

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DAS VARIÁVEIS FLUIDODINÂMICAS NA SECAGEM DE POLPA
DE ACEROLA EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL**

LÍGIA MARIA RIBEIRO LIMA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

DEZEMBRO - 1996

LÍGIA MARIA RIBEIRO LIMA

ESTUDO DAS VARIÁVEIS FLUIDODINÂMICAS NA SECAGEM DE POLPA DE
ACEROLA EM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia Química da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de Mestre.

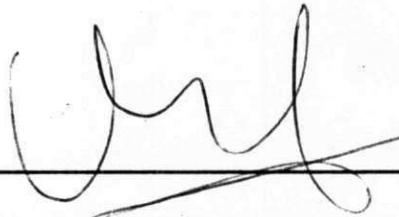
Área de Concentração: Operações e Processos

Orientador: Prof^a D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina - DEQ / CCT/ UFPB

Campina Grande - Paraíba

Dezembro - 1996

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 13 / 12 / 1996



Profª D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
(Orientadora)



Profª D. Sc. Ana Lúcia de Medeiros Lula da Mata
(Examinador)



Prof. D. Sc. Michel François Fossy
(Examinador)

Campina Grande - Paraíba
Dezembro - 1996

DEDICATÓRIA

**A Deus
A meus pais, Diva Ribeiro de Lima e José Dário de Lima
À minha irmã, Lenilde Mérgia Ribeiro Lima**

AGRADECIMENTOS

À Professora D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, por sua orientação através de sugestões que contribuíram para a construção e a finalização deste trabalho.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, nas pessoas do coordenador Prof. Ph. D. Kepler Borges França e da vice-coordenadora Prof^a D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina; e das secretárias Maria José B. Cavalcanti e Maricé P. da Silva.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro destinado a este trabalho.

Aos funcionários do laboratório, Sr. Lopes e Sr. José Marques, pela prestativa colaboração quando solicitados.

Aos alunos de iniciação científica, Edinalda Augusta Moreira, Elcimar da S. Nóbrega e Fábio H. L. Soares, pelo acompanhamento durante as práticas experimentais.

A todos os colegas do mestrado, em especial aos companheiros de laboratório, Lucianna e Osvaldo, por compartilharem todas as dificuldades e realizações durante o desenvolvimento deste trabalho; e às amigas Djane e Josy, pelas palavras de apoio e incentivo.

À amiga e companheira de pesquisa Vera, por tudo que compartilhamos, dúvidas, estudos, discussões; porém sempre com muito respeito pelo ser humano.

Além de dedicar este trabalho à minha irmã Mérgia, agradeço e declaro que, sem a sua ajuda, tanto emocional quanto profissional, esta dissertação não teria sido concluída com tanta dedicação.

Às minhas tias Margareth, Socorro e Maria da Luz, pelo empréstimo do computador e da impressora.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para o sucesso deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo da dinâmica do secador em leito de jorro convencional, para secagem de polpa de acerola (*Malpighia emarginata*, DC). Inicialmente, foram feitos testes fluidodinâmicos através da análise das curvas típicas de um secador em leito de jorro, com o objetivo de obter as variáveis fluidodinâmicas que possam propiciar ao leito uma boa qualidade do jorro, em presença da polpa. Também foram estudados as circulações local e média de partículas sólidas e os perfis axial e radial de queda de pressão, para várias condições de operação. Os resultados mostraram que, com o aumento da porcentagem de polpa alimentada, os valores das variáveis fluidodinâmicas de queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro mínimo aumentaram, ao contrário da velocidade de jorro mínimo, que não sofreu influência significativa deste parâmetro; observou-se, ainda, que a presença de polpa diminui a circulação de sólidos. Os valores dos parâmetros fluidodinâmicos foram comparados com os obtidos através de correlações matemáticas. Foi verificado que, para a queda de pressão máxima (ΔP_M), queda de pressão de jorro mínimo (ΔP_{jm}) e velocidade de jorro mínimo (U_{jm}), as equações que apresentaram resultados mais satisfatórios foram as de ASENJO et al. (1977), LEFROY & DAVIDSON (1969) e SAMPAIO (1978), e CHOI & MEISEN (1992), respectivamente. Em geral, as correlações disponíveis para leitos convencionais, sem a presença de suspensões, não se mostram adequadas para representar os dados experimentais, sugerindo-se a necessidade de desenvolver tanto correlações empíricas como modelos que incluam o efeito da suspensão sobre a fluidodinâmica do leito de jorro.

ABSTRACT

This work deals with the study of the dynamics of the conventional spouted bed drier for the drying of West Indian cherry (*Malpighia emarginata*, DC) pulp. At first, the fluid dynamics parameters that allow a good quality of the spout when pulp is present in the bed, were established from the analysis of the characteristic curves. The local and average solid circulation, axial and radial profiles of pressure drop were measure for various operational conditions. The results show that as long as the pulp to inert particles mass ratio was increased, greater values of the maximum pressure drop and minimum spouting pressure drop are needed. On the contrary, the minimum spouting air rate was not significant, influenced by the percentage of pulp. It was also observed that the pulp in the bed reduces the solid circulation rate. The experimental fluid dynamics parameters were compared with the ones predicted by correlations obtained from literature. It was found that the maximum pressure drop, minimum spouting pressure drop and minimum spouting velocity are better predicted by the ASENJO et al. (1977), LEFROY & DAVIDSON (1969) and SAMPAIO (1978), and CHOI & MEISEN (1992) equations, respectively. In general, the available correlations, developed for conventional beds without the presence of suspensions are not appropriated to describe the experimental data. It appear that empirical correlations including the effect of the suspension on the fluid dynamics of the spouted beds must be proposed in order to obtain good agreement with the experimental observations.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_A	➔	Área do anel (m^2)
A_{AM}	➔	Área da tomada de amostra (m^2)
A_C	➔	Área da coluna (m^2)
D_C	➔	Diâmetro da coluna (m)
D_j	➔	Diâmetro do jorro (m)
d_o	➔	Diâmetro do orifício de entrada de ar (m)
d_p	➔	Diâmetro da partícula (m)
d_v	➔	Diâmetro da esfera de igual volume (m)
g	➔	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	➔	Altura do leito (m)
H_f	➔	Altura da fonte (m)
H_M	➔	Altura máxima de jorro estável (m)
L_e	➔	Distância do bocal de entrada de fluido à base do tubo central (m)
M_i	➔	Massa de partículas (kg)
M_p	➔	Massa da polpa (kg)
Q	➔	Vazão de ar de entrada (m^3/s)
Q_{jm}	➔	Vazão de jorro mínimo (m^3/s)
R	➔	Raio do corpo cilíndrico (m)
r	➔	Posição radial (m)
U	➔	Velocidade total do gás (m/s)
U_{jm}	➔	Velocidade de jorro mínimo (m/s)
V_w	➔	Velocidade das partículas na parede da coluna (m/s)
W_l	➔	Circulação média de sólidos (kg/s)
W_{ls}	➔	Circulação local de sólidos (kg/s)
W_{pm}	➔	Massa coletada na célula por unidade de tempo (kg/s)
W_s	➔	Circulação de sólidos (kg/s)

