

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

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NA TAXA DE
EVAPORAÇÃO DE ÁGUA EM LEITO DE JORRO**

MAISA TONON BITTI

**SÃO CARLOS – SP
2012**

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

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NA TAXA DE
EVAPORAÇÃO DE ÁGUA EM LEITO DE JORRO**

Maisa Tonon Bitti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre 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

2012

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

B624ac

Bitti, Maisa Tonon.

Avaliação das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro / Maisa Tonon Bitti. -- São Carlos : UFSCar, 2012.

59 f.

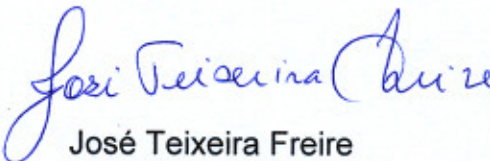
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Sistemas particulados. 2. Fluidodinâmica. 3. Secagem. 4. Planejamento experimental. I. Título.

CDD: 660.2842 (20^a)


MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
MAISA TONON BITTI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM
09 DE MARÇO DE 2012.

BANCA EXAMINADORA:


José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar


Fabio Bentes Freire
UFSCar


Maria do Carmo Ferreira
UFSCar


Marcos Antônio de Souza Barrozo
UFU

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à meus queridos pais Gerson Antônio Bitti e Maria de Lourdes Tonon Bitti como forma de gratidão pelo imenso amor e dedicação para comigo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo, inclusive pelas pessoas que me acompanharam nesta jornada, e espero que por toda a vida.

À meus amados pais por serem o maior exemplo da minha vida, sobretudo, pelo grande amor e 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 descontração e alegria.

Ao grande amor da minha vida Hugo Perazzini pelo amor, dedicação e principalmente pela paciência, apoio e companheirismo durante todos estes anos.

À meu orientador Prof. Dr. José Teixeira Freire pela amizade, paciência e principalmente pela oportunidade e confiança que me foi concedida.

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

Aos demais professores da área de Sistemas particulados, Ana Maria Silveira, Demerval José Mazzini Sartori, Maria do Carmo Ferreira e Ronaldo Guimarães Corrêa pelos incentivos e pelas colaborações dadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo, por gentilmente contribuir com os estudos realizados neste trabalho.

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

Aos demais amigos do Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Finalmente, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista.

RESUMO

Neste trabalho, realizou-se uma análise da influência das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro. O procedimento experimental foi conduzido empregando-se duas geometrias do bocal de entrada do gás e diferentes valores de massa de partículas inertes, vazão de alimentação da pasta, temperatura e velocidade do ar de entrada. Como pasta padrão utilizou-se água destilada e como inertes esferas de vidro com 2,18mm e $2512,6 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$. A câmara de secagem é composta por uma coluna cilíndrica de aço inox com 120 cm de altura e 30 cm de diâmetro, base cônica inferior com ângulo de 60° e altura do cone de 23 cm. Foi desenvolvido um planejamento composto central ortogonal para a determinação e otimização das condições experimentais. Durante o procedimento experimental foram coletados os valores de velocidade do ar de entrada, da queda de pressão do leito, da temperatura do ar de entrada, do ar de saída, de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone. Por meio das informações obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho constatou-se que, nas condições operacionais estudadas, a geometria do bocal de entrada de ar interferiu tanto na fluidodinâmica do leito seco quanto do leito úmido. Os ensaios de evaporação de água mostraram que a taxa máxima de evaporação para ambas as geometrias de bocal de entrada de gás foi de 60ml/min, nas condições de 115°C – $1,55 \text{ u/u}_{\text{jm}}$ e 8,5kg. Foi proposta ainda uma equação empírica que representasse a taxa de evaporação de água em função das variáveis independentes analisadas. A aplicação da técnica de regressão múltipla possibilitou determinar quais fatores exercem maior influência sobre o processo de evaporação de água em leito de jorro. Desta forma, as informações obtidas neste trabalho servirão como base para o estudo futuro da secagem de pastas reais.

ABSTRACT

In this work, the influence of operating conditions on the evaporation rate of water was analyzed for drying in a spouted bed. Experiments were done for two different inlet air geometries and inert particles loads for variable paste feed flow rates and inlet air temperature and velocity. Distilled water was employed as standard paste and glass beads of 2,18mm and $2512,6 \pm 0,1\text{kg/m}^3$ as the inert phase. The drying chamber consisted essentially of an inox cylindrical column with 120cm in height and 30cm in diameter, and a conical bottom with an angle of 60° and 23cm high. The orthogonal central composite design was used to specify the experimental conditions. Inlet air temperature and velocity, bed pressure drop, exhaust temperature and dry and wet bulb temperature at the cyclone were measured during the experiments. Results have showed that the inlet air geometry had a weak influence on the bed fluidynamic stability. The maximum evaporation rate for both inlet air geometries was of 60ml/min, under operating conditions of 115°C – $1,55u/u_{jm}$ and for 8,5kg particle load. An experimental correlation was proposed to estimate de rate of water evaporation as a function of the independent variables considered. With the experimental design analysis on the water evaporation rate it was possible to identify the most significant factors that influence the process. The information obtained in this work may be the basis for future work in this field with real pastes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de um leito de jorro.....	4
Figura 2.2: Transição entre o leito fixo e o leito de jorro.....	5
Figura 2.3: Queda de pressão em função da velocidade de ar ($d_p = 3,6\text{mm}$, $D_c = 15,2\text{cm}$, $D_i = 1,27\text{cm}$, $\theta = 60^\circ$): Curva típica (MATHUR e EPSTEIN, 1974).	6
Figura 2.4: Configuração da distribuição do fluxo de ar: (a) Distribuição central e (b) Distribuição anular (SALAM e BHATTACHARYA, 2006).	10
Figura 2.5: Esquema da secagem da pasta no interior do secador.	11
Figura 3.1: Unidade experimental.	18
Figura 3.2: Vistas frontais do bocal I (tipo Venturi).....	20
Figura 3.3: Dimensões do bocal I (tipo Venturi).	20
Figura 3.4: Vistas frontais do bocal II: tipo tubo reto.	21
Figura 3.5: Dimensões do bocal II: tipo tubo reto.	21
Figura 3.6: Conexão dos bocais a base cônica: (a) Bocal (I) e (b) Bocal (II).	22
Figura 4.1: Queda de pressão no leito vazio em função da velocidade do ar de entrada (Bocal I e $T=80,7^\circ\text{C}$).	28
Figura 4.2: Queda de pressão no leito vazio em função da velocidade do ar de entrada (Bocal II e $T=80,7^\circ\text{C}$).	29
Figura 4.3: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada para o bocal I e temperaturas de $80,7^\circ\text{C}$, 100°C e $119,3^\circ\text{C}$	30
Figura 4.4: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada para o bocal II e temperaturas de $80,7^\circ\text{C}$, 100°C e $119,3^\circ\text{C}$	31
Figura 4.5: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada (Bocal I e II sob as condições de 7kg de inertes e 100°C).	32
Figura 4.6: Superfície de resposta da queda de pressão em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal I.....	33

Figura 4.7: Superfície de resposta da velocidade mínima de jorro em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal I.	34
Figura 4.8: Superfície de resposta da queda de pressão em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal II.	35
Figura 4.9: Superfície de resposta da velocidade mínima de jorro em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal II.	36
Figura 4.10: Umidade relativa em função do tempo para o bocal I sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	37
Figura 4.11: Umidade relativa em função do tempo para o bocal II sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	37
Figura 4.12: Umidade absoluta em função do tempo para o bocal I sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	40
Figura 4.13: Umidade absoluta em função do tempo para o bocal II sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	40
Figura 4.14: Adimensional da queda de pressão em função do tempo para o bocal I sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	41
Figura 4.15: Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo para o bocal II sob condições de $100^{\circ}\text{C} - 1,4u_{mj}$	42
Figura 4.16: Diagrama de Pareto para o bocal I.	44
Figura 4.17: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da u/ujm codificada.	46
Figura 4.18: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da massa de partículas codificada.	46
Figura 4.19: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da massa de partículas e da u/ujm codificada.	47
Figura 4.20: Diagrama de Pareto para o bocal II.	48
Figura 4.21: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da u/ujm codificada.	50
Figura 4.22: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da massa de partículas codificada.	50
Figura 4.23: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da massa de partículas e da u/ujm codificada.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Matriz do planejamento experimental para cada geometria de bocal de entrada de gás.	24
Tabela 3.2: Codificação das variáveis envolvidas no planejamento.	25
Tabela 3.3: Matriz completa do planejamento experimental para cada geometria de bocal analisada.	25
Tabela 3.4: Condições operacionais empregadas na caracterização da unidade experimental.	26
Tabela 4.1: Dados obtidos a partir dos testes em branco.	29
Tabela 4.2: Equação de ajuste para todas as temperaturas analisadas.	30
Tabela 4.3: Dados fluidodinâmicos para as duas geometrias de bocal.	32
Tabela 4.4: Dados da taxa de evaporação de água para as duas geometrias de bocal.	39
Tabela 4.5: Significância dos coeficientes de regressão para o bocal I.	43
Tabela 4.6: Coeficientes de regressão estatisticamente significativos.	45
Tabela 4.7: Significância dos coeficientes de regressão para o bocal II.	48
Tabela 4.8: Coeficientes de regressão estatisticamente significativos.	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Resumo dos trabalhos encontrados na literatura.....	16
---	----

NOMENCLATURA

d_i	diâmetro da fenda interior	[L]
d_p	diâmetro da partícula	[L]
D_c	diâmetro da coluna	[L]
D_i	diâmetro inferior da base cônica	[L]
D_0	diâmetro interno do bocal	[L]
h_l	altura de leito estático	[L]
H_c	altura da base cônica	[L]
m_p	massa de partículas	[M]
P	pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_t	pressão do leito de jorro na presença de pasta	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{t=0}$	pressão do leito de jorro sem a presença de pasta	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$Q_{\text{água}}$	vazão de alimentação de água	$[L^3T^{-1}]$
T	temperatura	$[\theta]$
u	velocidade do ar na entrada do leito de jorro	$[LT^{-1}]$
u_{mj}	velocidade mínima de jorro	$[LT^{-1}]$
UA	umidade absoluta	[-]
UA_t	umidade absoluta na presença de pasta	[-]
$UA_{t=0}$	umidade absoluta sem a presença de pasta	[-]
UR	umidade relativa	[-]
UR_t	umidade relativa na presença de pasta	[-]
$UR_{t=0}$	umidade relativa sem a presença de pasta	[-]
X_1	valor codificado da temperatura do ar de entrada	[-]
X_2	relação codificada de u/u_{jm}	[-]
X_3	massa de partículas inertes codificada	[-]

Símbolos Gregos

θ	ângulo	[-]
δ	desvio padrão	[-]

Δ diferença [-]

Abreviaturas

CST mistura perfeita

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	ix
NOMECLATURA.....	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 O Leito de Jorro.....	3
2.2 Aspectos Fluidodinâmicos	5
2.3 Estabilidade do Leito de Jorro	7
2.3.1 Altura de leito Estático.....	7
2.3.2 Características das Partículas Inertes	8
2.3.3 Bocal de Entrada do Gás	9
2.4 Secagem de Pastas em Leito de Jorro.....	10
2.5 Influência da Pasta no Processo	12
2.5.1 Queda de Pressão no Leito	13
2.5.2 Velocidade Mínima de Jorro.....	14
2.5.3 Altura da Fonte.....	14
2.6 A Experiência do Centro de Secagem	15
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Unidade Experimental.....	18
3.2 Partículas Inertes e Pasta	23
3.3 Métodos	23

3.3.1	Planejamento Experimental	23
3.3.2	Procedimento Experimental.....	25
3.3.2.1	Caracterização Fluidodinâmica	26
3.3.2.2	Estudos experimentais de evaporação.....	27
CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS		28
4.1	Caracterização Fluidodinâmica	28
4.2	Evaporação de Água	36
4.2.1	Tratamento de dados para o Bocal I	43
4.2.2	Tratamento de dados para Bocal II	47
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES		52
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		55

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, a secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas em vários ramos tecnológicos, destacando-se as indústrias químicas, alimentícias e farmacêuticas. A escolha do secador mais adequado depende das propriedades e características do material a ser seco. No caso de materiais pastosos uma diversidade de secadores podem ser empregados, tais como secadores do tipo spray, leito fluidizado e leito de jorro, por exemplo.

O leito de jorro é um equipamento que oferece uma grande flexibilidade de operação. Desde sua concepção, este tipo de secador vem sendo empregado para a secagem de grãos e, mais recentemente, aplicado na secagem de pastas. A secagem de materiais pastosos neste tipo de equipamento é uma alternativa promissora, uma vez que sua principal característica é proporcionar altas taxas de transferência de calor e massa, devido a um alto grau de mistura e um alto grau de contato entre as partículas e o fluido no interior do secador. Outra característica importante deste sistema é a possibilidade da secagem de materiais termicamente sensíveis, como fármacos e produtos alimentícios.

Apesar das características apresentadas, algumas limitações técnicas têm sido observadas ao longo dos anos, restringindo assim a sua aplicação em escala industrial. A busca da estabilidade do jorro para a secagem de pastas é um dos principais objetivos dos estudos que envolvem este tipo de secador. Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos que tentam entender os parâmetros que influenciam o fenômeno de jorro como a altura de leito estático, características das partículas inertes e geometria do leito. No entanto, a complexidade dos fenômenos envolvidos neste processo e a presença de lacunas nas informações obtidas na literatura, como por exemplo, a geometria de bocal de entrada de gás empregada, ainda impedem que a aplicação dos resultados obtidos em escala laboratorial possam ser ampliadas.

O Centro de Secagem de Pastas e Suspensões do Departamento de Engenharia Química da UFSCar (CS) possui ampla experiência na secagem dos mais diferentes tipos de pastas em leito de jorro, sendo referência mundial em trabalhos envolvendo esta atividade. Desde sua concepção, o Centro de Secagem vem desenvolvendo uma linha concreta de pesquisa sobre o tema. Desta maneira, dando continuidade as pesquisas desenvolvidas no CS, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise da influência de parâmetros como a massa de partículas inertes, a vazão de alimentação da pasta, a geometria do bocal de entrada de gás, a temperatura e a velocidade do ar de entrada, na taxa de evaporação de água em leito de jorro, bem como determinar a capacidade máxima de evaporação de água do sistema estudado.

Inicialmente, foi desenvolvido um planejamento composto central ortogonal para determinar e otimizar as condições operacionais utilizadas neste trabalho.

Em seguida, foi realizada uma caracterização fluidodinâmica do leito de jorro em estudo, onde foram obtidas as curvas características do leito e por meio destas, determinou-se os valores da velocidade mínima de jorro e da queda de pressão no sistema.

A partir dos dados fluidodinâmicos obtidos, pôde-se dar início aos ensaios da taxa de evaporação de água, no qual foram determinadas as vazões máximas de alimentação para o leito de jorro nas condições operacionais estudadas.

Finalmente, a aplicação da técnica de regressão múltipla permitiu avaliar quais variáveis exercem maior influência sobre o processo, bem como a obtenção de uma equação empírica que representam a taxa de evaporação de água em função das variáveis codificadas analisadas neste trabalho.

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. A revisão bibliográfica inicia-se abordando aspectos gerais sobre o leito de jorro, incluindo a influencia das condições operacionais e dos parâmetros geométricos do leito como, por exemplo, a geometria do bocal de entrada de gás e massa de partículas inertes utilizadas no processo. Também é apresentado um breve resumo das pesquisas já realizadas no Centro de Secagem de Pastas e Suspensões do DEQ/UFSCar.

2.1 O Leito de Jorro

A secagem em leito de jorro foi desenvolvida inicialmente no Canadá em 1954 por Gishler e Mathur, visando a secagem de trigo em um leito fluidizado (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Inicialmente este sistema foi empregado para a secagem de grãos, sendo atualmente aplicado a uma grande variedade de processos industriais, como recobrimento de partículas, granulação, reações heterogêneas gás-sólido e a secagem de pastas e suspensões (MATHUR e EPSTEIN, 1974; FREITAS e FREIRE, 2001; FERNANDES, 2005; FREIRE *et al.*, 2011).

A configuração do jorro convencional é composta basicamente por um cilindro acoplado a duas extremidades cônicas, sendo que a parte inferior contém uma determinada quantidade de partículas inertes. O regime de jorro é estabelecido por meio da injeção ascendente de ar através de um orifício situado na parte inferior do equipamento. Este procedimento permite o movimento cíclico das partículas no interior do leito, o que possibilita a formação de três regiões distintas, conforme mostra a Figura 2.1.

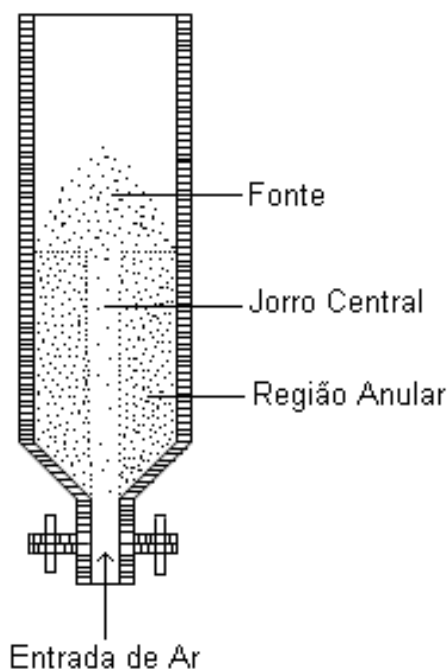


Figura 2.1: Diagrama esquemático de um leito de jorro.

De acordo com Mathur e Epstein (1974), as regiões de jorro e fonte são caracterizadas por uma alta porosidade, enquanto a região anular é mais densa, sendo similar a um leito deslizante.

A principal motivação para a aplicação deste tipo de secador consiste no fornecimento de altas taxas de recirculação de sólidos no leito (RODRIGUES, 1993; SOUZA, 2003; SILVA, 2007), por permitir um contato íntimo gás-partícula (SILVA, 2007; LESCANO, 2009; ROSA, 2010), proporcionar elevadas taxas de transferência de massa e calor (FERNANDES, 2005; SILVA, 2007; LESCANO, 2009; ROSA, 2010), uniformidade de temperatura no leito (SOUZA, 2003), por obter um produto final homogêneo (ROSA, 2010), a possibilidade da secagem de materiais termicamente sensíveis (FREIRE *et al.*, 2009) e baixo investimento inicial e baixo custo operacional (ROCHA *et al.*, 2009).

Apesar das peculiaridades apresentadas, a aplicação do leito de jorro em escala industrial ainda é muito restrita devido a uma série de limitações, como por exemplo, a elevada queda de pressão para o estabelecimento do jorro estável (MUJUMDAR, 1984; ROCHA *et al.*, 2009), a existência de uma altura máxima de jorro estável, o que limita a capacidade do equipamento (ROCHA *et al.*, 2009) e

dificuldades de ampliação de escala (BARROZO *et al.*, 1983; OCHOA-MARTINEZ *et al.*, 1993; FERNANDES, 2005).

