, 2008.

WANG, Z. et al. Determination of minimum spouting velocities in conical spouted beds. **The Canadian of Chemical Engineering**, v. 82, p.11-19, 2004.

Wang, Z. G. et al. Numerical simulations of hydrodynamic behaviors in conical spouted beds. **China Particuology**, v. 4, n.3-4, p. 194-203, 2006.

ZHONG, W. et al. Hydrodynamics of spout-fluid beds. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 105-127.