W_{ts}	➔	Circulação total de sólidos (kg/s)
Z	➔	Coordenada axial (m)
Z_i	➔	Distância medida desde a interface anel-fonte até a posição da célula de medida (m)
ΔP_{je}	➔	Queda de pressão de jorro estável (kgf/m ²)
ΔP_{jm}	➔	Queda de pressão de jorro mínimo (kgf/m ²)
ΔP_M	➔	Queda de pressão máxima (kgf/m ²)
γ	➔	Ângulo de atrito (°)
ε_i	➔	Porosidade do leito fixo
θ	➔	Ângulo da base cônica (°)
ρ_f	➔	Densidade do fluido (kg/m ³)
ρ_l	➔	Densidade do leito (kg/m ³)
ρ_s	➔	Densidade do sólido inerte (kg/m ³)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama esquemático do leito de jorro convencional.....	4
Figura 2.2 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar.....	15
Figura 3.1 - Leito de jorro cone-cilíndrico convencional.....	32
Figura 3.2 - Célula de medidas de circulação de sólidos.....	36
Figura 4.1 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (a) $M_p/M_i=0$ %; (b) $M_p/M_i=2$ %.....	40
Figura 4.2 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (c) $M_p/M_i=3$ %; (d) $M_p/M_i=5$ %.....	41
Figura 4.3 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (e) $M_p/M_i=0$ %; (f) $M_p/M_i=2$ %.....	42
Figura 4.4 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (g) $M_p/M_i=3$ %; (h) $M_p/M_i=5$ %.....	43
Figura 4.5 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (i) $M_p/M_i=0$ %; (j) $M_p/M_i=2$ %.....	44
Figura 4.6 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (k) $M_p/M_i=3$ %; (l) $M_p/M_i=5$ %.....	45
Figura 4.7 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar: (a) $H=18,0$ cm; (b) $H=23,0$ cm.....	47

Figura 4.8 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar: H=28,0 cm.....	48
Figura 4.9 - Curvas características de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar: (a) H=18,0 cm; (b) H=23,0 cm.....	49
Figura 4.10- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar: H=28,0 cm.....	50
Figura 4.11- Queda de pressão máxima em função da altura do leito.....	51
Figura 4.12- Queda de pressão de jorro mínimo em função da altura do leito.....	52
Figura 4.13- Velocidade de jorro mínimo em função da altura do leito.....	53
Figura 4.14- Queda de pressão máxima em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.....	54
Figura 4.15- Queda de pressão de jorro mínimo em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.....	55
Figura 4.16- Velocidade de jorro mínimo em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.....	56
Figura 4.17- Circulação de sólidos correspondente ao anel de amostragem em função da distância radial: H=18,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.....	57
Figura 4.18- Circulação de sólidos correspondente ao anel de amostragem em função da distância radial: H=18,0 cm e $M_p/M_i=5$ %.....	58

Figura 4.19- Circulação total de sólidos em função da relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo: $H=18,0$ cm.....	59
Figura 4.20- Circulação total de sólidos em função da relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo: $H=23,0$ cm.....	59
Figura 4.21- Circulação total de sólidos em função da altura do leito: $M_p/M_i=0$ %.....	61
Figura 4.22- Circulação total de sólidos em função da relação U/U_{jm} . Comparação com correlação matemática: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.....	62
Figura 4.23- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=0,51$ m/s.....	63
Figura 4.24- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=2$ % e $U_j=0,56$ m/s.....	64
Figura 4.25- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; (a) $M_p/M_i=3$ % e $U_j=0,62$ m/s; (b) $M_p/M_i=5$ % e $U_j=0,72$ m/s.....	65
Figura 4.26- Efeito da presença de polpa sobre os perfis de queda de pressão, para a tomada localizada na superfície do leito, seção cônica: $H=18,0$ cm.....	66
Figura 4.27- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm; (a) $M_p/M_i=0$ % e $U_j=0,80$ m/s; (b) $M_p/M_i=2$ % e $U_j=1,06$ m/s.....	67
Figura 4.28- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=28,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=1,06$ m/s.....	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Caracterização das partículas de poliestireno.....	30
TABELA 3.2 - Propriedades da polpa de acerola.....	31
TABELA A.1 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=18,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.....	91
TABELA A.2 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=18,0 cm e $M_p/M_i=2$ %.....	92
TABELA A.3 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=18,0 cm e $M_p/M_i=3$ %.....	93
TABELA A.4 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=18,0 cm e $M_p/M_i=5$ %.....	94
TABELA A.5 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=23,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.....	95
TABELA A.6 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=23,0 cm e $M_p/M_i=2$ %.....	96
TABELA A.7 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=23,0 cm e $M_p/M_i=3$ %.....	97
TABELA A.8 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=23,0 cm e $M_p/M_i=5$ %.....	98

TABELA A.9 - Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=28,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.....	99
TABELA A.10- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=28,0 cm e $M_p/M_i=2$ %.....	100
TABELA A.11- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=28,0 cm e $M_p/M_i=3$ %.....	101
TABELA A.12- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=28,0 cm e $M_p/M_i=5$ %.....	102
TABELA A.13- Efeito da altura do leito de inertes sobre os parâmetros fluidodinâmicos com e sem polpa de acerola.....	103
TABELA A.14- Valores da queda de pressão máxima de jorro experimentais e calculados através de correlações matemáticas.....	104
TABELA A.15- Valores da queda de pressão de jorro mínimo experimentais e calculados através de correlações matemáticas.....	105
TABELA A.16- Valores da velocidade de jorro mínimo experimentais e calculados através de correlações matemáticas.....	106
TABELA B.1 - Valores da massa coletada na tomada de amostra, correspondentes ao anel de amostragem: H=18,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.....	109
TABELA B.2 - Valores da massa coletada na tomada de amostra, correspondentes ao anel de amostragem: H=18,0 cm e $M_p/M_i=5$ %.....	110
TABELA B.3 - Valores calculados da taxa de circulação total de sólidos.....	111