Como forma de minimizar essas limitações, várias modificações foram propostas ao longo dos anos para o leito de jorro convencional (MATHUR e EPSTEIN, 1974; MAIALLE, 1996; SOUZA, 2003). Algumas das configurações propostas são: o leito de jorro cônico, o leito de jorro com tubo draft e o leito de jorro com aeração complementar. Uma descrição mais detalhada a respeito destas configurações pode ser encontrada nos trabalhos de Fan *et al.* (1984); Zülke (1988); Ojalvo (1991); Passos *et al.* (1997), Freitas e Freire (2001), Wang *et al.* (2006) e Freire *et al.* (2011 e 2012).

2.2 Aspectos Fluidodinâmicos

De acordo com Mathur e Epstein (1974) a formação do jorro é um fenômeno visível, que ocorre a partir de um valor definido de velocidade do ar para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração do equipamento. A Figura 2.2 apresenta a transição entre o leito fixo e o leito de jorro.

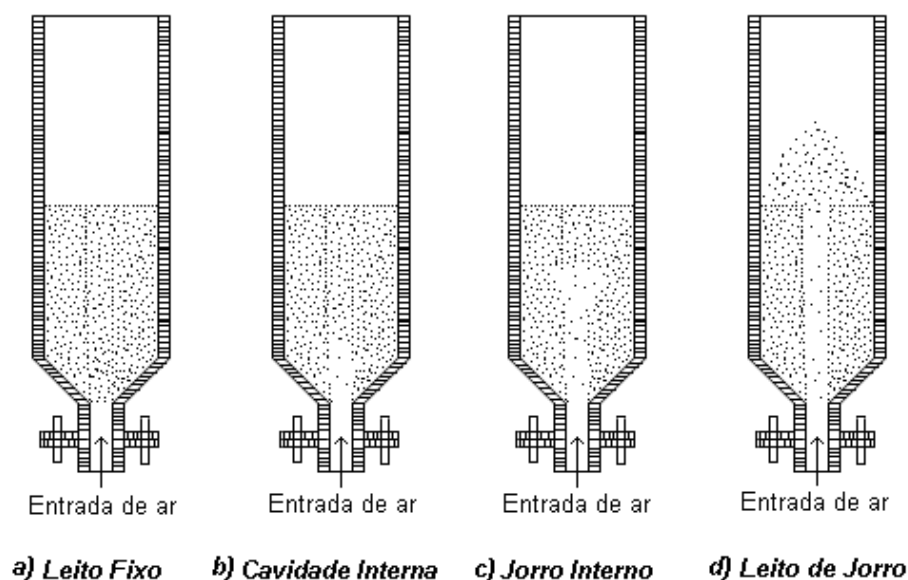


Figura 2.2: Transição entre o leito fixo e o leito de jorro.

Do ponto de vista fluidodinâmico, os principais parâmetros relacionados ao projeto deste tipo de secador são a velocidade mínima de jorro e a queda de

pressão máxima no leito. Estes parâmetros são obtidos por meio da curva característica do equipamento (Figura 2.3), conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974).

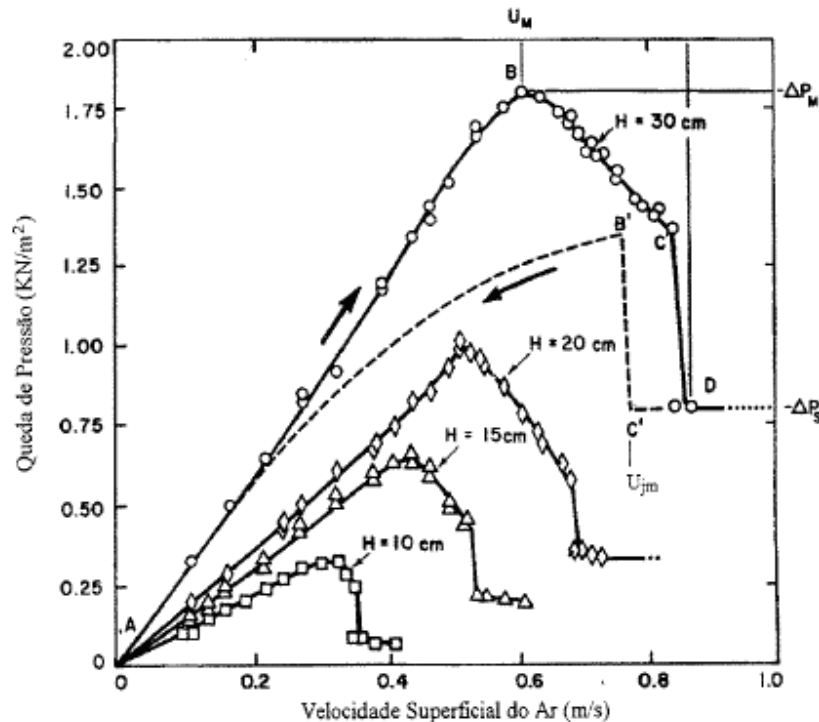


Figura 2.3: Queda de pressão em função da velocidade de ar ($d_p = 3,6\text{mm}$, $D_c = 15,2\text{cm}$, $D_i = 1,27\text{cm}$, $\theta = 60^\circ$): Curva típica (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Inicialmente, aplicando-se baixas vazões, o gás simplesmente percola as partículas em um leito fixo (Figura 2.2a). Este comportamento é representado pelo segmento AB da Figura 2.3, onde nesta região a queda de pressão aumenta com a vazão do escoamento. O aumento da vazão de ar promove a formação de uma cavidade no centro do leito, devido ao deslocamento das partículas (Figura 2.2b). As partículas ao redor da cavidade são compactadas, oferecendo assim grande resistência ao escoamento de ar, o que ocasiona um aumento na queda de pressão. À medida que se eleva a velocidade do ar, a cavidade se alonga, formando assim um jorro interno (Figura 2.2c). A queda de pressão aumenta até atingir um ponto máximo (ponto B da Figura 2.3). A partir deste ponto, o aumento da vazão de ar faz com que a altura do jorro interno seja grande quando comparada aos sólidos compactados acima deste, e a queda de pressão começa a diminuir. Qualquer

acréscimo na vazão de gás resulta numa redução rápida na queda de pressão até que o jorro aflore pela superfície do leito e o leito torna-se móvel e o jorro estável é estabelecido (Figura 2.2d). Neste ponto, qualquer incremento na vazão de ar provocará apenas a elevação da fonte, o que não fornece efeito significativo à queda de pressão.

2.3 Estabilidade do Leito de Jorro

Segundo Mathur e Epstein (1974), a obtenção do jorro estável está fortemente ligada à altura máxima do leito, acima da qual ocorre a instabilidade do processo, que pode dar-se na forma de uma fluidização ou de um movimento pistonado das partículas. Conforme estes autores, o sistema também sofre influências das propriedades e dimensões das partículas inertes e dos parâmetros geométricos do leito como o ângulo da base cônica e relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada do gás. Desta forma, serão apresentados a seguir, alguns dos trabalhos mais relevantes encontrados na literatura que dizem respeito ao estudo da influência destes parâmetros no sistema.

2.3.1 Altura de leito Estático

MATHUR e EPSTEIN (1974) verificaram que em leitos cônicos a velocidade mínima de jorro eleva-se com o aumento da altura do leito e com a diminuição do diâmetro da coluna cilíndrica. Foi observado ainda que o diâmetro do orifício de entrada do gás não possui grande efeito sobre este parâmetro. Em contraste com estes resultados Pham (1983), utilizando um leito de jorro cônico, verificou que a velocidade mínima de jorro decresce com o aumento da altura do leito de partículas.

GIUDICI *et al.* (1983) avaliaram a influência da altura do leito na queda de pressão, tanto para um sistema convencional como para um jorro modificado pela adição de uma tela cilíndrica inserida axialmente do leito. Verificou-se que a queda de pressão no sistema modificado independe da altura do leito, desde que a altura seja no mesmo nível ou em nível inferior ao topo da tela cilíndrica. Com relação ao sistema convencional, constatou-se que a perda de carga neste sistema é dependente da altura do leito.

RODRIGUES (1993) utilizando um leito de jorro cônico também verificou que à medida que a altura de leito é aumentada a queda de pressão também se eleva. Com relação a vazão mínima de jorro, os resultados obtidos foram similares ao encontrados por Mathur e Epstein (1974) e Olazar *et al.* (1992). O autor constatou que o aumento da altura do leito ocasiona um aumento na massa de partículas, fazendo com que haja uma maior resistência ao escoamento de ar, e conseqüentemente um aumento da queda de pressão e da velocidade mínima de jorro. Conclusões similares foram obtidas por Reyes (1993), Maialle (1996), Spitzner Neto (1997) e Leu e Pan (2004).

BACELOS (2006) investigou a estabilidade do regime de jorro por flutuação de pressão e dos níveis de segregação no leito operando com uma mistura de partículas inertes de diferentes tamanhos em um leito de jorro cônico. As cargas de inertes empregadas foram de 2,2 e 7 kg, as quais correspondem respectivamente a 0,105 e 0,195m da altura do tronco de cone. Foi constatado que o aumento da altura do leito de partículas pode ampliar a faixa de regime de jorro estável no leito, ou simplesmente promover este regime dependendo do tipo de inertes aplicados. O autor verificou que, o movimento cíclico ordenado das partículas, caracterizado pela formação de uma fonte sobre a superfície do leito necessita de uma altura mínima de leito para que o regime de jorro seja alcançado.

2.3.2 Características das Partículas Inertes

MEDEIROS (2001) em seu trabalho avaliou a influência das características das partículas inertes na estabilidade de um leito de jorro cônico-cilíndrico. Foram empregadas partículas de polietileno de alta e baixa densidade, polipropileno e SANGEL[®]. Verificou-se a possível interferência das características do material inerte com respeito a diâmetro, esfericidade e densidade dos sólidos, entre outros. De um modo geral, observou-se maiores valores de velocidade mínima de jorro e menores valores de queda de pressão de jorro estável relativas aos leito carregado com polietileno de alta densidade. Foi observado ainda que o uso de partículas de poliestireno de baixa densidade oferece, em geral, condições fluidodinâmicas mais estáveis do que as obtidas utilizando polietileno de alta densidade.

SAN JOSÉ *et al.* (2005) verificaram que as propriedades das partículas como diâmetro, densidade e esfericidade afetam a dinâmica do leito de jorro. Conforme estes autores, o aumento do diâmetro das partículas melhora a formação do jorro. Os mesmos resultados foram observados para o aumento da densidade e esfericidade das partículas. Com relação ao diâmetro das partículas, Leu e Pan (2004) observaram que a velocidade mínima de jorro eleva-se com o aumento deste parâmetro.

2.3.3 Bocal de Entrada do Gás

OLAZAR *et al.* (1992) avaliaram a influência da geometria do bocal de entrada do gás na estabilidade em um leito de jorro cônico. Foram estudadas cinco geometrias de bocais aplicando vários ângulos de base cônica, diâmetro de entrada e diferentes tipos de partículas inertes. Os autores verificaram que a razão entre o diâmetro do bocal de entrada de gás e o diâmetro inferior da base cônica (D_o/D_i) deve estar entre 0,50 e 0,83, conforme apresenta a Figura 2.4. O limite inferior é imposto pela queda de pressão e pela formação de zonas mortas no leito, o que acarreta uma série de problemas com a circulação dos sólidos. Já o limite superior foi estabelecido pela observação da instabilidade do regime de jorro quando a razão D_o/D_i é superior a imposta pelos autores.

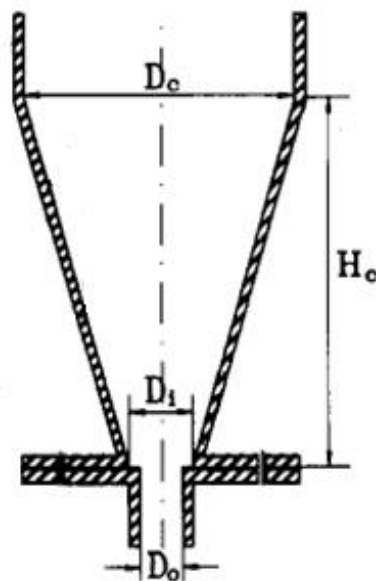


Figura 2.4: Esquema da geometria do bocal de entrada do gás (OLAZAR *et al.*, 1992).

OLAZAR *et al.* (1993) verificaram que existem limites máximos e mínimos de altura do leito de acordo com a geometria do bocal de entrada do gás utilizado. Segundo estes autores estes limites são impostos pelos fenômenos de instabilidade causados pela formação de grandes bolhas no leito.

SALAM e BHATTACHARYA (2006) objetivaram em seu trabalho, avaliar o efeito da configuração do distribuidor de ar (Figura 2.5) na hidrodinâmica do leito de jorro. Foram estudadas duas geometrias distintas, variando o diâmetro de entrada de ar. Eles observaram que os ensaios realizados com o distribuidor tipo (b) apresentaram valores de velocidade mínima de jorro superiores aos obtidos para o distribuidor tipo (a). Foi verificado ainda que a diferença entre os dados obtidos diminui com o aumento do diâmetro de entrada de ar.

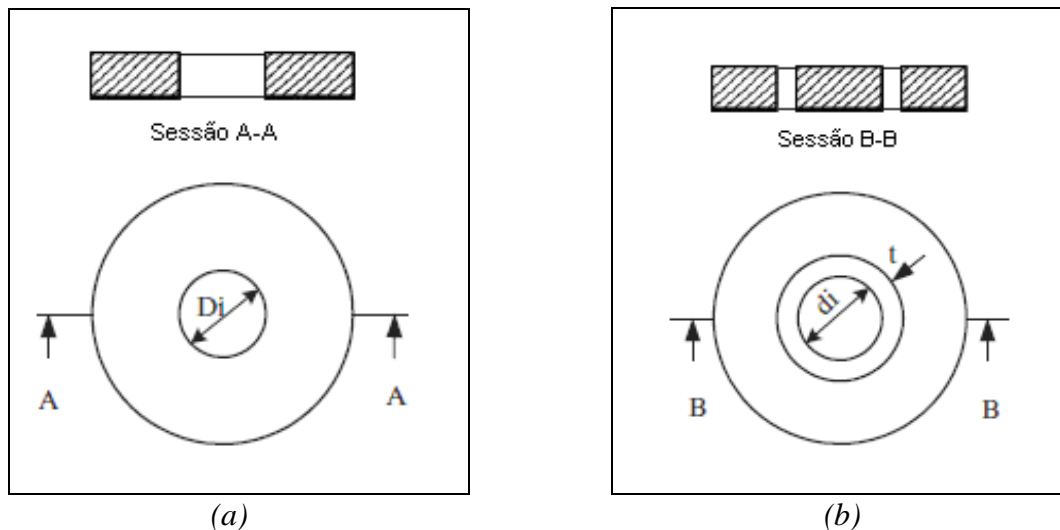


Figura 2.5: Configuração da distribuição do escoamento de ar: (a) Distribuição central e (b) Distribuição anular (SALAM e BHATTACHARYA, 2006).

2.4 Secagem de Pastas em Leito de Jorro

Segundo Medeiros *et al.* (2001) os primeiros estudos sobre secagem de pastas em leito de jorro, foram desenvolvidos por pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Leningrado, para a secagem de lacas e tintas. Posteriormente, esta técnica foi aplicada a diversos tipos de pasta, como sangue animal (PHAM, 1983; RÉ, 1986; OLIVEIRA, 1996; SPITZNER NETO, 1997), leite desnatado (OCHOA-MARTINEZ *et al.*, 1993), leveduras (MORRIS, 1990; RODRIGUES, 1993),

suspensões de hidróxido de alumínio (REYES, 1993; RODRIGUES 1993), ovo homogeneizado (CUNHA, 1999; SPITZER NETO, 2001; ABARCA, 2001; NASCIMENTO *et al.*, 2009), suspensão protéica de peixe (RODRIGUES e TOBINAGA, 2001), polpa de frutas (MEDEIROS *et al.*, 2002), fármacos (MARRETO *et al.*, 2006), microalgas (JACOB LOPES *et al.*, 2006), resíduos de leite de soja “okara” (WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN, 2007; LESCANO, 2009), lodo de esgoto (ALMEIDA, 2009) e soro de leite (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

Basicamente, o processo de secagem de pasta em leite de jorro consiste em atomizar o material pastoso no interior do equipamento, revestindo uniformemente as partículas inertes, conforme mostra a Figura 2.6.

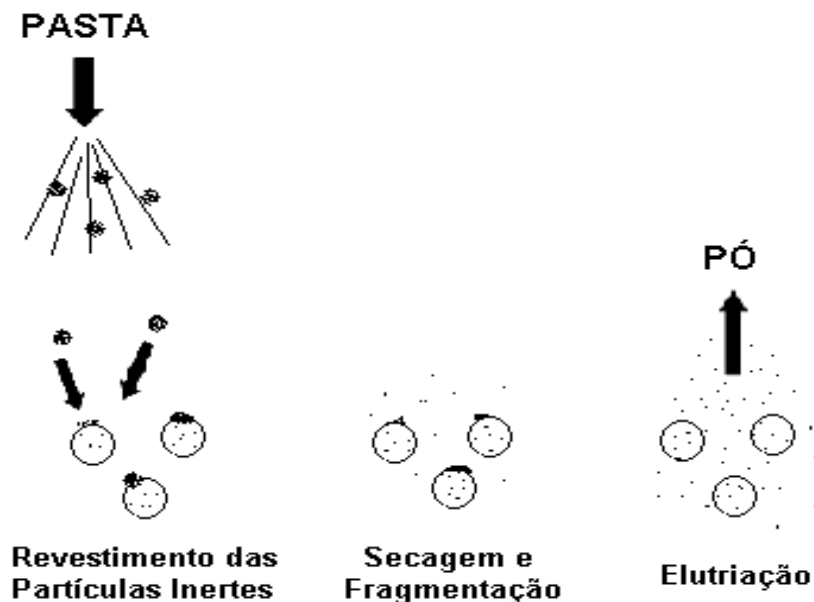


Figura 2.6: Esquema da secagem da pasta no interior do secador.

À medida que a pasta adere à superfície da partícula, o filme passa a ser seco devido ao contato com as partículas já aquecidas, ocorrendo a transferência de calor por condução e pelo contato com o fluido de secagem, onde a troca de calor ocorre por convecção. A colisão entre as partículas faz com que a camada de material seco fragmente-se e deixe o secador pelo sistema de exaustão, posteriormente sendo coletado por um sistema de separação acoplado à câmara de secagem.

Segundo Freire *et al.*(2009, 2011 e 2012) a secagem de pastas ocorre principalmente à taxa constante, onde a evaporação é a etapa limitante do processo. Além disso, é esperado que o filme formado em volta da partícula inerte seja fino o bastante para que a taxa de secagem não seja afetada pela umidade dentro do material (SPITZNER NETO, 1997).