TABELA B.4 - Valores da taxa de circulação total de sólidos, calculados a partir de dados experimentais e através de correlações matemáticas: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.....	111
TABELA C.1 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=0,51$ m/s.....	114
TABELA C.2 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=2$ % e $U_j=0,56$ m/s.....	114
TABELA C.3 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=3$ % e $U_j=0,62$ m/s.....	115
TABELA C.4 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=5$ % e $U_j=0,72$ m/s.....	115
TABELA C.5 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=0,80$ m/s.....	116
TABELA C.6 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm; $M_p/M_i=2$ % e $U_j=1,06$ m/s.....	116
TABELA C.7 - Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=28,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=1,06$ m/s.....	117
TABELA C.8 - Valores do diâmetro de jorro, obtidos através dos dados experimentais dos perfis axial e radial de queda de pressão e calculados por correlações matemáticas.....	117

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1- Considerações sobre a Técnica de Leito de Jorro.....	3
2.1.1- Mecanismo de Secagem.....	11
2.2- Curvas Características do Leito de Jorro.....	13
2.3- Aspectos Fluidodinâmicos.....	16
2.3.1- Altura Máxima de Jorro Estável (H_M).....	17
2.3.2- Queda de Pressão Máxima (ΔP_M).....	17
2.3.3- Queda de Pressão de Jorro Estável (ΔP_{je}).....	19
2.3.4- Velocidade de Jorro Mínimo (U_{jm}).....	20
2.3.5- Circulação de Sólidos (W_s).....	22
2.3.6- Diâmetro do Jorro (D_j).....	26
2.4- Histórico da Matéria-Prima.....	28
2.4.1- A Acerola.....	28
CAPÍTULO III.....	30
MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	30
3.1- Materiais.....	30
3.1.1- Partículas Inertes.....	30
3.1.2- Matéria-Prima Utilizada.....	31
3.2- Equipamentos.....	31
3.2.1- Secador em Leito de Jorro.....	31
3.2.2- Equipamentos Complementares.....	32
3.3- Métodos Experimentais.....	33
3.3.1- Introdução.....	33
3.3.2- Extração e Armazenamento da Polpa de Acerola.....	34

3.3.3- Obtenção das Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar.....	35
3.3.4- Medidas de Circulação de Sólidos.....	35
3.3.5- Perfis Axial e Radial de Queda de Pressão.....	37
CAPÍTULO IV.....	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1- Introdução.....	38
4.2- Tratamento dos Dados Fluidodinâmicos.....	39
4.2.1- Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar.....	39
4.2.2- Efeito da Relação Massa de Polpa / Massa de Partículas Inertes sobre as Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar.....	46
4.2.3- Efeito da Altura do Leito nos Parâmetros Fluidodinâmicos.....	50
4.2.4- Comparação dos Dados Experimentais com Correlações Matemáticas.....	53
4.2.5- Circulação de Partículas Sólidas.....	57
4.2.6- Perfis Axial e Radial de Queda de Pressão.....	62
CAPÍTULO V.....	69
CONCLUSÕES.....	69
CAPÍTULO VI.....	71
SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	71
CAPÍTULO VII.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
APÊNDICES.....	88
APÊNDICE A.....	89
• Valores obtidos experimentalmente para a obtenção das curvas características de queda de pressão, com variação crescente e decrescente da velocidade do ar.....	90
• Efeito da altura do leito nos parâmetros fluidodinâmicos.....	90
• Comparação dos dados fluidodinâmicos experimentais com correlações matemáticas.....	90

APÊNDICE B.....	107
• Valores da massa coletada na tomada de amostra, correspondentes ao anel de amostragem.....	108
• Dados calculados da taxa de circulação total de sólidos.....	108
• Comparação dos valores da taxa de circulação total de sólidos, calculados a partir de dados experimentais e através de correlações matemáticas.....	108
APÊNDICE C.....	112
• Perfis axial e radial de queda de pressão.....	113
• Comparação dos valores do diâmetro do jorro, obtidos através dos dados experimentais dos perfis axial e radial de queda de pressão, com os calculados por correlações matemáticas.....	113

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo estudos sobre a dinâmica de equipamentos destinados à secagem de pastas e suspensões, tendo como principal objetivo a obtenção de um produto de boa qualidade, com um baixo custo de produção.

Para a secagem de diversos tipos de pastas e suspensões, vem sendo utilizado o secador em leito de jorro, como alternativa ao secador "spray". A técnica de contato gás-líquido, denominada leito de jorro, foi desenvolvida inicialmente por MATHUR e GISHLER, no ano de 1955, como um método para secagem de trigo (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

Segundo SCHNEIDER & BRIDGWATER (1989), citados por LIMA (1992), os primeiros estudos sobre secagem de pastas e suspensões em leito de jorro foram realizados na antiga União Soviética por REGER et al. (1967) e partiram da secagem de lacas e tintas. No Brasil, a técnica foi inicialmente estudada por FREIRE (1984), que projetou uma instalação a nível de laboratório e empreendeu os primeiros testes de secagem de pastas (GUBULIN & FREIRE, 1989). O estudo da secagem vem sendo desenvolvido em vários centros de pesquisa, onde a técnica tem sido estendida a uma grande variedade de produtos alimentícios, como frutas cítricas e tomate.

A utilização desta técnica, aplicada à polpa de frutas, permitirá a obtenção de um produto em pó destinado ao setor da indústria agroalimentar (sorvetes, refrescos, doces, compotas, pães, tortas, bolos, etc.) ou para o consumidor final, via reconstituição da polpa ou pastas com boas perspectivas de comercialização no mercado nacional e internacional.

A equipe de Transmissão de Calor e Massa em Meios Porosos e Particulados, do Departamento de Engenharia Química da UFPB, desenvolveu estudos sobre o processamento de urucum e desidratação de frutas tropicais, a partir do ano de 1988. ALMEIDA (1991) analisou o desempenho do secador e a qualidade do pó obtido; LIMA (1992) estudou a secagem, apresentando resultados sobre os fenômenos de transferência de massa, calor e fluidodinâmica do processo; ambos utilizaram como matéria-prima a polpa de umbu (LIMA & ALSINA, 1994).

Recentemente, SILVA (1996) deu continuidade às pesquisas iniciadas por ALMEIDA (1993), realizando experimentos e análises através de correlações, para o estudo do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro com misturas de partículas.

A opção pela utilização da acerola foi motivada pela importância econômica que a mesma vem adquirindo nos últimos anos, na região Nordeste, bem como devido ao seu alto valor nutricional, especialmente como fonte de vitamina C. Este trabalho, originado a partir das sugestões destacadas por LIMA (1992), tem como objetivo analisar os parâmetros fluidodinâmicos importantes para o projeto e operação da unidade de leito de jorro, tais como queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo, obtidos através das curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar, como também realizar o estudo da circulação de partículas sólidas, na região da fonte e, ainda, a distribuição da queda de pressão utilizada para a determinação do diâmetro do jorro.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Considerações Sobre a Técnica de Leito de Jorro

Leitos de jorro tipo cone-cilíndrico foram apresentados no ano de 1955, pelos pesquisadores MATHUR e GISHLER, como um sistema de contato de sólidos granulados e fluidos (ROCHA & TARANTO, 1992). Esta técnica foi inicialmente usada como um método para secagem de trigo, sendo utilizado ar mais quente que na secagem convencional de trigo, sem que o grão fosse danificado. Percebendo que a técnica teria ampla aplicação, estudaram as características de um leito de jorro usando uma variedade de materiais sólidos (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

As principais unidades industriais de leito de jorro foram instaladas no Canadá em 1962, para secagem de ervilhas, lentilhas e sementes de linho. Unidades têm sido, desde então, construídas em vários outros países para uma variedade de formas de secagem, incluindo cristalização, assim como para resfriamento de sólidos, granulação (PAVARINI, 1987), recobrimento de comprimidos (ROCHA & TARANTO, 1992; OLIVEIRA & FREIRE, 1993) e, ainda aplicações industriais que estão em fase experimental, que incluem carbonização e gaseificação do carvão, pirólise de xisto (LEITE et al., 1984; LISBOA et al., 1987; LISBOA, 1988), redução de minério de ferro e até craqueamento de petróleo.

O leito de jorro proposto inicialmente, hoje conhecido como convencional, é constituído de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica, preenchida com partículas relativamente grossas ($d_p > 1,0$ mm) e caracteriza-se pela formação de três regiões distintas: região central, região da fonte e

região anular, como mostra a Figura 2.1. O ar injetado penetra através das partículas sólidas, cuja circulação principia quando a vazão do gás é suficiente para provocar o movimento ascendente destas partículas, formando uma cavidade central vazia dentro do leito de partículas. É a região de maior velocidade do leito, tanto das partículas quanto do gás, apresentando a menor concentração de partículas, sendo por isso denominada região diluída. A níveis acima do leito forma-se uma região de alta porosidade, denominada fonte, onde ocorre a formação de um "chafariz" de partículas que se espalham radialmente e descem pela região anular deslizando para a base do leito, na forma de um leito deslizante. Esta região anular é caracterizada pela baixa porosidade e pelo movimento descendente dos sólidos em contra-corrente com o gás. Nesta região, as partículas movem-se com baixa velocidade, apresentando elevada concentração de partículas, sendo por isso denominada região densa. Embora as partículas possam voltar ao jorro ao longo da interface jorro-anel, a maior parte retorna pela região inferior da base tronco-cônica, onde inverte o sentido do movimento, deslocando-se em um movimento ascendente, caracterizando assim o movimento cíclico das partículas sólidas (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

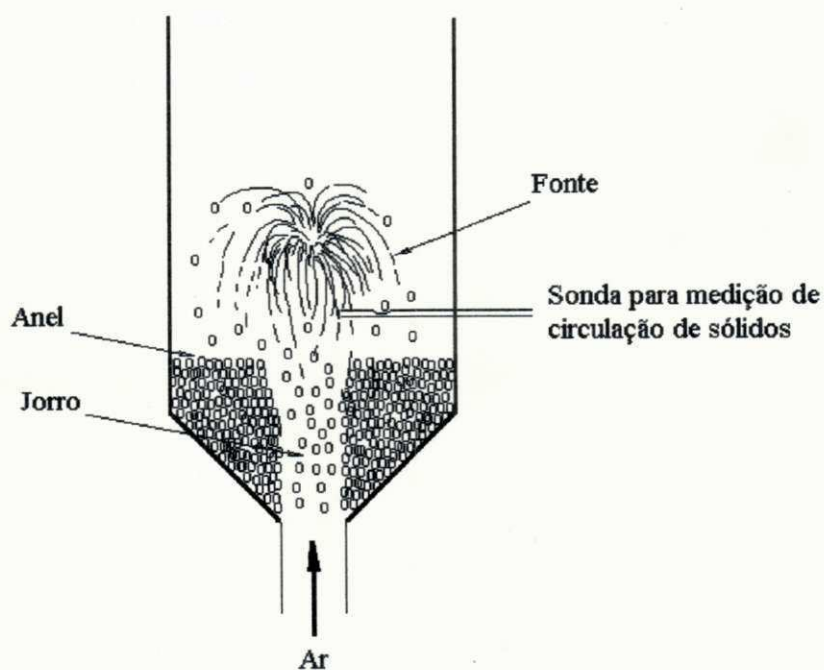


FIGURA 2.1 - Diagrama esquemático do leito de jorro convencional.

Com a finalidade de melhorar o movimento dos sólidos e eliminar o espaço morto no fundo da coluna, utiliza-se uma base cônica, fazendo-se a injeção do fluido no vértice do cone (PEREIRA & REBOLA, 1984).

A utilização do secador tipo leito de jorro tem sido difundida devido às suas características que, em alguns casos, constituem vantagens frente a outras formas de contato sólido-gás, tais como: alta taxa de circulação de partículas inertes, bons coeficientes de transferência de calor e massa e a uniformidade da temperatura no leito, o que propicia principalmente a utilização desta técnica na secagem de pastas e suspensões de materiais termosensíveis como, por exemplo, materiais de caráter orgânico. Outra vantagem desta técnica é o baixo custo de construção, manutenção e operação do equipamento (RODRIGUES, 1993).