Durante a secagem, a taxa de remoção do filme deve ser sempre maior ou igual à taxa de alimentação da pasta no equipamento. Caso contrário, a quantidade de material com alto teor de umidade aumentaria tanto que a circulação das partículas seria interrompida, causando colapso no equipamento. Neste sistema, o regime permanente é alcançado quando a taxa de recobrimento das partículas inertes é igual à taxa de remoção do filme. A taxa de remoção do material depende da sua adesão à partícula inerte e do número de colisões efetivas destas partículas, sendo o número de colisões controlado pela circulação dos sólidos, razão de massa de pasta por massa de inertes e pela taxa de secagem do material (FREIRE *et al.*, 2009 e 2011).

A granulometria do produto final é dependente das características do leite de jorro utilizado e, principalmente, das características do material pastoso (SPITZNER NETO, 2001). De acordo com Ferreira *et al.* (2000), o aumento da concentração da pasta proporciona um aumento na retenção do pó no interior do secador, reduzindo significativamente a eficiência de recuperação do material e provocando um aumento no teor de umidade final do produto.

2.5 Influência da Pasta no Processo

PHAM (1983), ao estudar a secagem de sangue animal em um leite de jorro cônico, foi um dos primeiros a verificar que a presença da pasta influencia fortemente a fluidodinâmica do leite. Posteriormente, várias pesquisas foram desenvolvidas com a finalidade de obter um conhecimento mais detalhado sobre este assunto. Diante disso, apresenta-se a seguir alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura a respeito da fluidodinâmica de leitos de jorro na presença de pasta.

2.5.1 Queda de Pressão no Leito

MORRIS (1990), ao estudar a secagem de uma suspensão de levedura observou que as mudanças de propriedades físicas da pasta durante o processo de secagem causaram alguns problemas de operação do leito, como por exemplo, o colapso do leito, devido à aglomeração das partículas no interior do equipamento.

RODRIGUES (1993), avaliando a queda de pressão em leitos úmidos, observou que a presença de água ou de suspensão de $\text{Al}(\text{OH})_3$ não causaram grandes variações na queda de pressão quando comparados aos valores obtidos para o leito seco. Contradizendo estes resultados, REYES (1993), utilizando água destilada e suspensão de hidróxido de alumínio, verificou que a adição de líquido no sistema promove um aumento significativo na queda de pressão e a perda de qualidade na operação do leito de jorro, como por exemplo, a descentralização do jorro interno acarretando desníveis no espaço anular. Rodrigues (1993) também observou que durante a secagem de uma suspensão de levedura a queda de pressão apresentou um aumento de aproximadamente 25%, quando comparada aos dados obtidos para o leito seco. Foi constatado que depois de um determinado tempo de secagem, a levedura tornava-se bastante pegajosa, provocando uma aglomeração das partículas inertes e aumentando assim a resistência ao escoamento do ar, tal como observado por Morris (1990).

Contrastando com estes trabalhos, Spitzner Neto (1997) empregando água destilada e uma suspensão de sangue bovino com anticoagulante, constatou que a presença da pasta promoveu uma diminuição na queda de pressão do leito. Posteriormente, Almeida (2009) avaliou a queda de pressão utilizando diferentes concentrações de carbonato de cálcio (CaCO_3). Foi observado que um único tipo de material pode apresentar diferentes valores de queda de pressão, sendo estas menores ou maiores, quando comparadas à queda de pressão obtida no leito sem a presença de pasta. A explicação para este fenômeno é dada pelas forças de interação interpartículas agindo em leitos de jorros úmidos.

MEDEIROS (2001) avaliou a influência da composição química, correlacionada com propriedades físicas das suspensões, na secagem de polpa de frutas tropicais em um leito de jorro cônico-cilíndrico. Foi verificado que a composição ou as propriedades das polpas não influenciaram a taxa de evaporação,

devido ao processo de secagem ser muito rápido. No entanto, a modificação das polpas provocou mudanças no comportamento fluidodinâmico do leite, principalmente em relação à queda de pressão e altura da fonte. Assim como Spitzner Neto (1997) e Almeida (2009), o autor também observou que a presença da pasta diminui a queda de pressão.

Avaliando os trabalhos citados neste item, pode-se observar que, com exceção dos resultados obtidos por Reyes (1993) e Rodrigues (1993), a queda de pressão diminui com a alimentação de pasta no sistema. Além disso, as características da pasta apresentam influência na queda de pressão do sistema. De acordo com Freire *et al.* (2009, 2011 e 2012), esta influência também está ligada a outros parâmetros como as características das partículas inertes, do secador e a interação pasta-partícula.

2.5.2 Velocidade Mínima de Jorro

REYES E MASSARANI (1992) analisaram a influência da suspensão de alumina e de água pura na vazão mínima de jorro. Os autores constataram que qualquer um dos fluidos provocou um aumento deste parâmetro. Porém, para a alimentação da suspensão de alumina, o aumento da vazão mínima de jorro foi mais relevante, devido à acumulação do produto no interior do equipamento. Os mesmos resultados foram obtidos posteriormente por Spitzner Neto (1997) e Almeida (2009). Foi observado ainda que a injeção da pasta no leite provocou um aumento da vazão mínima de jorro, enquanto a queda de pressão diminuiu. Esta diminuição na queda de pressão possivelmente está relacionada com uma redução no fluxo de sólidos na região de jorro, o que conseqüentemente, faz com que haja um aumento da área de seção transversal dessa região e da vazão mínima de jorro.

Em relação à influência da composição da pasta, Medeiros (2001) observou que a velocidade mínima de jorro, não sofreu influência deste parâmetro.

2.5.3 Altura da Fonte

MEDEIROS (2001) verificou que a presença da água promoveu mudanças no comportamento do leite, como por exemplo, o aumento da altura da fonte e a diminuição da concentração de partículas inertes na mesma. Entretanto, à

medida que a secagem prosseguia, o leito estabilizava em condições de vazão e pressão praticamente idênticas às iniciais e com pequenas modificações na altura da fonte. SPITZNER NETO (2001) também observou que, em leitões úmidos, a altura da fonte foi sempre superior às obtidas para os leitões sem a presença de pasta.

2.6 A Experiência do Centro de Secagem

RÉ (1986) estudou a secagem de sangue animal com uma mistura de citrato de sódio, cloreto de sódio e dextrose como anticoagulante. Este trabalho foi o pioneiro do Centro de Secagem, no que se diz respeito ao estudo da secagem de pastas em leito de jorro. Foi avaliado o efeito da temperatura do ar de secagem na umidade do pó obtido durante a secagem, na solubilidade do conteúdo protéico e na qualidade do produto final.

MORRIS (1990) projetou e construiu um secador para o estudo da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes. O autor estudou os efeitos da temperatura de alimentação do ar, a razão do diâmetro da superfície do leito pelo diâmetro do orifício de entrada do ar e a razão da taxa de ar alimentado pela taxa de ar na condição de jorro mínimo. Como material pastoso, foi utilizado uma suspensão de levedura.

RODRIGUES (1993) estudou a secagem de três suspensões distintas em um leito de jorro cônico. O autor avaliou a influência que a carga de partículas inertes, o ângulo e a interação entre carga e ânulo exerceram no processo de secagem destes materiais.

SPITZNER NETO (1997) avaliou a influência da presença da pasta nos parâmetros térmicos e fluidodinâmicos do leito. Neste trabalho foi empregado um leito de jorro cônico cilíndrico e como pastas de alimentação foram utilizadas água destilada e uma mistura de sangue animal com um anticoagulante. Verificou ainda, a melhor posição e a forma de colocação dos termopares no equipamento. Por fim, foram estudados modelos matemáticos com a finalidade de descrever a secagem de pastas no equipamento.

SPITZNER NETO (2001) estudou a secagem de substâncias líquidas e pastosas em secador leito de jorro. Neste trabalho, foi analisado o efeito da alimentação de uma pasta (ovo homogeneizado) e de um líquido (glicerol) na

fluidodinâmica do leito. O autor também analisou vários modelos matemáticos, propondo mudanças para aprimorá-los ou para que estes se adequassem aos dados experimentais obtidos.

BACELOS (2006) estudou a estabilidade do regime de jorro por flutuação de pressão e dos níveis de segregação no leito de jorro operando com diversas combinações de partículas. Também foi analisado, empregando glicerol, o efeito das forças interpartículas no comportamento fluidodinâmico do leito com misturas de tamanhos de partículas.

ALMEIDA (2009) estudou o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa na secagem de pastas em leito de jorro em regime transiente. Para este estudo foram empregadas duas configurações de leito de jorro (coluna cheia e meia coluna) e como pastas foram utilizadas água destilada, leite desnatado, ovo homogeneizado, carbonato de cálcio e lodo de esgoto. O autor também avaliou a aplicação de um modelo CST para a estimativa dos perfis de temperatura e umidade das fases gás e sólida.

Com base na revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, verifica-se que muitos são os fatores que exercem influência no processo de secagem de pastas em leito de jorro. No entanto, poucos são os trabalhos que realizam uma análise completa da interferência de parâmetros, como a massa de inerte, a geometria do bocal de entrada de gás, a temperatura e a velocidade do ar de entrada no processo. O Quadro 2.1 apresenta um breve resumo dos trabalhos encontrados na literatura e os principais parâmetros analisados.

Quadro 2.1: Resumo dos trabalhos encontrados na literatura.

Autor	Tipo de inerte	Tipo de pasta	T	θ	u/u_{im}	h_l	bocal
Giudici <i>et al.</i> (1983)						*	
Olazar <i>et al.</i> (1992)	*			*			*
Rodrigues (1993)			*	*	*	*	
Maialle (1996)					*	*	
Costa (1998)	*					*	
Medeiros (2001)	*	*					
Salam e B. (2006)							*
Almeida (2009)	*	*			*		

* Parâmetros avaliados em cada trabalho.

Em que, T corresponde a temperatura, θ ao ângulo da base cônica, u/u_{jm} a razão entre a velocidade do ar de entrada e a velocidade de mínimo jorro e h_i a altura do leito estático.

A partir da análise dos trabalhos apresentados no Quadro 2.1, nota-se claramente a presença de lacunas nas informações obtidas na literatura, o que mostra a necessidade de desenvolver um estudo mais detalhado sobre a influência das condições operacionais na taxa de evaporação de água em leito de jorro. Desta forma, o presente trabalho possibilita a obtenção de informações importantes para o estudo futuro de pastas reais.

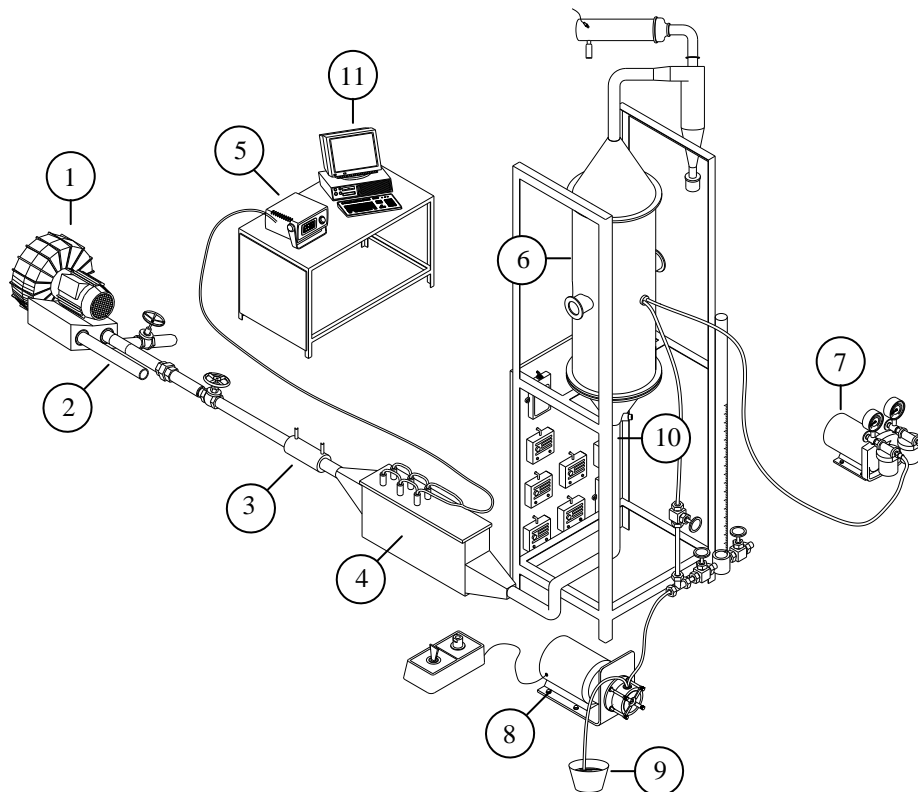
CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Unidade Experimental

O equipamento utilizado neste trabalho consiste de um leito de jorro disponível no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A Figura 3.1 apresenta a configuração geral deste secador.



(1) soprador; (2) sistema by-pass; (3) Medidor de vazão tipo Venturi; (4) trocador de calor; (5) controlador de temperatura; (6) câmara de secagem; (7) compressor de ar; (8) bomba peristáltica; (9) reservatório de pasta; (10) bocal de entrada de gás; (11) sistema de aquisição de dados.

Figura 3.1: Unidade experimental.

Conforme mostra a Figura 3.1, a alimentação do ar na unidade experimental foi realizada através de um soprador (1) e o ajuste de vazão por meio um sistema by-pass (2) composto por duas válvulas gavetas que direcionavam o ar proveniente do soprador em duas direções distintas, o interior do leito e a purga. A vazão volumétrica do ar foi obtida indiretamente utilizando-se um medidor Venturi (3) instalado no sistema. O gás foi aquecido através de um trocador de calor (4) composto por quatro resistências elétricas acionadas mediante um controlador de temperatura (5), que por sua vez permitia o controle da potência de aquecimento e o ajuste da temperatura de operação do ar desejada.

A câmara de secagem (6) é composta basicamente por uma coluna cilíndrica de aço inox com 120 cm de altura e 30 cm de diâmetro, base cônica inferior com ângulo de 60° e altura do cone de 23 cm. A alimentação da pasta no interior do leito foi realizada por meio de um alimentador de duplo fluido posicionado na região central da coluna cilíndrica. Este ejetor possui duas entradas, onde está acoplado um compressor de ar (7), cuja pressão exercida corresponde a aproximadamente 5 psi e uma bomba peristáltica (8) responsável pela alimentação da pasta, que também está conectada ao reservatório da pasta (9), apresentado na Figura 3.1.

Foram estudadas duas geometrias distintas de bocal de entrada de gás (10), conforme apresentam as Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5. As Figuras 3.2 e 3.4 apresentam as diferentes vistas frontais de ambos os bocais. Já as Figuras 3.3 e 3.5 mostram as dimensões de cada bocal. Para simplificar a redação e compreensão dos dados posteriormente, o bocal tipo Venturi será denominado de *bocal I* e o tubo reto chamado de *boca II*.

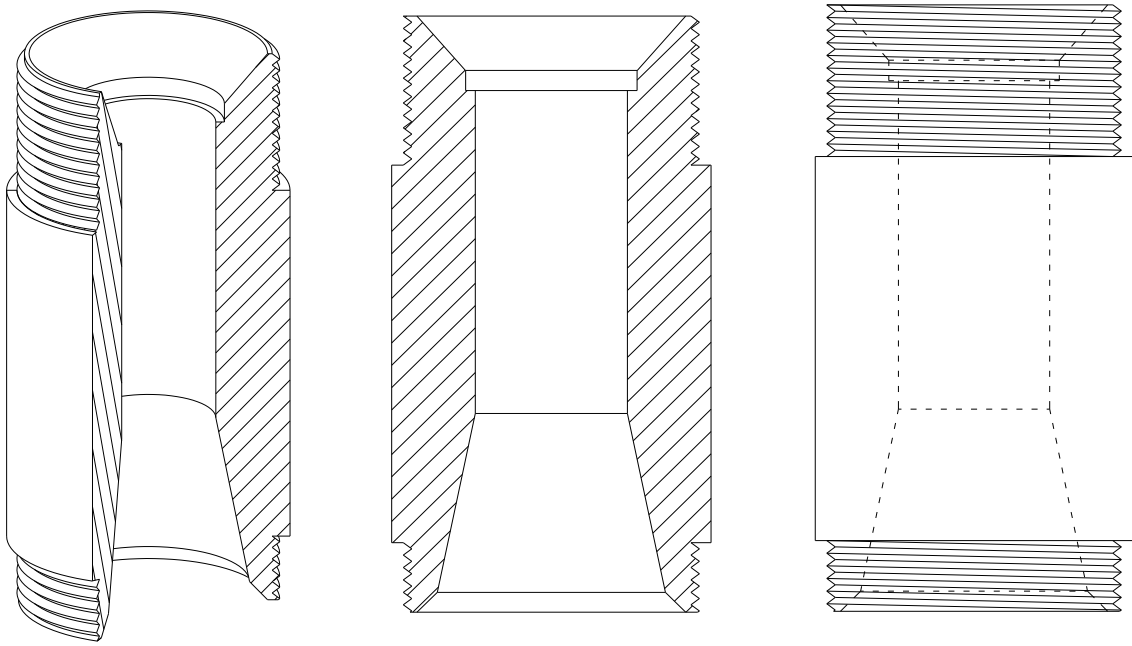


Figura 3.2: Vistas frontais do bocal I (tipo Venturi).

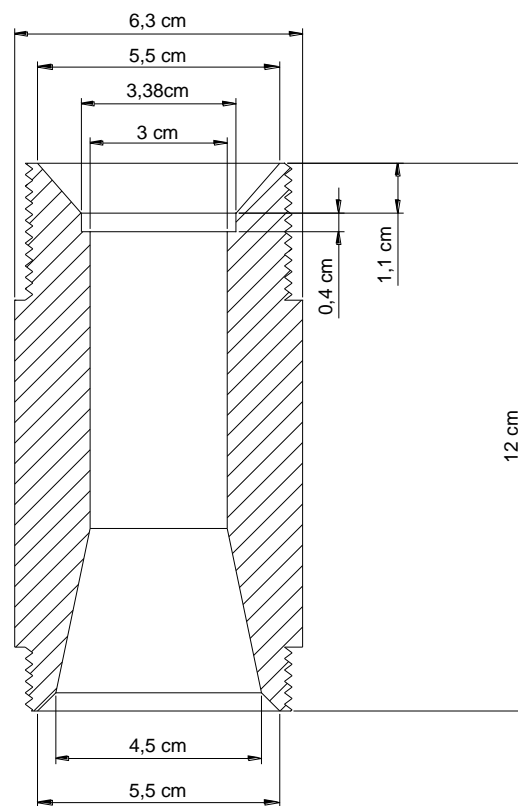


Figura 3.3: Dimensões do bocal I (tipo Venturi).