Existem certas limitações de ordem operacional do secador em leito de jorro convencional, que foram destacadas por MUJUMDAR (1989), tais como:

- (1) elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- (2) fluxo de ar governado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- (3) limites sobre as dimensões geométricas do leito de jorro para operar com eficiência;
- (4) faixa de operação limitada;
- (5) capacidade limitada por unidade de espaço (devido aos limites no diâmetro do cilindro e na altura máxima de jorro estável);
- (6) dificuldade na mudança de escala.

Algumas modificações no projeto do leito de jorro convencional foram sugeridas na tentativa de superar as citadas limitações. PASSOS et al. (1994) apresentaram uma classificação das diversas mudanças feitas no leito de jorro:

- (a) mudança na geometria do leito de jorro convencional:
 - a.1 - leito de jorro bidimensional;
 - a.2 - leito de jorro cônico.
- (b) modificações na operação do jorro por:
 - b.1 - inserção de um tubo central dentro do leito de partículas;
 - b.2 - introdução de fluido adicional na região anular do leito de jorro (leitos de jorro fluidizados);
 - b.3 - inserção de um aparelho mecânico para melhorar ou produzir a circulação de sólidos (transportador mecânico leito de jorro, leito de jorro vibratório).

De acordo com PASSOS et al. (1994), uma classificação mais geral destas modificações para o leito de jorro convencional, pode ser encontrada nos trabalhos de MATHUR & EPSTEIN (1974); MUJUMDAR (1984) e PASSOS et al. (1987).

Embora, ambos, leito de jorro bidimensional e leito de jorro cônico, exijam baixa queda de pressão de operação, uma alta taxa de vazão de ar é necessária para manter o jorro estável nos leitos de jorro bidimensionais (PASSOS et al., 1991), citados por PASSOS et al. (1994).

Como a dificuldade para a mudança de escala constitui-se em uma limitação nos projetos de secadores de leito de jorro, o leito bidimensional pode ser uma das possíveis opções para solucionar esse problema do leito de jorro convencional. No sentido de resolver o problema de processamento em larga escala, MUJUMDAR (1984) propôs a utilização do leito bidimensional. Teoricamente, a capacidade volumétrica deste leito poderia ser aumentada pela extensão da espessura do leito (PASSOS et al., 1989).

AYUB & ROCHA (1992) utilizaram o leito de jorro bidimensional para o recobrimento de comprimidos, estudando o crescimento do comprimido e a eficiência do processo, inicialmente pesquisado por TARANTO (1992),

onde foi verificada sua viabilidade através do estudo experimental da fluidodinâmica. O recobrimento foi considerado satisfatório por observação visual, mostrando-se uniforme com boa adesão e não ocorrendo o fenômeno de "peeling".

Segundo MELLO & GUBULIN (1993), no trabalho de OJALVO & GUBULIN (1989) foram estudados alguns aspectos fluidodinâmicos, utilizando um leito de jorro bidimensional operando com ar como fluido, onde concluíram que os perfis das curvas características de queda de pressão no leito em função da vazão de leito são semelhantes aos encontrados na literatura para leitos cilíndricos operando com água. Eles também destacaram que não foi observado um aumento na queda de pressão do sistema, logo após a extensão da "fonte", como acontece em leitos que utilizam o ar como fluido.

O leito de jorro de geometria cônica vem, segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), sendo largamente utilizado nos países do leste europeu. BARROSO et al. (1983) iniciaram um estudo desta geometria para a secagem de grãos, identificando de imediato uma vantagem sobre a geometria clássica, que é a menor limitação quanto à altura máxima de jorro estável, além da facilidade de construção.

Apesar desta vantagem, o leito de jorro cônico também está sujeito às limitações da geometria convencional. Dentre as limitações citadas por MUJUMDAR (1982), destacam-se as seguintes:

- (1) elevada queda de pressão antes do jorro aflorar na superfície do leito;
- (2) fluxo de ar limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- (3) dificuldade na mudança de escala.

FERNANDES & MASSARANI (1988) justificam a escolha do leito de jorro cônico para secagem de politereftalato de etileno, devido ao fato do leito cônico propiciar uma intensa circulação de sólidos capaz, possivelmente,

de desagregar o material quando este atingir a temperatura de transição entre as fases amorfa e cristalina.

Recentemente, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no Brasil, para o estudo da secagem em leito de jorro cônico além dos citados anteriormente, dentre eles, REYES & MASSARANI (1993), OLIVEIRA & PASSOS (1994) e SOUZA et al. (1994).

Quanto às modificações na operação do jorro, a principal consiste na inserção de um tubo central, separando a região de jorro da região anular e permitindo a passagem do jorro pelo seu interior. Uma separação entre o tubo e a entrada de ar, possibilita o deslocamento dos sólidos da região anular para o jorro.

GIUDICI et al. (1983) e BRONOWSKI et al. (1985) afirmaram que a introdução de um tubo cilíndrico foi desenvolvida por MANN & CROSBY (1975). Enquanto que ZULKE et al. (1987) destacaram que tal modificação foi proposta por BUCHANAN & WILSON (1965). Verificaram que, para alturas crescentes da carga, há uma diminuição considerável do fluxo de ar pela região anular, o que tira do sistema a sua principal característica — o contato sólido-fluido. Eles observaram também, nos casos de secagem, que se perde muita energia com o gás que deixa o sistema, visto que quase toda a troca térmica se dá no interior do tubo central, onde a velocidade superficial do fluido é elevada.

MUJUMDAR (1989) destaca as seguintes vantagens para a utilização desta configuração não convencional:

- (1) a recirculação dos sólidos inicia-se a menores quedas de pressão;
- (2) a taxa de recirculação pode ser variada independentemente do diâmetro da coluna, altura do leito e tamanho da partícula;
- (3) maior controle do tempo de residência da partícula nas regiões do jorro e anular;

- (4) deixa de existir a limitação quanto à altura máxima de jorro estável;
- (5) menores vazões de ar são requeridas para uma dada recirculação de sólidos.