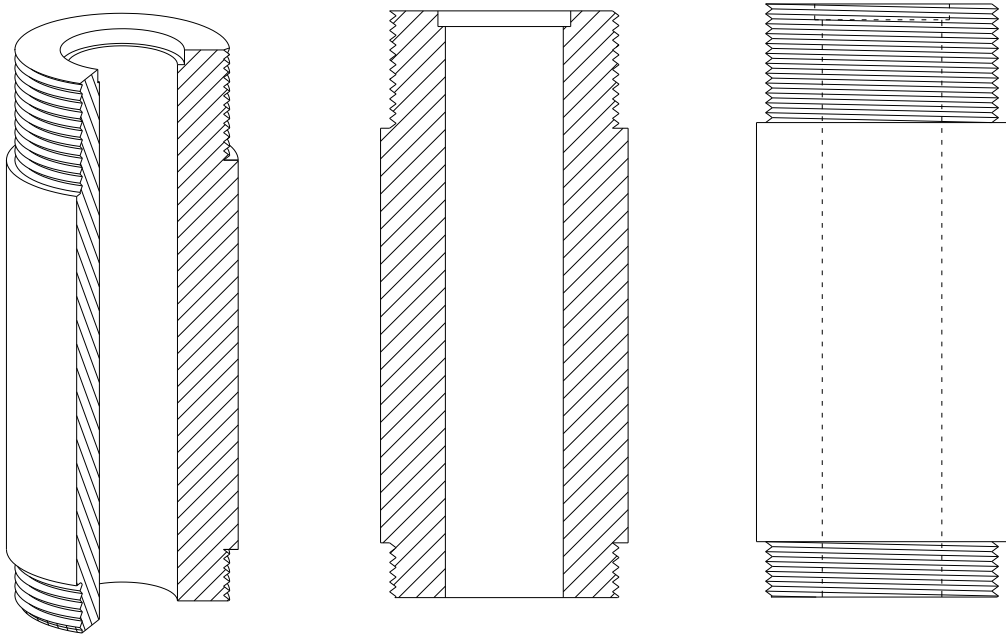


Figura 3.4: Vistas frontais do bocal II: tipo tubo reto.

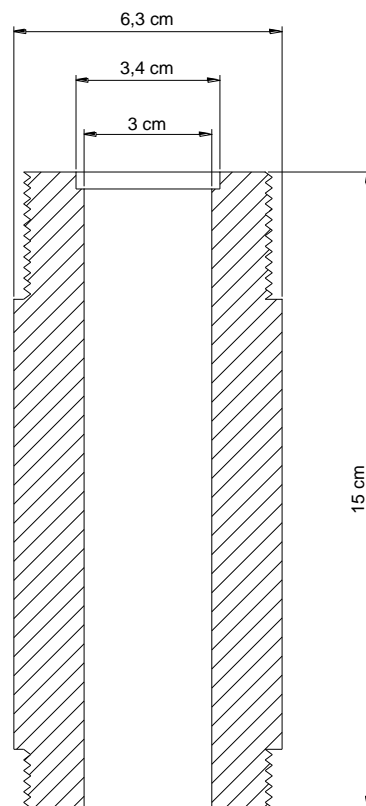


Figura 3.5: Dimensões do bocal II: tipo tubo reto.

Assim como apresentado nas Figura 3.6a e 3.6b, o bocal I possui diâmetro de entrada igual ao diâmetro inferior da base cônica, dando assim continuidade à angulação do mesmo. Com relação ao bocal II, as dimensões foram determinadas com base no trabalho de Olazar *et al.* (1992), onde os autores afirmam que os valores para a relação D_i/D_o devem estar entre 0,5 e 0,83. Desta forma o valor determinado por esta razão para o bocal II corresponde a 0,6.

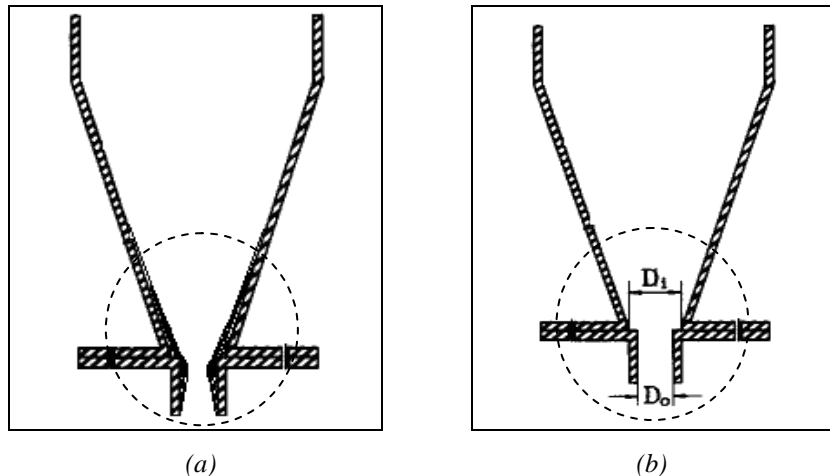


Figura 3.6: Conexão dos bocais a base cônica: (a) Bocal (I) e (b) Bocal (II).

Com relação às medidas de temperaturas, estas foram obtidas por meio de termopares do tipo T localizados na entrada do leito e na região anular. Também foram determinadas as temperaturas na saída do leito e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone. Para a obtenção dos dados de pressão foram utilizados dois transdutores de pressão com faixa de operação de 0 a 5 psi , sendo um para a medida da velocidade do ar na placa de orifício e outro para a obtenção da queda de pressão no leito. Assim como os sensores de temperatura, os sensores de pressão captam os sinais analógicos de cada variável, que por sua vez são processados pelo sistema de aquisição de dados (11) composto por uma placa condicionadora de sinais, uma placa de aquisição de dados, um microcomputador e um software utilizando a linguagem em LabVIEW (Figura 3.1). Neste sistema, eram captados 1024 valores em uma frequência de 500 hertz, sendo a média e o desvio padrão fornecidos automaticamente pela própria rotina LabVIEW.

3.2 Partículas Inertes e Pasta

As partículas inertes empregadas neste trabalho são similares às utilizadas por Almeida (2009). Conforme o autor, as esferas de vidro possuem aproximadamente 2,18mm de diâmetro e densidade correspondente a $2512,6 \pm 0,1\text{kg/m}^3$. A escolha das mesmas foi baseada na disponibilidade de partículas inertes e também por terem sido amplamente estudadas no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar. Como pasta utilizou-se água destilada cuja densidade corresponde a $996,23\text{kg/m}^3$ a uma temperatura de 28°C (LILEY *et al.*, 1984), devido esta ser considerada uma pasta padrão para o estudo de outros tipos de pastas.

3.3 Métodos

3.3.1 Planejamento Experimental

O planejamento experimental é uma metodologia estatística utilizada para estudar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma variável resposta de interesse, bem como otimizar o procedimento experimental. Antes de definir o planejamento mais adequado, é necessário realizar uma análise profunda do processo, buscando todas as informações possíveis, como por exemplo, quais variáveis devem ser estudadas, as faixas de estudo de cada uma delas e as respostas de interesse, conforme Rodrigues e lemma (2005). De modo geral, as etapas para o desenvolvimento do planejamento experimental são:

- definir quais os objetivos a serem alcançados com os experimentos;
- elaborar o procedimento experimental levando em consideração todas as variáveis independentes definidas no item anterior;
- realizar os experimentos e obter as respostas;
- calcular o efeito das variáveis, os seus respectivos erros e realizar uma análise estatística;
- elaborar os modelos preditos das respostas em função das variáveis independentes, e
- gerar as superfícies de resposta e curvas de contorno para análise e definir as faixas ótimas operacionais de cada variável no processo.

A escolha do tipo de planejamento experimental a ser aplicado depende principalmente do número de variáveis independentes a serem estudadas. Neste trabalho serão avaliadas 3 variáveis independentes, sendo estas a temperatura, a razão u/u_{jm} e a massa de partículas inertes. O planejamento mais recomendado para este caso é um planejamento do tipo composto central ortogonal. Assim, foi realizado um fatorial completo 2^3 , incluindo 6 pontos axiais e 2 repetições no ponto central, totalizando 16 ensaios para cada geometria de bocal de entrada de gás estudada. A Tabela 3.1 apresenta os valores codificados utilizados no planejamento.

Tabela 3.1: Matriz do planejamento experimental para cada geometria de bocal de entrada de gás.

Ensaio	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	$-\alpha$	0	0
10	α	0	0
11	0	$-\alpha$	0
12	0	α	0
13	0	0	$-\alpha$
14	0	0	α
15	0	0	0
16	0	0	0

Em que, X_1 corresponde à temperatura adimensional, X_2 é a relação codificada de u/u_{jm} e X_3 é massa de partículas inertes. O valor de α para tornar o planejamento ortogonal é correspondente a 1,287.

Cada linha da matriz do planejamento apresentado na Tabela 3.1 corresponde a um ensaio experimental realizado para obtenção da taxa de evaporação de água. Os valores codificados referentes aos níveis $-\alpha$, α , 0, -1 e 1 estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Codificação das variáveis envolvidas no planejamento.

Variável	Nível				
	- α	-1	0	1	α
Massa de inertes	5,07	5,50	7,00	8,50	8,93
Temperatura	80,70	85,00	100,00	115,00	119,30
u/u_{jm}	1,21	1,25	1,40	1,55	1,59

Logo, a partir das condições apresentadas anteriormente, a matriz completa do planejamento composto central ortogonal empregado neste trabalho é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Matriz completa do planejamento experimental para cada geometria de bocal analisada.

Ensaio	Temperatura (°C)	u/u_{jm}	Massa de Inertes (kg)
1	85,00	1,25	5,50
2	115,00	1,25	5,50
3	85,00	1,55	5,50
4	115,00	1,55	5,50
5	85,00	1,25	8,50
6	115,00	1,25	8,50
7	85,00	1,55	8,50
8	115,00	1,55	8,50
9	80,70	1,40	7,00
10	119,30	1,40	7,00
11	100,00	1,21	7,00
12	100,00	1,59	7,00
13	100,00	1,40	5,07
14	100,00	1,40	8,93
15	100,00	1,40	7,00
16	100,00	1,40	7,00

3.3.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu na realização da caracterização fluidodinâmica do leito e da análise da taxa de evaporação de água, variando-se a geometria do bocal de entrada do gás, a massa de partículas inertes, a vazão de alimentação da pasta, a temperatura e a velocidade do ar de entrada, a fim de verificar a influência destes parâmetros tanto no comportamento fluidodinâmico como na taxa de evaporação de água deste leito.

3.3.2.1 Caracterização Fluidodinâmica

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados conforme a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). Inicialmente colocou-se no leito uma quantidade de partículas inertes pré-determinadas conforme a Tabela 3.4. Em seguida ajustou-se a temperatura de operação desejada do sistema e esperou-se até que o sistema entrasse em regime permanente. Posteriormente, a vazão de ar foi rapidamente reduzida até zero, sendo em seguida aumentada gradativamente. Ao se atingir a máxima vazão de operação, realizou-se o processo inverso onde a vazão de gás foi novamente diminuída gradativamente até zero.

Tabela 3.4: Condições operacionais empregadas na caracterização da unidade experimental.

Ensaio	Massa de inerte (kg)	Temperatura (°C)
1	5,07	100,00
2	5,50	85,00
3	5,50	115,00
4	7,00	80,70
5	7,00	119,30
6	7,00	100,00
7	8,50	85,00
8	8,50	115,00
9	8,93	100,00

Para a determinação da queda de pressão ocasionada apenas pelo equipamento, seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, no entanto os experimentos foram conduzidos para o leito vazio (teste em branco). Posteriormente, por meio de uma equação de ajuste da queda de pressão do equipamento em função da velocidade do ar, estes valores foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo de leito de partículas inertes.

Durante estes experimentos, foram obtidos os dados de vazão do ar e da queda de pressão no leito. Estas informações permitiram a obtenção da curva característica e a determinação da queda de pressão e da velocidade mínima de jorro para o leito em estudo.

A obtenção dos dados foi conduzida com auxílio de um sistema de aquisição de dados, tendo sido obtidos 1024 valores a uma frequência de 500Hz. A

rotina labVIEW utilizada fornecia automaticamente a média e o desvio padrão dos dados coletados.

3.3.2.2 Estudos experimentais de evaporação

Os ensaios de taxa de evaporação de água foram conduzidos sob as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.3. Inicialmente, ajustou-se as condições operacionais pré-determinadas e esperou-se até que o sistema entrasse em regime permanente. Em seguida, foi iniciada a alimentação da pasta correspondente a 10 ml/min. A cada experimento realizado a vazão de alimentação de pasta era acrescida em 10 ml/min. O procedimento experimental era finalizado quando o leito apresentasse instabilidades e/ou o ar de saída já estivesse saturado.

Durante o procedimento experimental foram obtidos os valores de velocidade do ar de entrada, da queda de pressão do leito, 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 realizada 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. A partir dos dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido pode-se determinar a umidade relativa e absoluta do ar na saída da unidade experimental.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos e suas respectivas análises e discussões. Inicialmente, apresenta-se os resultados referentes à caracterização fluidodinâmica para o leito vazio “teste em branco”. Em seguida são dispostos os dados obtidos na caracterização fluidodinâmica para o leito de jorro operando sem a presença de pasta. Também são descritos os resultados relativos à evaporação de água em leito de jorro. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos por meio da técnica de regressão múltipla.

4.1 Caracterização Fluidodinâmica

Primeiramente, avaliou-se a queda de pressão fornecida pelo leito vazio, sem a presença das partículas inertes. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas obtidas para os bocais I e II, conforme já apresentados no Capítulo 3.

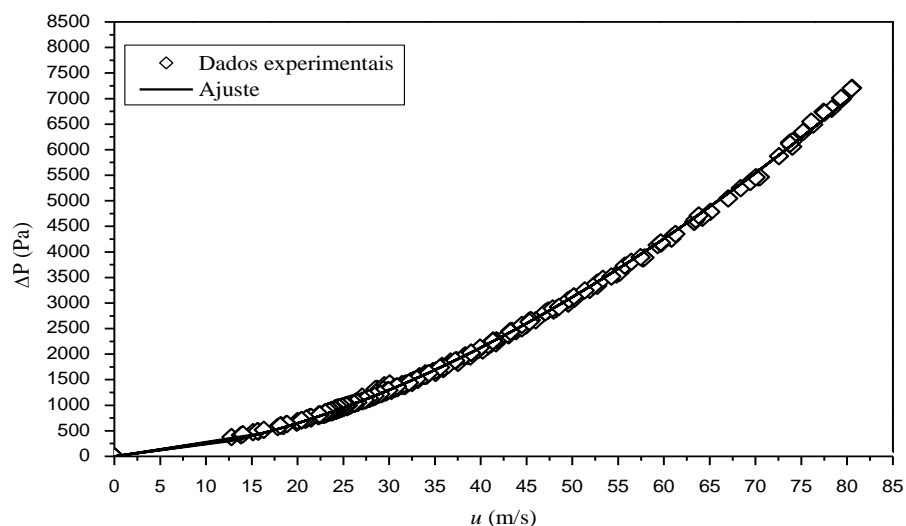


Figura 4.1: Queda de pressão no leito vazio em função da velocidade do ar de entrada (Bocal I e T=80,7°C).

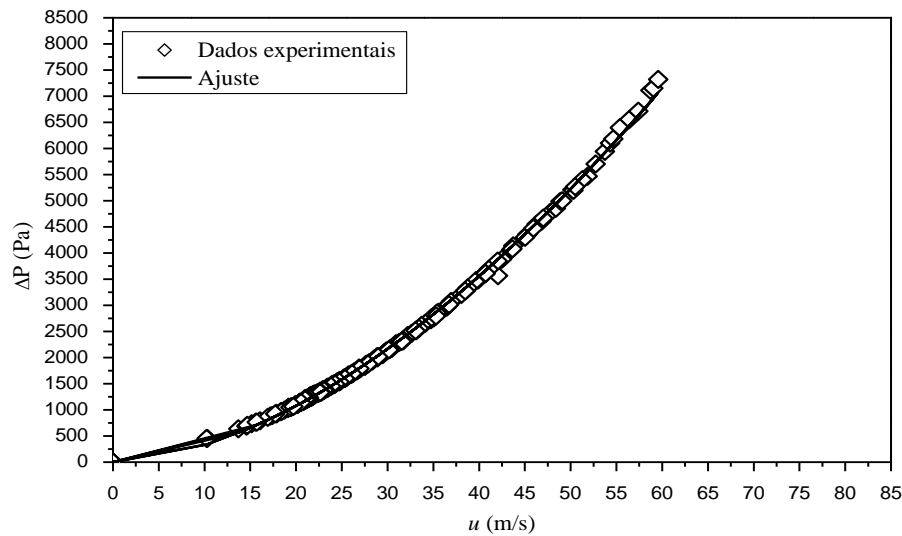


Figura 4.2: Queda de pressão no leito vazio em função da velocidade do ar de entrada (Bocal II e $T=80,7^{\circ}\text{C}$).

Os dados apresentados nas Figura 4.1 e 4.2 foram obtidos em triplicata para cada temperatura e ajustados a uma função conforme mostra a Equação (4.1).

$$\Delta P = au^b \quad (4.1)$$

A Tabela 4.1 apresenta os dados obtidos durante a caracterização da unidade experimental para o leito vazio.

Tabela 4.1: Dados obtidos a partir dos testes em branco.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Bocal (I)		Bocal (II)	
	Função de Potência	R^2	Função de Potência	R^2
80,7	$\Delta P = 3,85u^{1,71}$	0,9992	$\Delta P = 6,18u^{1,72}$	0,9989
85	$\Delta P = 3,90u^{1,71}$	0,9992	$\Delta P = 5,15u^{1,76}$	0,9991
100	$\Delta P = 3,42u^{1,73}$	0,9993	$\Delta P = 5,14u^{1,75}$	0,9978
115	$\Delta P = 3,87u^{1,70}$	0,9990	$\Delta P = 5,06u^{1,75}$	0,9991
119	$\Delta P = 3,98u^{1,69}$	0,9987	$\Delta P = 3,98u^{1,69}$	0,9983

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.1, nota-se que a temperatura do ar de entrada não exerce influência significativa sobre a fluidodinâmica do leito vazio, para ambos os bocais empregados. No entanto, pode-se observar que os valores dos parâmetros a e b são distintos para cada geometria de bocal, indicando sua possível interferência no comportamento fluidodinâmico deste sistema.

Para verificar a veracidade dos dados apresentados na Tabela 4.1, foi obtida uma função potência para o ajuste de todas as temperaturas analisadas em uma única equação, conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Equação de ajuste para todas as temperaturas analisadas.

Bocal	Função de Potência	R ²	Equação
I	$\Delta P = 3,80u^{1,71}$	0,9974	4.2
II	$\Delta P = 5,60u^{1,73}$	0,9956	4.3

Os dados apresentados na Tabela 4.2 confirmam que a temperatura não apresenta influência significativa no processo, visto que os valores de R² para as equações 4.2 e 4.3 correspondem a 0,9974 e 0,9956 para os bocais I e II, respectivamente.

Os resultados referentes à caracterização da unidade experimental sem a presença de pasta são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4. Estas figuras trazem as curvas fluidodinâmicas obtidas para as duas configurações de bocais aplicando-se uma carga de 7 kg de partículas inertes e temperaturas de 80,7°C; 100°C e 119,3°C. Os dados foram obtidos descontando-se os valores da queda de pressão no leito vazio para cada uma das temperaturas estudadas.

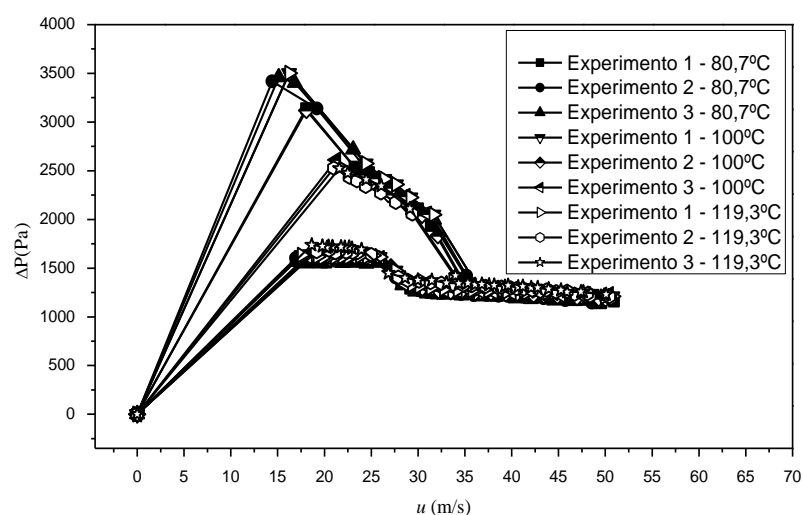


Figura 4.3: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada para o bocal I e temperaturas de 80,7°C, 100°C e 119,3°C.

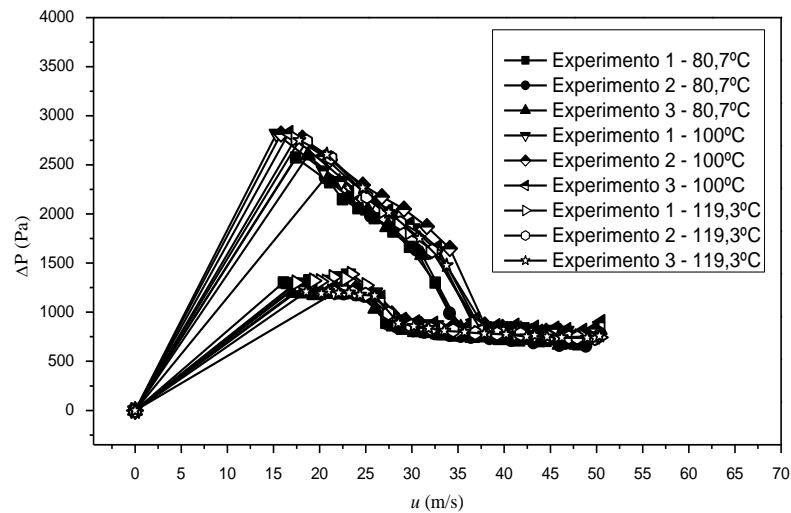


Figura 4.4: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada para o bocal II e temperaturas de 80,7°C, 100°C e 119,3°C.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, ambas as curvas apresentam um comportamento típico de leito de jorro, segundo os resultados relatados em Mathur e Epstein (1974). O mesmo comportamento também foi observado para as outras cargas de inerte e demais condições operacionais aplicadas para ambas às geometrias de bocal. Verifica-se ainda que, os ensaios foram reprodutíveis para todas as temperaturas analisadas, indicando que assim como para o teste em branco, a temperatura do ar de entrada não possui interferência significativa sobre o comportamento fluidodinâmico do leito com partículas inertes. Resultados similares foram relatados por Almeida (2009).

Outro fator importante que merece ser destacado está relacionado à influência da geometria do bocal de entrada de ar nos parâmetros fluidodinâmicos do leito. Na análise da Figura 4.5, os resultados apresentados mostram que para ambos os bocais empregados, os valores de velocidade mínima de jorro foram similares. No entanto, observa-se também que a queda de pressão de mínimo jorro foi superior para os ensaios que utilizaram o bocal I. Estas observações também aplicam-se a grande parte das demais condições operacionais estudadas.

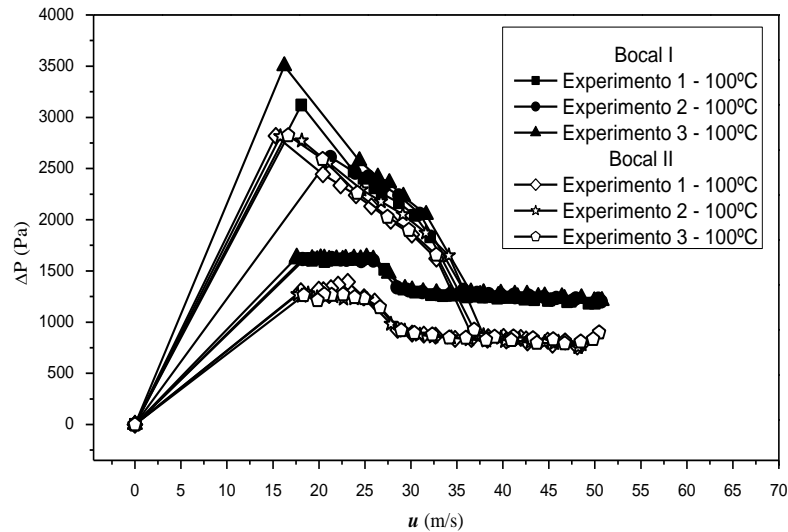


Figura 4.5: Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar de entrada (Bocal I e II sob as condições de 7kg de inertes e 100°C).

Uma possível explicação para este comportamento está relacionada com a distribuição do ar de entrada. Devido a sua geometria o bocal I distribui uniformemente o ar de entrada no leito, já o bocal II promove um jato de ar central, o que conseqüentemente, provoca a diferença na queda de pressão.

Na Tabela 4.3 estão apresentados os dados fluidodinâmicos obtidos para os bocais I e II, respectivamente.

Tabela 4.3: Dados fluidodinâmicos para as duas geometrias de bocal.

Variáveis		Bocal I				Bocal II			
m_p (kg)	T (°C)	u_{mj} (m/s)	$\Delta\delta$ (%)	ΔP (Pa)	$\Delta\delta$ (%)	u_{mj} (m/s)	$\Delta\delta$ (%)	ΔP (Pa)	$\Delta\delta$ (%)
5,07	100,0	23,70	26,16	1680,44	4,28	24,24	21,49	2062,38	5,11
5,50	85,0	24,70	19,03	2520,51	2,96	26,83	14,80	2559,40	3,33
5,50	115,0	24,87	21,83	2189,01	4,39	27,27	17,35	2464,52	3,30
7,00	80,7	28,34	11,40	3459,55	2,43	28,10	13,91	2573,65	3,00
7,00	100,0	28,47	15,45	3501,15	2,78	28,95	12,95	2823,40	3,21
7,00	119,3	28,59	16,12	2509,57	4,46	28,55	16,32	2764,86	3,42
8,50	85,0	31,38	10,13	3546,02	2,37	32,36	6,92	2888,70	2,68
8,50	115,0	31,29	12,14	3393,95	2,47	31,43	10,47	2880,52	2,87
8,93	100,0	32,21	11,39	3230,53	2,27	33,33	7,29	3061,83	2,57

Nas Figuras 4.6 a 4.9 são apresentadas as superfícies de respostas geradas a partir dos valores de queda de pressão e velocidade mínima de jorro apresentados na Tabela 4.3. A Figura 4.6 traz a superfície de resposta para a queda de pressão em função da temperatura e da massa de inertes para o Bocal I.

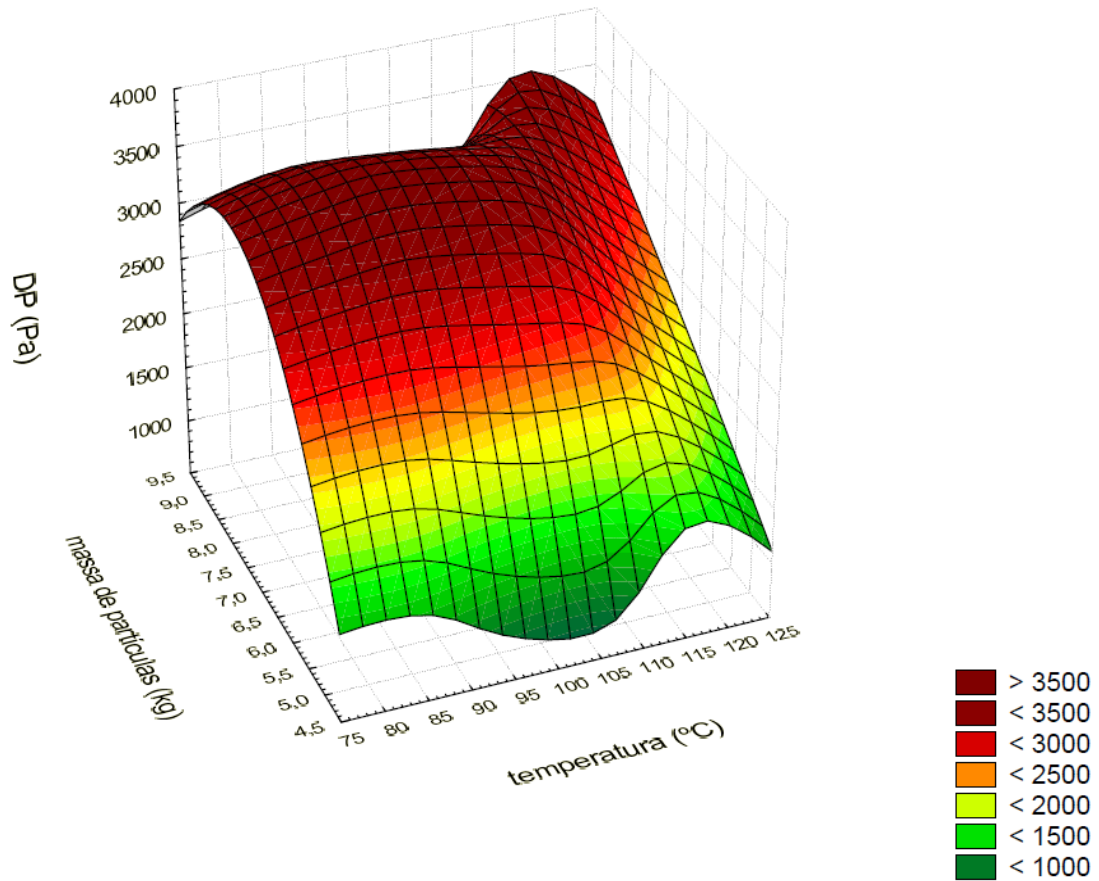


Figura 4.6: Superfície de resposta da queda de pressão em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal I.

A Figura 4.7 mostra a superfície de resposta para a velocidade mínima de jorro em função da temperatura e da massa de inertes para o Bocal I.

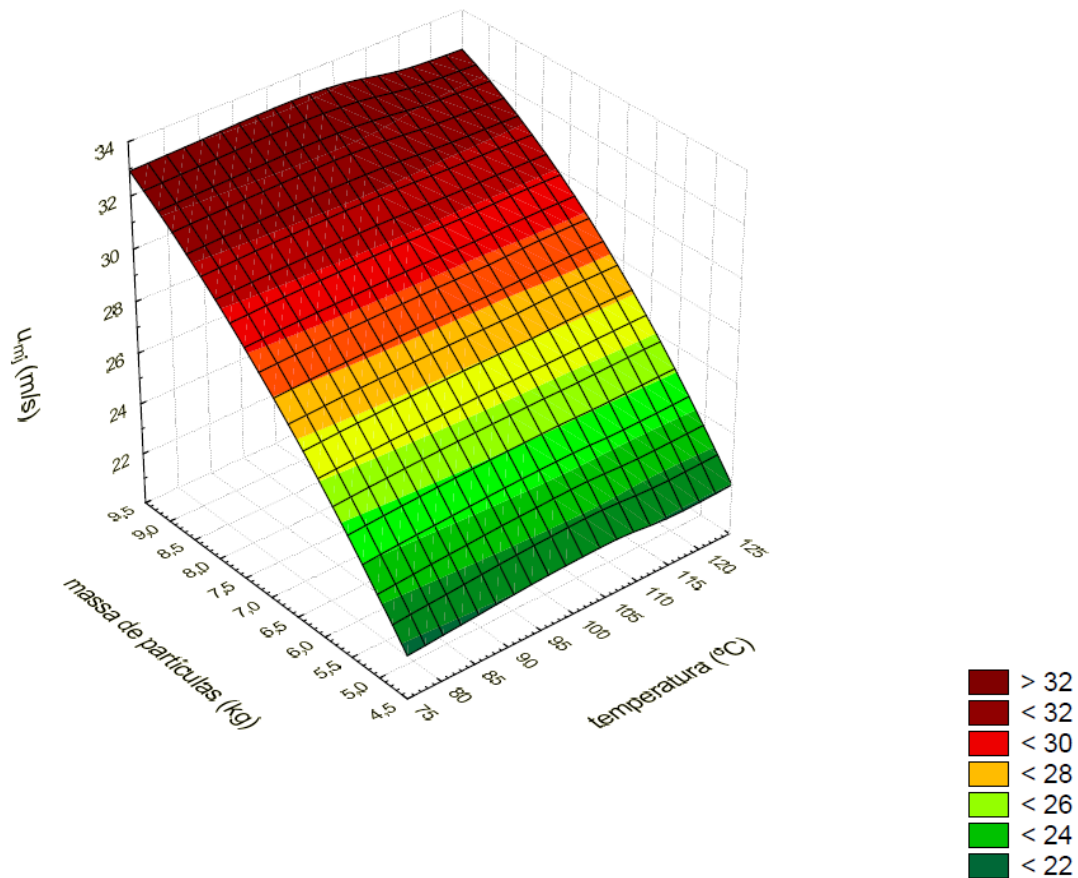


Figura 4.7: Superfície de resposta da velocidade mínima de jorro em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal I.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se que tanto a queda de pressão quanto a velocidade mínima de jorro elevam-se com o aumento da carga de inertes. Resultados semelhantes foram observados por Mathur e Epstein (1974), Rodrigues (1993), Reyes (1993), Maialle (1996), Spitzner Neto (1997) e Leu e Pan (2004). De acordo com estes autores, este comportamento é coerente, uma vez que o aumento na massa de inertes proporciona uma maior resistência ao escoamento de ar, ocasionando assim a elevação da queda de pressão e da velocidade mínima de jorro.

É possível verificar ainda que, os parâmetros analisados não sofreram influência significativa da temperatura do ar de entrada, em acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4.

A Figura 4.8 traz a superfície de resposta para a queda de pressão em função da temperatura e da massa de inertes para o Bocal II.

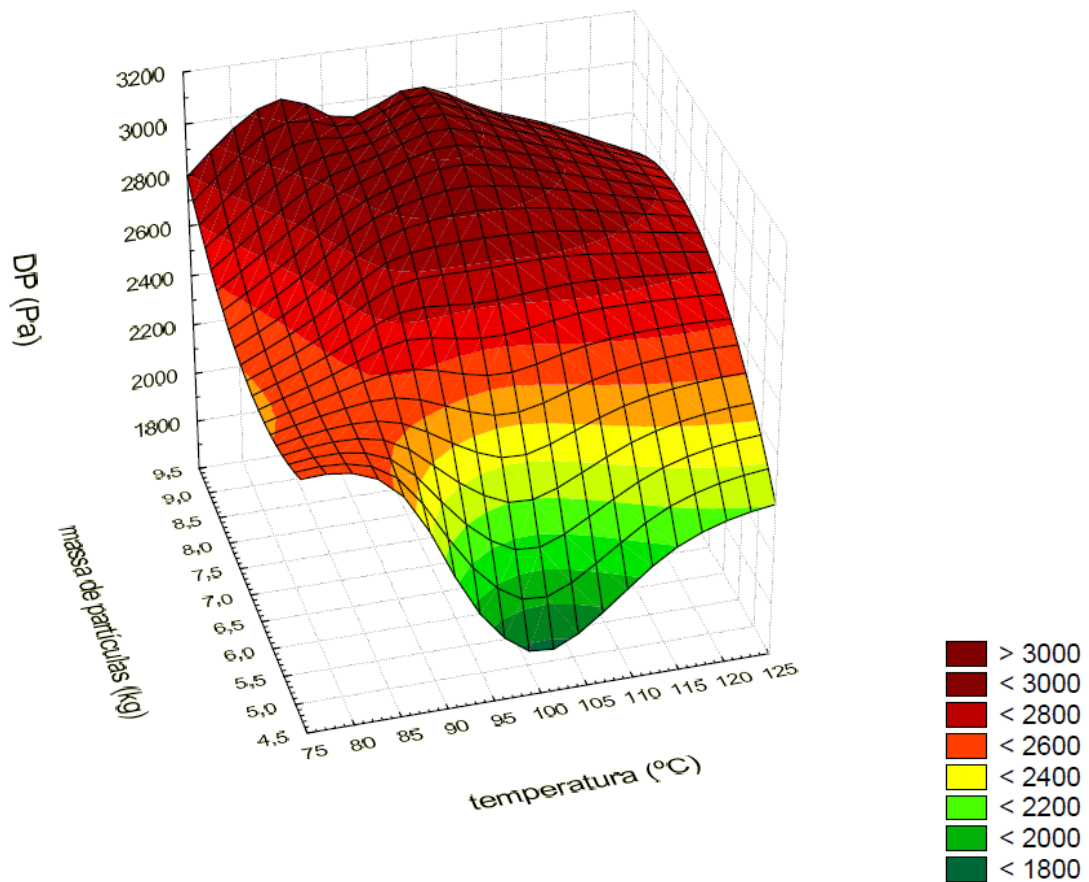


Figura 4.8: Superfície de resposta da queda de pressão em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal II.

Na Figura 4.9 é apresentada a superfície de resposta para a velocidade mínima de jorro em função da temperatura e da massa de inertes para o Bocal II.