No entanto, algumas desvantagens quanto ao uso desta técnica, foram observadas no mesmo trabalho:

- (1) a mistura entre as partículas é reduzida;
- (2) projeto mais complexo;
- (3) tendência de entupimento quando inicia-se ou encerra-se o movimento;
- (4) limitação no fluxo anular do fluido;
- (5) menores taxas de transferência de calor e massa devido à maior regularidade no movimento das partículas.

BARROSO et al. (1983), visando o projeto de secadores de grãos, estudaram a dinâmica do leito de jorro utilizando partículas de plástico, arroz e soja, em três configurações não convencionais: leito cone-cilíndrico com tubo interior, leito cônico e leito cônico com tubo interior. Devido aos bons resultados obtidos na utilização do tubo interior na coluna cilíndrica, surgiu a idéia de adotar o mesmo procedimento para o leito de geometria cônica. Em vista das grandes vantagens obtidas com a introdução do tubo central, os autores concluíram que futuros trabalhos de secagem de grãos certamente usarão esta técnica.

A introdução de um tubo central pode reduzir a queda de pressão de jorro mínimo e melhorar a capacidade volumétrica do leito. Entretanto, a quantidade de vazão de ar para a região anular decresce significativamente com a diminuição da distância do orifício de entrada de ar para o tubo central (CLAFLIN & FANE, 1984a, 1984b), citados por PASSOS et al. (1994).

A vazão mássica de circulação de sólidos é função tanto da velocidade superficial (U) como da distância do bocal de entrada de fluido à base do tubo central (L_e). Um aumento de U e/ou uma diminuição do valor de

L_e , implica em um aumento da vazão mássica de recirculação. Verificou-se também, que uma diminuição da vazão de gás na região anular favorece um aumento da circulação do material sólido, já que o transporte pneumático das partículas sólidas pelo tubo central é incrementado pela maior vazão de gás no tubo (BRONOWSKI et al., 1985).

ALMEIDA (1993) desenvolveu um trabalho tendo como objetivo geral estudar o comportamento fluidodinâmico de sementes de urucum em leito de jorro cone-cilíndrico convencional e com tubo central. Foram realizados estudos experimentais e através de correlações matemáticas.

Quanto à introdução de fluido adicional na região anular do leito de jorro, CLAFLIN & FANE (1983) propuseram uma modificação que consiste em se utilizar um tubo interior perfurado ou poroso, visando conciliar os aspectos positivos do leito com tubo interior e as condições desejadas de aumento da eficiência do sistema com relação às trocas de calor e massa. Eles estudaram a desinfestação térmica de grãos de trigo e concluíram que a porosidade do tubo interior compensava em parte a diminuição da vazão de ar na região anular ocasionada pelo tubo não poroso.

Uma técnica mais elaborada foi proposta por KEAIRNS & YANG (1983), que consistiu em introduzir uma alimentação complementar na base da região anular, apresentando assim uma melhoria de aeração no leito como um todo. GUBULIN (1986) propôs algumas alternativas para a melhoria da aeração na região anular, onde parte da coluna, bem como uma altura equivalente do tubo interior, é formada por superfície perfurada com diâmetros de furos pouco inferior ao diâmetro das partículas sólidas e tendo uma fração de área aberta bastante considerável, maior do que 30%. O sistema fica então, com duas linhas de alimentação provenientes do mesmo soprador, uma para a manutenção do jorro e outra para a aeração da região anular (ZULKE et al., 1987).

Referindo-se ao mecanismo que promove o jorro, pode-se inserir um aparelho mecânico para melhorar ou produzir a circulação de sólidos; SZENTMARJAY et al. (1991) estudaram o processo de secagem de suspensões com partículas inertes utilizando um secador em leito de jorro modificado, onde o deslocamento das partículas era realizado por um transportador mecânico tipo parafuso.

SOUZA & KIECKBUSCH (1994) construíram e montaram um leito vibro-jorrado bidimensional, desenvolvendo ensaios da fluidodinâmica com e sem vibração. Foram utilizadas esferas de vidro e comprimidos. Através dos resultados experimentais observaram que em todos os ensaios com vibração, a queda de pressão máxima e a vazão de jorro mínimo foram menores do que nos ensaios correspondentes sem vibração, com a mesma altura e tipo de material, chegando à conclusão de que seus resultados estavam de acordo com a literatura que diz que a vibração facilita o movimento das partículas.

LIMA (1992) destaca outras variações citadas na literatura, referentes ao leito de jorro múltiplo, ao tridimensional e ao de base plana com tubo central.

2.1.1 - Mecanismo de Secagem

O mecanismo que se desenvolve dentro do leito de jorro no processo de secagem de pastas e suspensões, inicia-se quando é feita a alimentação da pasta ou suspensão no interior da coluna, sobre o leito de partículas inertes ocorrendo, então, o recobrimento das partículas com uma fina camada do material alimentado, que é seco pelo ar quente injetado na coluna, ao entrar em contato com as partículas sólidas. À medida que o material é seco, a película torna-se frágil e quebradiça, devido ao efeito das colisões provocadas pela agitação das partículas no leito. Em seguida, o material seco desprende-se das partículas e é transportado pela corrente de ar para fora do leito, sendo coletado sob a forma de finos.

MUJUMDAR (1989) afirma que a acumulação de material dentro do leito é um indicador de transiência e depende de uma série de fatores, tais como: vazões de suspensão e de ar, propriedades do material, localização da alimentação, características da atomização.

Acerca desse assunto, BARRET & FANE (1989) realizaram experimentos e observaram os seguintes resultados:

- (1) a acumulação no leito aumenta com a vazão da suspensão;
- (2) a acumulação diminui com o aumento da vazão do ar, para baixas vazões de ar; nenhum estado estacionário foi observado após 3 horas de operação;
- (3) a taxa de acumulação diminui com o aumento da temperatura de secagem; entretanto, a eficiência térmica decresce e as perdas de calor aumentam com a temperatura;
- (4) propriedades da superfície e massa das partículas também afetam a taxa de acumulação. Uma textura rugosa provoca a formação de uma película irregular com secagem não uniforme. A massa específica das partículas influencia o nível de energia de colisão requerida para quebrar a película;
- (5) o tipo de alimentação pode afetar a acumulação de forma imprevisível;
- (6) o uso de uma placa defletora colocada acima do jorro central afeta a cinética de atrição da película, favorecendo a secagem e remoção do material acumulado no leito.