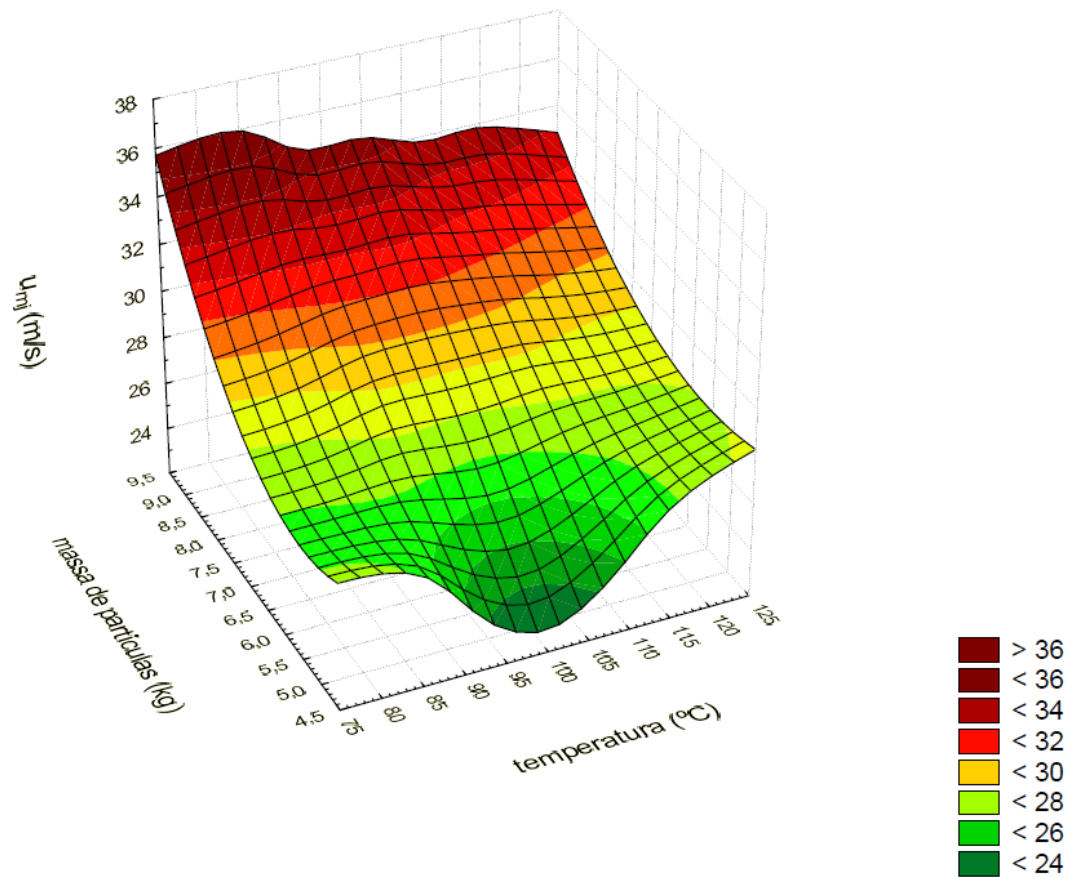


Figura 4.9: Superfície de resposta da velocidade mínima de jorro em função da massa de inerte e da temperatura para o bocal II.

Verifica-se que, assim como para o bocal I, os dados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9 também mostram que, tanto a queda de pressão quanto a velocidade mínima de jorro elevam-se com o aumento da carga de inertes no interior do leito. No entanto, uma pequena influência da temperatura foi observada, sendo esta mais evidenciada para a queda de pressão apresentada na Figura 4.8.

4.2 Evaporação de Água

Nesta sessão, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de evaporação de água, conduzidos nas condições operacionais apresentadas anteriormente na Tabela 3.3.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os dados de umidade relativa em função do tempo para o leito de jorro com 7 kg de partículas inertes, 100°C e $1,4u_{mj}$ para os bocais I e II, respectivamente.

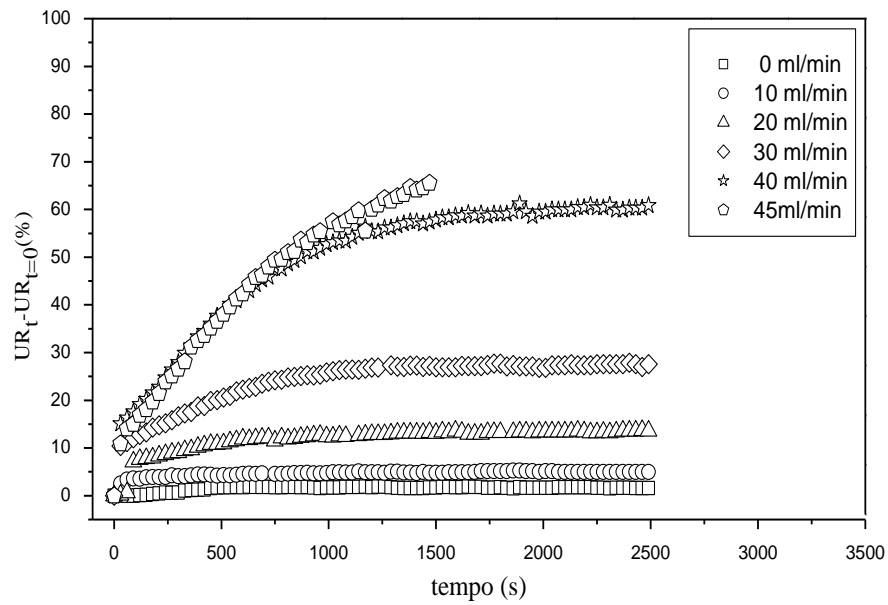


Figura 4.10: Umidade relativa em função do tempo para o bocal I sob condições de 100°C - $1,4u_{mj}$.

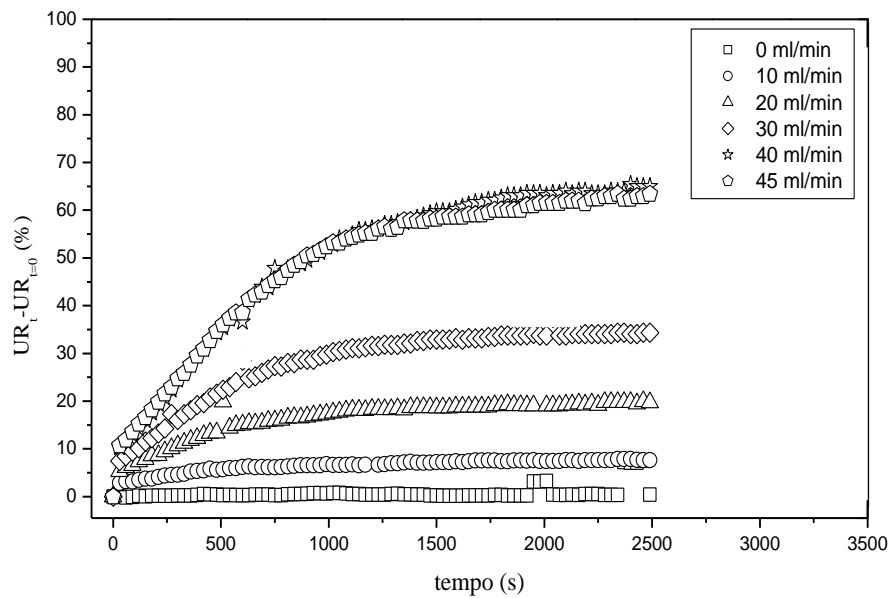


Figura 4.11: Umidade relativa em função do tempo para o bocal II sob condições de 100°C - $1,4u_{mj}$.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, constata-se que o tempo para que o sistema alcance o regime permanente é dependente das condições operacionais, como por exemplo a vazão de alimentação de água e a geometria do bocal de entrada de gás. Conforme mostra a Figura 4.10, utilizando-se o bocal I com uma vazão de 20 ml/min, por exemplo, foi necessário

aproximadamente, 500 segundos para que o leito entrasse em regime permanente e 1500 segundos para a vazão de 40 ml/min. A Figura 4.11 mostra que, para a vazão de 20 ml/min usando-se o bocal II, são necessários cerca de 1000 segundos e 1750 segundos para a vazão de 40ml/min. Estes valores também indicam a influência da geometria do bocal de entrada de gás no sistema, uma vez que os experimentos realizados utilizando o bocal I necessitam de um menor tempo para que o leito atinja o regime estacionário.

Verifica-se ainda que para uma vazão de 20ml/min a umidade relativa corresponde a aproximadamente 15% e para a vazão de 40ml/min a umidade é equivalente a 60% quando se utiliza o bocal I (Figura 4.10). Empregando-se o bocal II para a vazão de 20 ml a umidade relativa equivale a 20% e 65% para a vazão de 40ml/min (Figura 4.11). Isso porque, para uma mesma temperatura e velocidade do ar de entrada, o acréscimo da vazão de água no interior do leito aumenta a quantidade de umidade que é transferida para a fase gasosa, elevando assim, os valores de umidade relativa do ar na saída do equipamento quando o leito de jorro opera com valores mais elevados de alimentação água. Observa-se ainda que o bocal I apresentou valores de umidade relativa inferiores aos obtidos para o bocal II.

Outro aspecto que merece destaque para as condições operacionais apresentadas é a instabilidade do sistema para a vazão de 45ml/min utilizando o bocal I. No entanto, empregando-se a mesma vazão de alimentação de água para o bocal II este comportamento não é observado, uma vez que as curvas obtidas para as vazões de 40 e 45 ml/min são semelhantes. Isto mostra mais uma vez a influência da geometria do bocal de entrada de gás na estabilidade do equipamento.

A Tabela 4.4 apresenta os valores das vazões máximas de alimentação de água alcançadas pelo leito de jorro em regime para ambos os bocais.

Tabela 4.4: Dados da taxa de evaporação de água para as duas geometrias de bocal.

Temperatura (°C)	Variáveis		Bocal I	Bocal II
	u/u_{mj}	Massa de Inertes (kg)	$Q_{\text{água}}$ (ml/min)	$Q_{\text{água}}$ (ml/min)
85,00	1,25	5,50	30	25
115,00	1,25	5,50	35	35
85,00	1,55	5,50	30	30
115,00	1,55	5,50	50	50
85,00	1,25	8,50	35	35
115,00	1,25	8,50	50	45
85,00	1,55	8,50	45	40
115,00	1,55	8,50	60	60
80,70	1,40	7,00	35	35
119,30	1,40	7,00	55	50
100,00	1,21	7,00	35	35
100,00	1,59	7,00	45	45
100,00	1,40	5,07	35	30
100,00	1,40	8,93	45	50
100,00	1,40	7,00	40	40
100,00	1,40	7,00	40	40

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.4, nota-se que a geometria do bocal de entrada de gás não apresentou influência significativa sobre a taxa de evaporação de água, uma vez que a vazão máxima de alimentação para ambos os bocais foi de 60ml/min nas condições de 115°C - 1,55 u_{mj} e 8,5 kg de inerte. Assim, como esperado, as maiores vazões de alimentação de água foram alcançadas nos ensaios que utilizaram temperatura e velocidade do ar de entrada mais elevadas. Isso pode ser explicado pelo fato de que, com o aumento destes dois parâmetros ocorre um aumento da energia térmica introduzida ao sistema, possibilitando assim que uma maior quantidade de água seja evaporada (RODRIGUES, 1993 e SPITZNER NETO, 2001). Estes autores também observaram um significativo aumento da vazão máxima de alimentação de água com o aumento da altura de leito. Desta forma, fixando-se a temperatura e a vazão do ar de entrada apresentados na Tabela 4.4 pôde-se constatar que a vazão de alimentação de pasta é superior nos experimentos que empregaram uma massa maior de partículas, concordando assim com os dados encontrados na literatura.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os dados de umidade absoluta em função do tempo para o leito de jorro sob as condições de 7 kg de partículas inertes, 100°C e $1,4u_{mj}$.

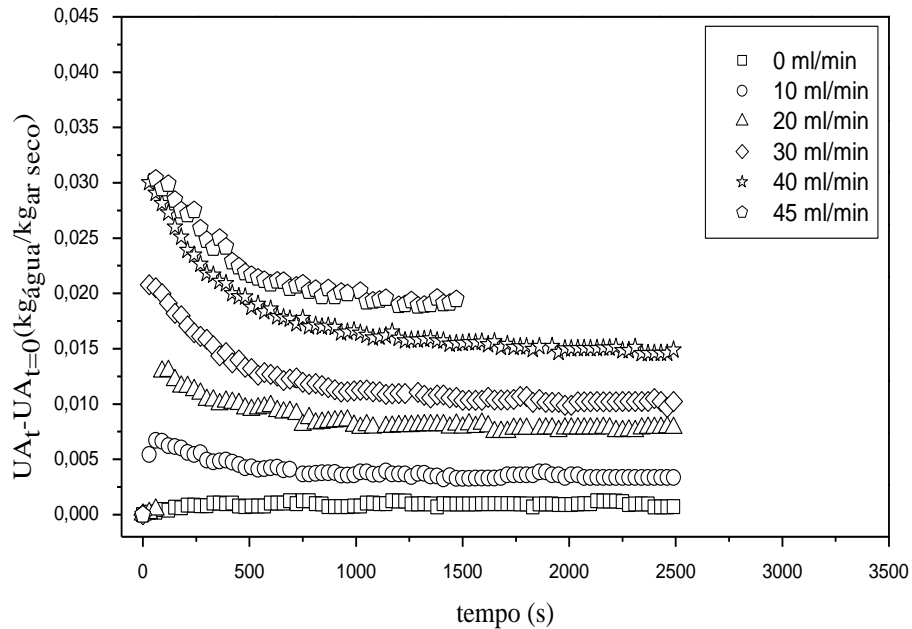


Figura 4.12: Umidade absoluta em função do tempo para o bocal I sob condições de 100°C - $1,4u_{mj}$.

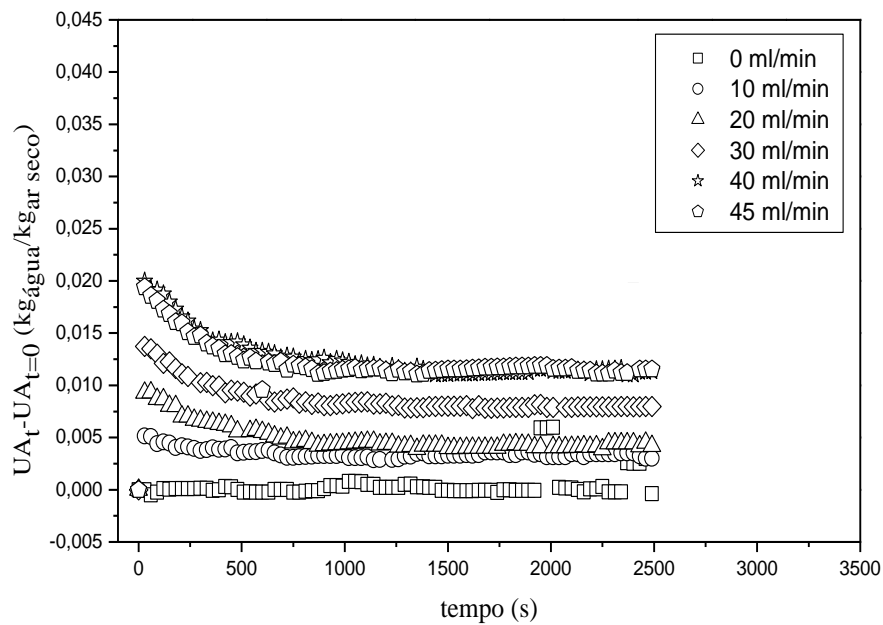


Figura 4.13: Umidade absoluta em função do tempo para o bocal II sob condições de 100°C - $1,4u_{mj}$.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13 mostram que, a quantidade máxima de água evaporada pelo leito é atingida nos primeiros instantes dos ensaios experimentais e que após atingir um ponto máximo, o valor da umidade absoluta apresenta uma diminuição significativa ao longo do tempo, sendo este comportamento evidenciado para as vazões de alimentação de água mais elevadas, como por exemplo, 40 e 45 ml/min. Resultados similares também foram observados por Almeida (2009) e Nascimento *et al.* (2009). Almeida (2009) relata que esta diminuição da umidade absoluta pode ter sido ocasionada por uma redução na porosidade do leito na região anular, ocasionando assim uma canalização do ar para a região de jorro, o que conseqüentemente reduz a área de contato com o ar de secagem para a transferência de calor e massa.

É possível ainda confirmar na Figura 4.12 a instabilidade do leito de jorro para a vazão de 45 ml/min utilizando o bocal I, conforme resultados já apresentados para a umidade relativa na Figura 4.10.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os adimensionais de queda de pressão em função do tempo para o leito de jorro com 7 kg de partículas inertes sob as condições de 100°C e $1,4u_{mj}$.

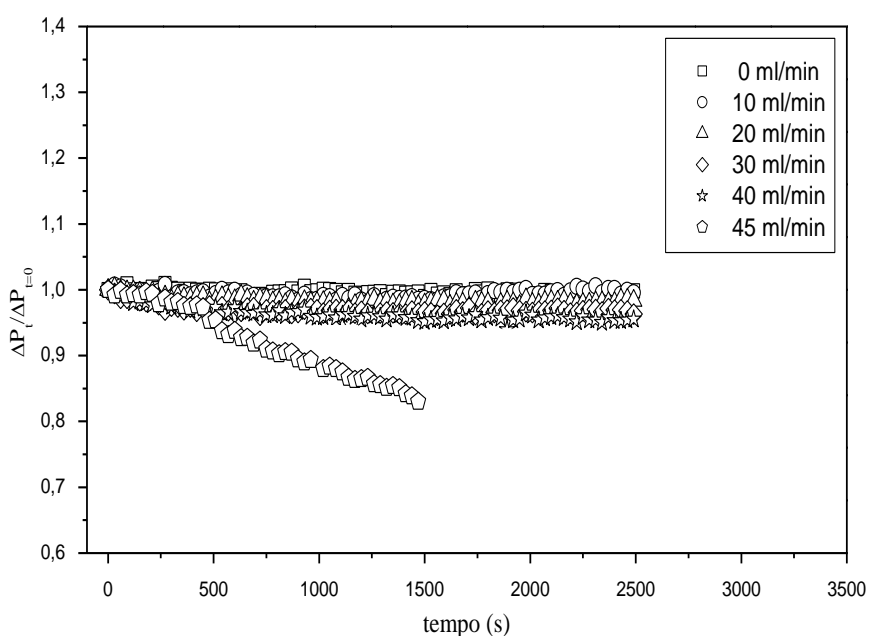


Figura 4.14: Adimensional da queda de pressão em função do tempo para o bocal I sob condições de 100°C - $1,4u_{mj}$.

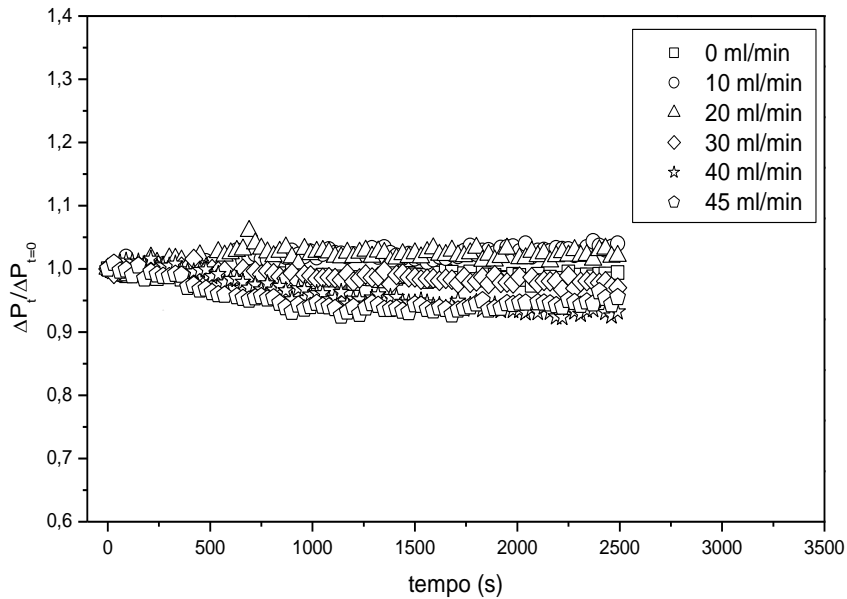


Figura 4.15: Adimensional da queda de pressão no leito em função do tempo para o bocal II sob condições de 100°C - 1,4 u_{mj} .