De acordo com MUJUMDAR (1989), soluções viscosas ou grudentas podem provocar aglomeração das partículas inertes, causando sérios problemas operacionais e comprometendo a performance do jorro, que podem vir a ser controlados por uma escolha de condições operacionais adequadas ao tipo de material utilizado.

LIMA (1992) destaca que dois fatores governam a performance do secador: as taxas de transferência de calor e massa envolvidas na secagem e a friabilidade da película aderida à superfície das partículas. Um

desses fatores pode ser a etapa limitante no que se refere à estabilidade do processo, uma vez que esta depende não somente da taxa de secagem como também das propriedades mecânicas da película que, se estiver fortemente aderida, pode simplesmente continuar a crescer como num processo de granulação.

Nos últimos dez anos, a técnica tem se estendido a diversos tipos de materiais, como, por exemplo: sangue animal (PHAM, 1983; RÉ & FREIRE, 1986), banana (HUFENÜSLER & KACHAN, 1985), tomate (KACHAN & CHIAPPETTA, 1988), umbu (LIMA, 1992), leite (OCHOA-MARTINEZ et al., 1993) e seriguela (LIMA et al., 1995), entre outros.

2.2 - Curvas Características do Leito de Jorro

MATHUR & EPSTEIN (1974) descreveram o mecanismo de transição do leito fixo para o jorro convencional, através de uma curva característica de queda de pressão no leito em função da velocidade do gás. Foram utilizados dados experimentais obtidos por LAMA et al. (1961), através de ensaios feitos em um leito de jorro com diâmetro da coluna cilíndrica, diâmetro do orifício de entrada de ar e ângulo da base cônica iguais a: $D_c = 15,2$ cm, $d_o = 1,27$ cm e $\theta = 60^\circ$, respectivamente. Como matéria-prima foram usadas sementes de trigo, com diâmetro de partícula $d_p = 3,6$ mm. A curva obtida está ilustrada na Figura 2.2, com as considerações mostradas a seguir:

- (1) no início do método experimental, o sistema comporta-se como um leito fixo; isto ocorre em decorrência da passagem do gás a baixas velocidades, apenas circulando sem que as partículas inertes sejam perturbadas;
- (2) a velocidade do ar é aumentada até um valor necessário para que as partículas próximas ao orifício de entrada do gás sejam deslocadas, formando-se então uma cavidade acima desta região, circundada por uma

camada sólida compacta mais resistente à passagem do gás por estarem as partículas comprimidas contra o material acima, causando assim um aumento na queda de pressão no leito ;

- (3) com um aumento paulatino da velocidade, a cavidade interna vai se ampliando, mantendo ainda o arco de sólidos acima do jorro interno, e a queda de pressão continua aumentando até atingir um valor máximo (ΔP_M), no ponto B;
- (4) quando a velocidade é aumentada além do ponto B, o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade, isto porque a altura do jorro interno fica maior do que a quantidade de partículas sólidas acima deste, e a queda de pressão diminui ao longo de BC;
- (5) no instante que o ponto C é alcançado, a quantidade de partículas deslocadas do núcleo já é suficiente para provocar uma expansão do leito. Esta expansão pode ser acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno. A instabilidade observada causa flutuações na queda de pressão e, no caso de cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno;
- (6) um pequeno aumento na velocidade do gás acima do ponto C, denominado de ponto de jorro incipiente, provoca o afloramento do jorro interno na superfície do leito, causando uma brusca diminuição na concentração de sólidos na região acima do jorro, diminuindo também a queda de pressão ao longo dos pontos CD. No ponto D, a queda de pressão torna-se constante e observa-se então o início do jorro estável (ΔP_{je});
- (7) com um aumento na velocidade do gás acima do ponto D, apenas aumenta a altura da fonte, sem que grandes alterações na queda de pressão sejam observadas.

Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), as velocidades nos pontos C e D, que correspondem, respectivamente, às velocidades de jorro incipiente e de início de jorro estável, não são reprodutíveis. Atribui-se a esse fato, a instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito. A

velocidade possível de ser reproduzida é a obtida a partir do processo inverso, diminuindo-se lentamente a velocidade do gás até o ponto E, onde observa-se a menor velocidade do gás (U_{jm}) com a qual se pode obter o jorro estável. Continuando a redução na velocidade do gás, a queda de pressão cresce bruscamente até o ponto máximo F, localizado abaixo do ponto B. Uma diminuição da velocidade além deste ponto, causa um declínio na queda de pressão ao longo de FA.

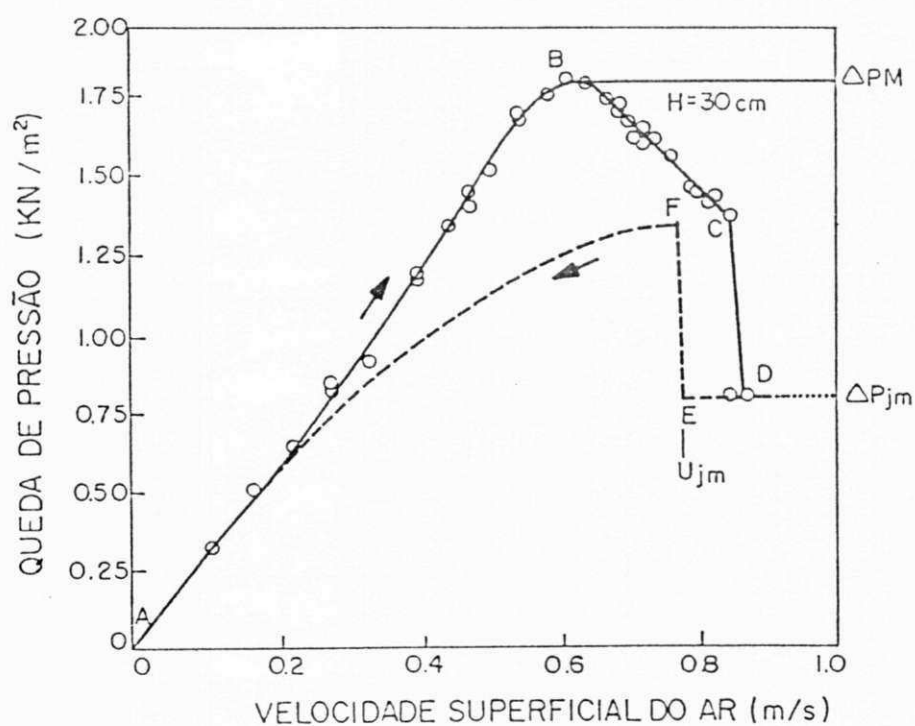


FIGURA 2.2 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar.