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15, pode-se verificar a influência da geometria do bocal de entrada de gás na queda de pressão para o leito úmido. Conforme mostra a Figura 4.14, o adimensional da queda de pressão para o bocal I apresenta uma diminuição significativa na maior vazão de alimentação (45 ml/min). Entretanto, para as vazões inferiores, a queda de pressão permanece praticamente constante ao longo tempo ($\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ aproximadamente igual a 1). Os dados obtidos são condizentes aos resultados relatados por Spitzner Neto (1997), Medeiros (2001), Almeida (2009). De acordo com estes autores, a vazão de ar na região anular é reduzida à medida que uma substância líquida ou pastosa é adicionada no interior do leito. Em consequência, ocorre uma canalização do ar para a região de jorro, reduzindo a queda de pressão global. Outro fator que pode contribuir para a obtenção destes resultados, é que a presença do líquido aumenta as forças de interação entre as partículas, provocando a aglomeração destas nas paredes do leito e diminuindo o movimento das partículas na região anular.

Na Figura 4.15 nota-se que, o adimensional da queda de pressão para o bocal II apresenta comportamento distinto ao obtido para o bocal I. Assim como discutido anteriormente, as curvas apresentadas na Figura 4.14 são estáveis durante

todo o processo, com exceção da vazão de 45 ml/min, onde é observada uma diminuição significativa do $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$. É possível constatar na Figura 4.15 que, as curvas obtidas para as vazões de 0 a 45 ml/min divergem significativamente da reta $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}=1$ e que essa divergência sempre é para os valores do adimensional da queda de pressão inferiores a 1, mesmo para a situação da vazão de 45ml/min.

4.2.1 Tratamento de dados para o Bocal I

O tratamento dos dados apresentado neste item foi realizado com base na técnica de regressão múltipla com o auxílio do programa STATISTICA® (Statsoft, 2007). A Tabela 4.5 apresenta os coeficientes de regressão obtidos para o bocal I.

Tabela 4.5: Significância dos coeficientes de regressão para o bocal I.

Fator	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t(6)	p-valor	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média	40,46	1,48	27,41	0,00	36,85	44,08
(1) X_1 (L)	7,14	0,76	9,42	0,00	5,28	8,99
X_1 (Q)*	2,53*	1,09*	2,33*	0,06*	-0,13*	5,19*
(2) X_2 (L)	4,23	0,76	5,59	0,00	2,38	6,09
X_2 (Q)*	-0,49*	1,09*	-0,45*	0,67*	-3,15*	2,17*
(3) X_3 (L)	5,12	0,76	6,75	0,00	3,26	6,97
X_3 (Q)*	-0,49*	1,09*	-0,45*	0,67*	-3,15*	2,17*
X_1X_2 *	1,88*	0,90*	2,08*	0,08*	-0,33*	4,08*
X_1X_3 *	0,63*	0,90*	0,69*	0,51*	-1,58*	2,83*
X_2X_3 *	0,63*	0,90*	0,69*	0,51*	-1,58*	2,83*

$R^2 = 96,715\%$, * Termos estatisticamente não significativos

Em que, X_1 , X_2 e X_3 correspondem aos valores codificados da temperatura do ar de entrada, da razão u/u_{jm} e da massa de partículas inertes, respectivamente. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q).

Adotando-se um limite de confiança de 95%, os valores em asterisco apresentam p-valor superior que o estipulado não sendo, portanto, considerados estatisticamente significativos, podendo assim ser eliminados. Para ilustrar quais

variáveis, ou quais interações apresentam maior influência sobre a taxa de evaporação de água, apresenta-se a Figura 4.16.

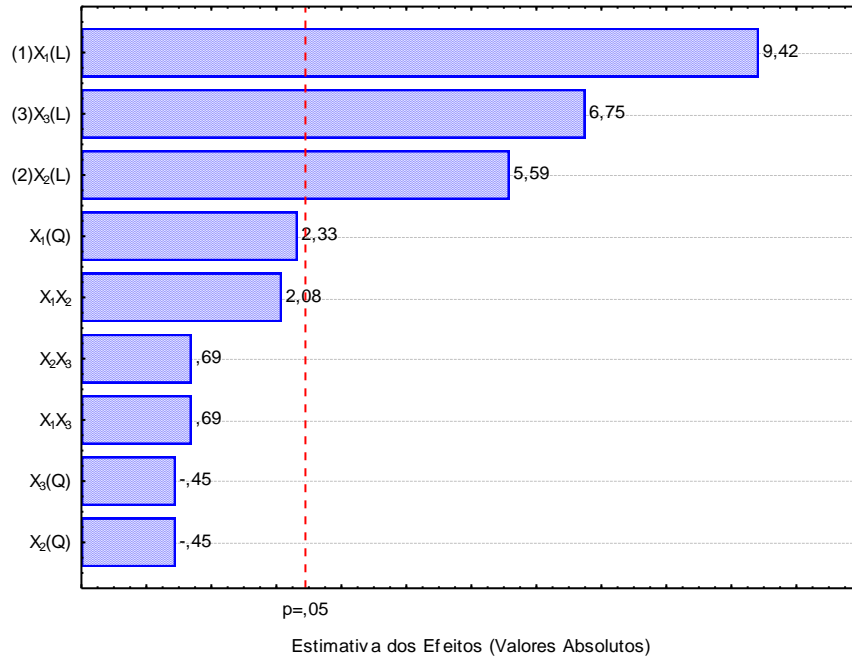


Figura 4.16: Diagrama de Pareto para o bocal I.

Este diagrama apresenta a estimativa dos efeitos distribuídos de acordo com seu tamanho absoluto, calculado através do teste “t” de Student. A linha vertical que corta os efeitos padronizados indica a magnitude mínima dos efeitos estatisticamente significantes. Os valores a direita dessa linha são significativos e os da esquerda não apresentam qualquer influência sobre a variável dependente. Desta forma, o fator que exerce maior influência sobre a taxa de evaporação de água é a temperatura do ar de entrada, seguida da carga de inertes e da razão u/u_{jm} , respectivamente.

Eliminando-se um a um os termos não significativos, os fatores X₁(Q) e X₁X₂ tornam-se estatisticamente relevantes. Assim, a Tabela 4.6 apresenta apenas os coeficientes estatisticamente atuantes sobre a taxa de evaporação de água para o bocal I.

Tabela 4.6: Coeficientes de regressão estatisticamente significativos.

Fator	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(10)	p-valor	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média	39,77	0,86	46,41	0,00	37,86	41,68
(1)X ₁ (L)	7,14	0,65	10,98	0,00	5,69	8,59
X ₁ (Q)	2,53	0,93	2,71	0,02	0,45	4,61
(2)X ₂ (L)	4,23	0,65	6,51	0,00	2,78	5,68
(3)X ₃ (L)	5,12	0,65	7,87	0,00	3,67	6,56
X ₁ X ₂	1,87	0,77	2,42	0,04	0,15	3,60

$R^2 = 95,967\%$

Verifica-se nos resultados apresentados na Tabela 4.6 que todos os coeficientes obtidos apresentam valores positivos, indicando que as condições ótimas são alcançadas com elevados valores de carga de inertes, temperatura e velocidade do ar de entrada. Além disso, o alto valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 95,967\%$) demonstra um bom ajuste aos dados experimentais, considerando um limite de 95%.

Desta forma, a equação empírica que representa a taxa de evaporação de água em função das variáveis independentes codificadas para o bocal I é representada pela Equação 4.4.

$$Q_{\text{água}}(\text{bocal I}) = 39,77 + 7,14x_1 + 2,53x_1^2 + 4,23x_2 + 5,12x_3 + 1,87x_1x_2 \quad (4.4)$$

A equação empírica apresentada na Equação 4.3 foi expressa como superfície de resposta, a fim de ilustrar os efeitos individuais e de interação da massa de partículas inertes, temperatura e velocidade do ar de entrada sobre a taxa de evaporação de água, conforme mostram as Figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

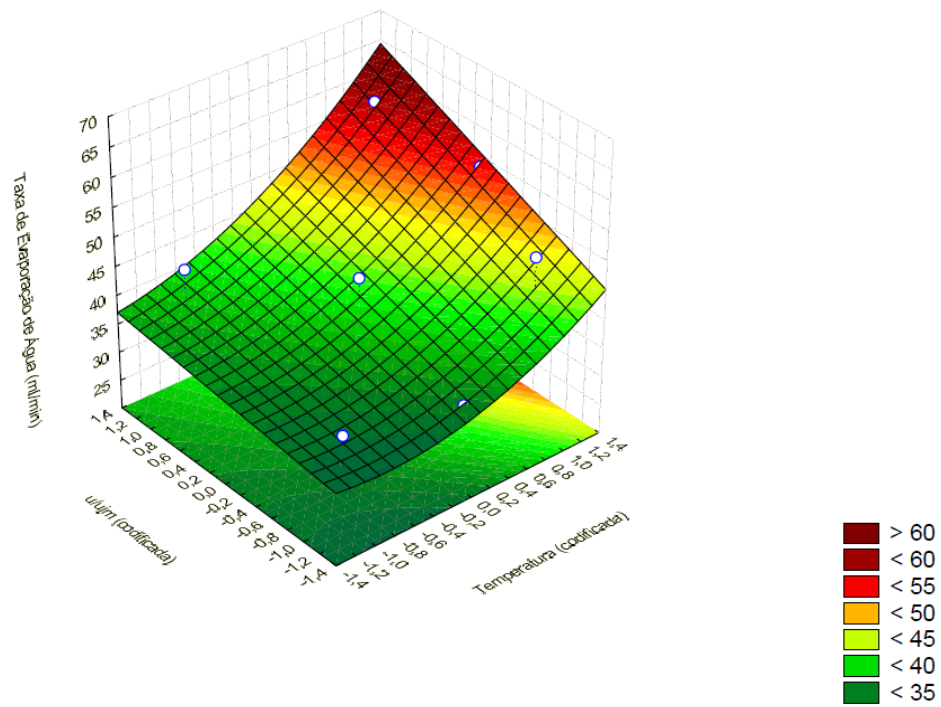


Figura 4.17: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da u/u_{jm} codificada para $m_p=7\text{kg}$.

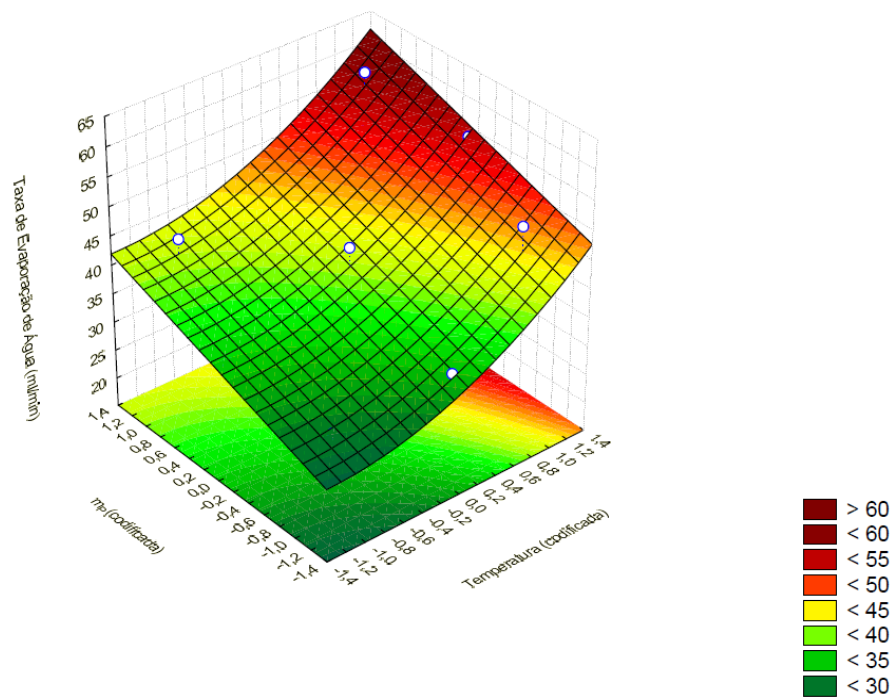


Figura 4.18: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da massa de partículas codificada para $u/u_{jm}=1,4$.

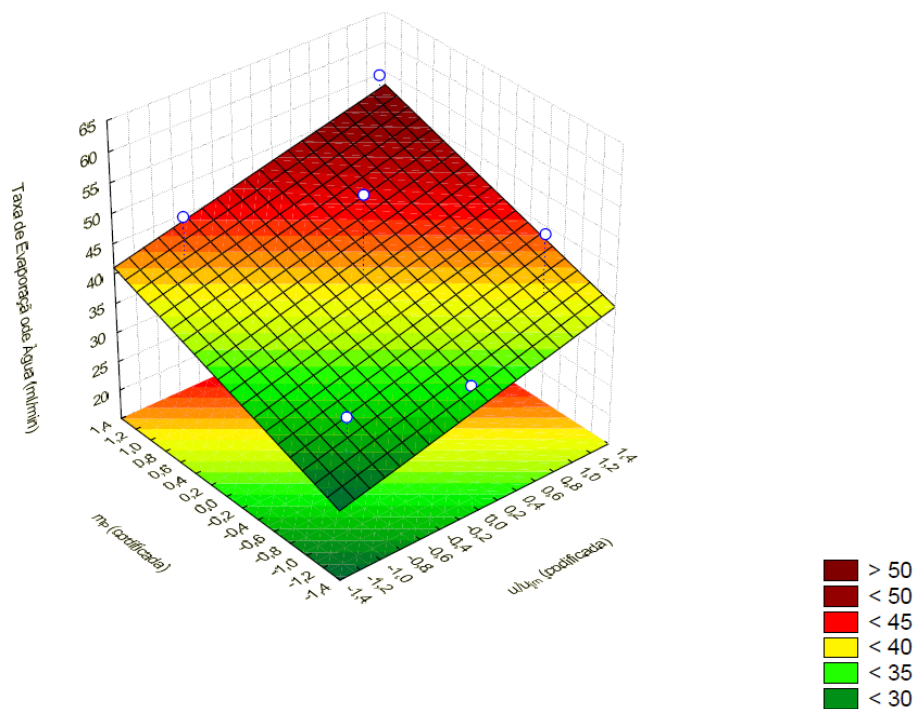


Figura 4.19: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da massa de partículas e da u/u_{jm} codificada para $T=100^{\circ}\text{C}$.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam o efeito quadrático da temperatura e a Figura 4.19 mostra o efeito linear tanto da velocidade do ar de entrada quanto da carga de inertes sobre a taxa de evaporação de água. Verifica-se também o efeito positivo de cada variável independente, mostrando que, assim como discutido anteriormente, o aumento de ambas as variáveis independentes faz com que o sistema alcance vazões de alimentação de água mais elevadas. Assim, a faixa ótima de operação é dada para as condições de $119,3^{\circ}\text{C}$, $1,59 u/u_{jm}$ e $8,93\text{kg}$.

4.2.2 Tratamento de dados para Bocal II

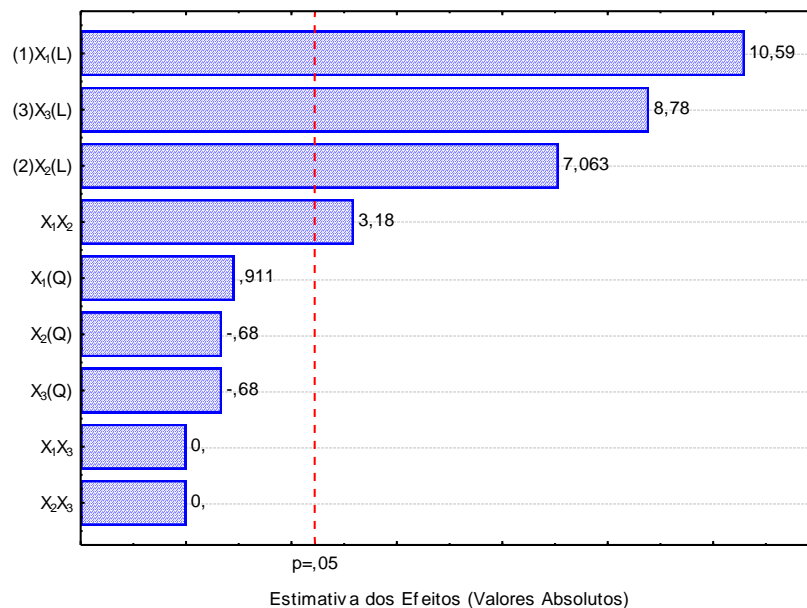
A análise dos dados apresentada nesta sessão foi conduzida da mesma forma que a apresentada no item anterior. Deste modo, a Tabela 4.7 apresenta os coeficientes de regressão obtidos para o bocal II.

Tabela 4.7: Significância dos coeficientes de regressão para o bocal II.

Fator	Coefficiente de Regressão	Erro Padrão	t(6)	p-valor	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média	40,61	1,29	31,50	0,00	37,46	43,77
(1) X ₁ (L)	7,01	0,66	10,59	0,00	5,39	8,63
X ₁ (Q)*	0,87*	0,95*	0,91*	0,40*	-1,46*	3,19*
(2) X ₂ (L)	4,67	0,66	7,06	0,00	3,05	6,29
X ₂ (Q)*	-0,64*	0,95*	-0,68*	0,52*	-2,97*	1,68*
(3) X ₃ (L)	5,81	0,66	8,78	0,00	4,19	7,43
X ₃ (Q)*	-0,64*	0,95*	-0,68*	0,52*	-2,97*	1,68*
X ₁ X ₂	2,50	0,79	3,18	0,02	0,57	4,43
X ₁ X ₃ *	0,00*	0,79*	0,00*	1,00*	-1,93*	1,93*
X ₂ X ₃ *	0,00*	0,79*	0,00*	1,00*	-1,93*	1,93*

$R^2 = 97,666$, * Termos estatisticamente não significativos

Em que, X₁, X₂ e X₃ representam os valores codificados da temperatura do ar de entrada, da razão u/u_{jm} e da massa de partículas inertes, respectivamente. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q). A descrição das variáveis, ou das interações que apresentam maior influência na taxa de evaporação de água é apresentada pelo diagrama de Pareto, conforme mostra a Figura 4.20.

**Figura 4.20:** Diagrama de Pareto para o bocal II.

Aqui também foi adotado um limite de confiança de 95%, no qual, os valores em asterisco apresentam p-valor superior que o estipulado não sendo, portanto, considerados estatisticamente importantes, podendo assim ser eliminados. A Tabela 4.8 apresenta apenas os termos estatisticamente relevantes sobre a taxa de evaporação de água para o bocal II.

Tabela 4.8: Coeficientes de regressão estatisticamente significativos.

Fator	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(11)	p-valor	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média	40,31	0,47	86,33	0,00	39,28	41,34
(1)X ₁ (L)	7,01	0,56	12,62	0,00	5,79	8,23
(2)X ₂ (L)	4,67	0,56	8,42	0,00	3,45	5,90
(3)X ₃ (L)	5,81	0,56	10,46	0,00	4,59	7,03
X ₁ X ₂	2,50	0,66	3,79	0,00	1,05	3,95

R² = 96,99%

Verifica-se nos resultados apresentados na Tabela 4.8 que, assim como para o bocal I todos os coeficientes apresentam valores positivos, mostrando que as condições ótimas da taxa de evaporação de água são obtidas para os valores mais elevados das variáveis independentes analisadas. Além disso, o coeficiente de determinação (R² = 96,99%) demonstra um bom ajuste aos dados experimentais, considerando um limite de 95%.

Deste modo, a equação empírica que representa a taxa de evaporação de água em função das variáveis independentes codificadas para o bocal II é representada pela Equação 4.5.

$$Q_{\text{água}}(\text{bocalII}) = 40,31 + 7,01x_1 + 4,67x_2 + 5,81x_3 + 2,5x_1x_2 \quad (4.5)$$

As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam as superfícies de respostas para a taxa de evaporação de água em função das combinações da temperatura do ar de entrada, da massa de partículas inertes e da razão u/u_{jm} .

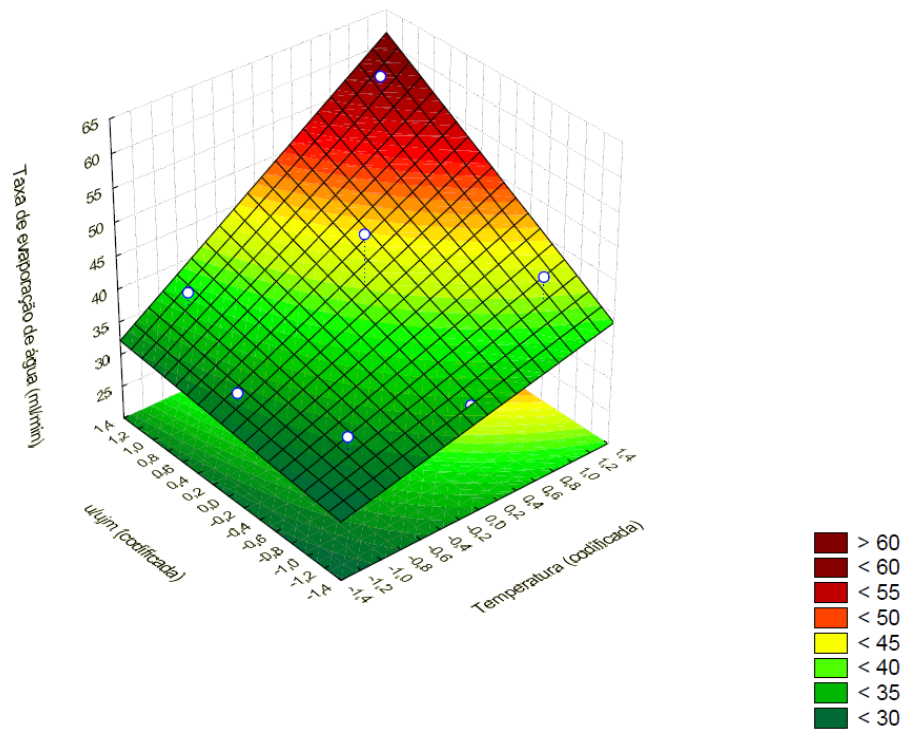


Figura 4.21: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da u/u_{jm} codificada para $m_p=7\text{kg}$.

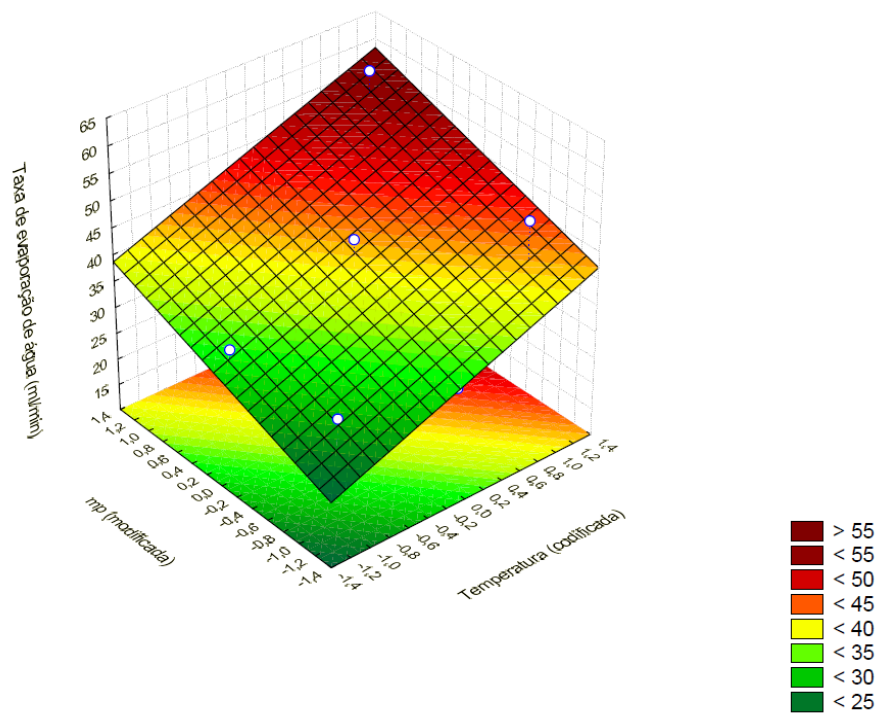


Figura 4.22: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da temperatura e da massa de partículas codificada para $u/u_{jm}=1,4$.

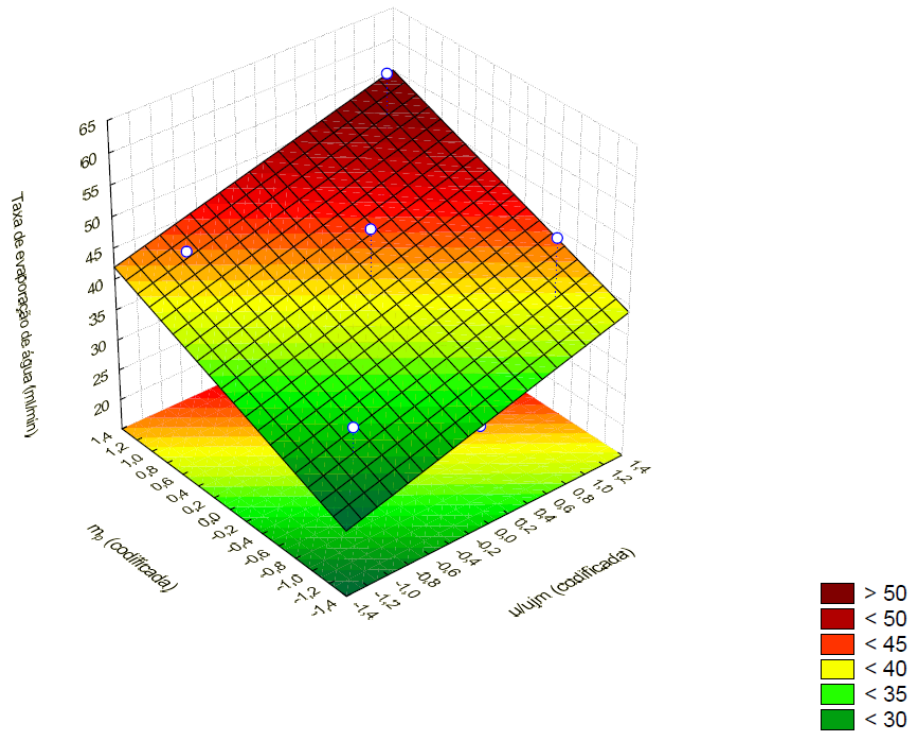


Figura 4.23: Superfície de resposta da taxa de evaporação de água em função da massa de partículas e da u/u_{jm} codificada para $T=100^{\circ}\text{C}$.

Observa-se nos resultados apresentados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 que o comportamento das variáveis independentes é similar ao obtido para o bocal I. Assim, constata-se que os maiores valores da taxa de evaporação de água também foram alcançados para a combinação dos níveis mais altos das variáveis independentes analisadas, sendo estas $119,3^{\circ}\text{C}$, $1,59 u/u_{jm}$ e $8,93\text{kg}$.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho referentes à caracterização fluidodinâmica do leito de jorro, dos ensaios de evaporação de água, bem como da aplicação da técnica de regressão múltipla.

Os ensaios fluidodinâmicos realizados para ambas as geometrias de bocal de entrada de ar proporcionaram dados condizentes aos encontrados na literatura. Conforme os dados obtidos, tanto para o leito vazio como para o leito carregado com partículas inertes, a temperatura não exerce influência significativa sobre os parâmetros fluidodinâmicos do leito. Com relação à massa de inertes, foi constatado que a queda de pressão e velocidade mínima de jorro elevam-se com o aumento da carga de inertes. Os ensaios experimentais mostraram ainda que a geometria do bocal de entrada de gás exerceu influência na fluidodinâmica do leito, uma vez que, a queda de pressão de mínimo jorro foi superior em grande parte dos testes que empregaram o bocal I (tipo Venturi).

Os dados de umidade relativa mostraram que, o tempo para que o sistema alcance o regime permanente foi dependente das condições operacionais aplicadas, como por exemplo, a vazão de alimentação de água e a geometria do bocal de entrada de gás. Verificou-se também que o tipo de bocal empregado influencia na estabilidade do sistema. Os ensaios de evaporação de água mostraram ainda que, a geometria do bocal de entrada de gás não exerceu influência expressiva sobre a taxa de evaporação de água, uma vez que a vazão máxima de alimentação para ambos os bocais foi de 60ml/min nas condições de 115°C - $1,55u_{mj}$ e 8,5 kg de inerte. Assim como esperado, os maiores valores de vazão de alimentação de água foram obtidos nos ensaios que utilizaram os maiores valores de massa de partículas inertes, temperatura e de velocidade de ar de entrada.

As curvas de umidade absoluta mostraram que a quantidade máxima de água evaporada pelo leito é atingida nos primeiros instantes dos ensaios experimentais e que após atingir um ponto máximo, o valor da umidade absoluta decresce ao longo do tempo, sendo este comportamento evidenciado para as vazões de alimentação de água mais elevadas.

O adimensional da queda de pressão mostra que, assim como para a caracterização fluidodinâmica do leito sem a presença de pasta, a geometria do bocal de entrada de gás interferiu no comportamento fluidodinâmico do sistema. Visto que, o bocal I apresentou condições fluidodinâmicas mais estáveis do que as obtidas utilizando o bocal II.

A aplicação da técnica de regressão múltipla possibilitou avaliar a influência conjunta da massa de partículas inertes, da temperatura e da velocidade do ar de entrada na taxa de evaporação de água. A metodologia empregada possibilitou determinar quais os parâmetros e combinação de variáveis que exercem maior influência sobre o processo. Estas informações possibilitaram a obtenção de uma equação empírica e posteriormente a obtenção das superfícies de resposta que ilustrassem os efeitos individuais, bem como de interação das variáveis independentes codificadas sobre a taxa de evaporação de água.

Finalmente, conclui-se que nas condições operacionais estudadas, o bocal I (tipo Venturi) proporcionou condições fluidodinâmicas mais estáveis, tanto para o leito sem a presença de pasta quanto para o leito úmido e que a geometria do bocal de entrada de gás não exerceu influência significativa na taxa máxima de evaporação de água. O parâmetro com maior interferência na taxa de evaporação foi a temperatura do ar de secagem, seguida da massa de partículas inertes e da relação u/u_{jm} . É válido destacar a necessidade de se realizar novos estudos, uma vez que podem existir outros fatores que possam intervir no processo de secagem de pastas em leito de jorro, tais como o ângulo da base cônica e as características do material inerte a ser utilizado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuação da análise criteriosa da interferência das condições operacionais e dos parâmetros geométricos na taxa de evaporação em leito de jorro, são dadas as seguintes sugestões:

- Avaliar a influência de uma outra geometria de bocal de entrada de gás com valores distintos de diâmetro interno;
- Analisar a influência do ângulo da base cônica, do tipo de material inerte, no comportamento fluidodinâmico e na taxa de evaporação de água no sistema;
- Estudar a secagem de pastas reais, verificando-se a influência das características da pasta no processo de secagem em leito de jorro;
- Avaliar a aplicação de uma rede neural para estimativa de variáveis operacionais a partir de dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARCA, A. **Modelagem, Simulação e Verificação Experimental da Secagem Contínua de Pastas em Leito de Jorro**. 2001. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da Secagem de Pastas em Leito de Jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

BACELOS, M. S. **Análise do Comportamento da Fluidodinâmica do Leito de Jorro com Misturas de Tamanho de partículas**. 2006. 113 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BARROZO, M. A. S.; DUTRA, C. H. M. C.; MASSARANI, G. Dinâmica do Leito de Jorro Não Convencional. In: Encontro Sobre Escoamentos em Meios Porosos, n.6, 1983, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 1983. p.140-152.

COSTA, M. A. **Fluidodinâmica e Ampliação de Escala de Leitões de jorro Bidimensionais**. 1998. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

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) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

FAN, L-S.; HWANG, S-J.; MATSUURA, A. Hydrodynamic Behaviour Of A Draft Tube Gas-Liquidsolid Spouted Bed. **Chemical Engineering Science**, v. 39, n. 12, p. 1677-1688, 1984.

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

FERNANDES, C. F. **Análise da Eficiência Energética da Secagem de Pastas em Leito de Jorro**. 2005. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Drying of Solutions, Slurries, and Pastes. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds.** Canadá: Editora Cambridge, 2011. p. 206-221.

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

FREITAS, L. A. P.; FREIRE, J. T. Heat Transfer in a Draft Tube Spouted Bed with Bottom Solids Feed. **Powder Technology**, n. 114, p. 152-162, Maio. 2001.

GIUDICI, R.; CHIAPPETTA, A.; NASCIMENTO, C. A. O. Perda de Carga em Leito de Jorro Modificado. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 6, 1983, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1983. p. 128-139.

JACOB LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; PINTO, L. A. A.; QUEIROZ, M. I. Secagem da Microalga *Aphanothece Microscópica Nägeli* em Leito de jorro. **Alim. Nutr**, Araraquara, v.17, n.4, p. 387-392, 2006.

LESCANO, C. A. A. **Análise da Secagem de Resíduo de Leite de Soja “Okara” em Secadores de Leito de Jorro e de Cilindro Rotativo Assistido a Microondas.** 2009. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

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

LILEY, R. E.; REID, R. C.; BUCK, E. Physical and Chemical Data. In: PERRY, R. H.; GREEN, G. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 6. Ed. New York: McGraw-Hill, 1984. p. 3-1 a 3-291.

MAIALLE, K. G. **Construção de um Secador de Jorro Fluidizado Bidimensional e Análise da sua Fluidodinâmica.** 1996. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 1996.

MARRETO, R. N.; FREIRE, J. T.; FREITAS, L. A. P. Drying of Pharmaceuticals: The Applicability of Spouted Beds. **Drying Technology**, Londres, v. 24, n.3, p. 327-338, 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 Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MEDEIROS, M. F. D.; ALSINA, O. L. S.; ROCHA, S. C.; JERÔNIMO, C. E. M.; MATA, A. L. M. L.; MEDEIROS, U. K. L.; FURTUNATO, A. A. Escoabilidade de Leitos de Partículas Inertes com Polpa de Frutas Tropicais: Efeitos na Secagem em Leito de Jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 475-480, 2001.

MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M.; MATA, A. L. M. L.; MEDEIROS, U. K. L.; MATA, A. L. M. L. Drying of Pulps of Tropical Fruits in Spouted Bed: Effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, Londres, v. 20, n. 4&5, p. 855–881, 2002.

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

MUJUMDAR, A. S. Spouted Bed Technology – A Brief Review. In:_____. **Drying'84.** New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1984. p. 151-157.

NASCIMENTO, B. S.; ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Análise da Secagem de Ovo Homogeneizado em Leito de Jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS – ENEMP 2009, 34., 2009, Campinas. **Anais...** Campinas:UNICAMP, 2009. p. 312-321.

NASCIMENTO, B. S.; ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Análise da Secagem de Soro de Leite em Leito de Jorro. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 18., 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** UNICAMP, UEM, ABEQ, 2010. p. 10172 – 10181.

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.

OJALVO, J. G. O. **Leito de Jorro com Aeração Complementar: Projeto de um Sistema para Operação Contínua e Aspectos Fluidodinâmicos e de Secagem.** 1991. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFSCAR, São Carlos, 1991.

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

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. Design Factors of Conical Spouted Beds and Jet Spouted Beds. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 32, n. 6, p.1245-1250, 1993.

OLIVEIRA, W. P. **Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico**. 1996. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

PASSOS, M. L.; MASSARANI G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Drying Of Pastes In Spouted Beds Of Inert Particles: Design Criteria And Modeling. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997.

PHAN, Q. T. Behaviour of a Conical SpoutedBed Dryer for Animal Blood. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 6, p.426-434, 1983.

RÉ, M. I. **Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro**. 1986. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFSCAR, São Carlos, 1986.

REYES A. E. S. **Secagem de Suspensões em Leito de Jorro Cônico**. 1993. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

REYES, A. E.; MASSARANI, G. Hidrodinâmica y Evaporacion de Agua em um Lecho de Chorro Conico. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 20. 1992. São Carlos. **Anais...** São Carlos: Universidade Federal de 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 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. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.

RODRIGUES; M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: Uma Estratégia Seqüencial de Planejamentos**. Campinas-SP. Casa do pão Editora, 2005. 326p.

RODRIGUES, A. M. C.; TOBINAGA, S. Secagem de Suspensão Protéica de Peixe em Leito de Jorro: Propriedades Funcionais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 31-36, 2001.

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. 97p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

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

SILVA, V. M. **Estudo da Secagem em Leito Fixo e de Jorro do Resíduo Industrial do Processamento de Suco de Frutas Cítricas**. 2007. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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 Fármacos e Medicamentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2003.

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

SPITZNER NETO, P. I. **Estudo da Secagem de Pastas e da Fluidodinâmica do Leito de Jorro na Presença de Pastas e Líquidos**. 2001. 284 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

WACHIRAPHANSKUL, S.; DEVAHASTIN, S. Drying Kinetics and Quality of Okara Dried in a Jet Spouted Bed of Sorbent Particles. **LWT**, v. 40, p. 207-219, 2007.

WANG, Z. G.; BI, H. T.; LIM, C. J. Numerical Simulations Of Hydrodynamic Behaviors In Conical Spouted Beds. **China Particuology**, v. 4, n. 3-4, p. 194-203, 2006.

ZÜLKE, K. R. **Leito de Jorro com Aeração Complementar, Aspectos Hidrodinâmicos e de Secagem**. 1988. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1988.