FONTE - MATHUR & EPSTEIN, 1974. p. 15.

Alguns estudos realizados com o objetivo de observar a influência da presença de materiais diferentes daqueles utilizados nas pesquisas iniciais acerca do comportamento fluidodinâmico em leito de jorro foram desenvolvidos por LIMA (1992) e SILVA (1996), ambos na UFPB.

LIMA (1992), trabalhando com polpa de umbu e poliestireno como material inerte, obteve curvas características com um aumento considerável da queda de pressão máxima, provocado pela presença da polpa. Entretanto, a influência sobre a queda de pressão de jorro mínimo foi pouco relevante, para alturas correspondentes à seção cilíndrica da coluna de secagem; enquanto que, na região cônica, o comportamento foi diferente, apresentando valores maiores para este parâmetro. Com relação à vazão de jorro mínimo, as curvas mostraram uma discordância com o esperado, isto é, os valores para este parâmetro mostraram uma diminuição significativa, na presença de polpa.

SILVA (1996), utilizando um sistema de farinha de milho e polipropileno, concluiu que a presença dos finos modificou os parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro, destacando que as curvas características apresentaram dois picos distintos, sendo que o primeiro coincide com ΔP_M e formação do jorro interno; e, no segundo, ocorre o afloramento do jorro e o início do arraste de finos. Sobre os parâmetros fluidodinâmicos, a ΔP_M diminui com o aumento da proporção M_{po}/M_i . Efeito inverso apresentou a ΔP_{jm} , aumentando com o aumento dessa proporção. Para U_{jm} não foi observada variação com o aumento da proporção.

2.3 - Aspectos Fluidodinâmicos

Para o projeto e operação de uma unidade de leito de jorro, as principais variáveis fluidodinâmicas que devem ser observadas são: altura máxima de jorro estável, queda de pressão máxima no leito, queda de pressão de jorro estável e velocidade de jorro mínimo, calculados através da curva de queda de pressão em função da velocidade do gás, taxa de circulação de sólidos e diâmetro do jorro.

2.3.1 - Altura Máxima de Jorro Estável (H_M)

A altura máxima de jorro estável é a máxima altura de leito capaz de jorrar.

Segundo COUTINHO (1983), citado por ALMEIDA (1993), a altura máxima de jorro estável é função da geometria do sistema e das propriedades do fluido e das partículas. Acima desta altura ocorre uma fluidização de baixa qualidade ou movimento pistonado, com prejuízo para as trocas de calor e massa entre o fluido e as partículas.

A máxima camada jorrável pode ser considerada como um índice de estabilidade do jorro, embora uma camada estável do jorro de profundidade menor do que a máxima, tornará instável em taxas altas de circulação do gás. O regime de estabilidade do jorro é criticamente dependente de certas condições e, a menos que estas estejam satisfeitas, o movimento dos sólidos torna-se ao acaso, conduzindo a um estado de fluidização agregado, e com elevação na corrente de gás (ALMEIDA, 1991).

2.3.2 - Queda de Pressão Máxima (ΔP_M)

De acordo com MATHUR & EPSTEIN (1974), o máximo grau na queda de pressão que ocorre pouco antes do afloramento do jorro é uma característica única de uma camada jorrável; porém, está associada geralmente com a entrada do jato de gás em alta velocidade na camada de partículas sólidas.

Os pontos de queda de pressão máxima e de jorro mínimo, detectados nas curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar, são de grande importância prática, porque representam para qualquer aplicação industrial, o requerimento da potência do soprador e a menor vazão que fornece uma circulação satisfatória no leito (RÉ, 1986).

A presença de uma elevação na curva de queda de pressão em função da taxa de circulação do ar para o princípio de ambos, jorro e fluidização, pode ser atribuída à energia requisitada pelo fluxo de gás para romper a condicionada estrutura da camada, e para formar um jorro interno na parte mais baixa da camada. O desenvolvimento do jorro interno dependerá das condições críticas exigidas, tais como: tipo de partículas, diâmetro do orifício de entrada do ar, altura da camada de inertes.

GIUDICI et al. (1983) destacaram a importância do parâmetro perda de carga para o projeto de secadores ou reatores de leito com jorro e ressaltaram uma particularidade importante, que é a dependência da altura do leito na perda de carga do sistema tradicional. Um aumento da altura do leito envolve um aumento da perda de carga. As principais correlações existentes para leitos de jorro tradicionais com partículas uniformes ou não, foram reunidas e discutidas por MATHUR & EPSTEIN (1974) e EPSTEIN et al. (1978).

SILVEIRA et al. (1994) apresentaram uma análise de dados experimentais obtidos em trabalhos desenvolvidos no Brasil, utilizando o secador em leito de jorro nas configurações tronco-cônica e tronco-cone-cilíndrica, em função das principais correlações existentes na literatura para as principais variáveis fluidodinâmicas, confrontando esses dados com modelos matemáticos encontrados na literatura. A partir dos resultados encontrados, concluíram que as correlações testadas não proporcionaram um bom ajuste entre os valores experimentais e os calculados, estando mais de 60% dos pontos fora da faixa de desvio fixada em $\pm 15\%$.

THORLEY et al. (1959), BECKER (1961) e ainda PALLAI & NÉMETH (1969) propuseram a seguinte equação para o cálculo da ΔP_M :

$$\Delta P_M = H(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)g \quad (2.1)$$

onde ρ_s é a densidade da partícula, ρ_f é a densidade do ar, ε é a porosidade do leito em repouso e g é a aceleração da gravidade, sendo a perda de carga máxima igualada ao peso do leito por unidade de área da seção transversal do leito (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

ASENJO et al. (1977), admitindo que a velocidade do fluido na entrada do leito de partículas é bem maior que a velocidade média através do leito, e que o escoamento através do leito é axialmente simétrico e em regime laminar, propuseram:

$$\Delta P_M = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f) g H \left[1 + 2,8 e^{-0,156(H/R)} \right] \quad (2.2)$$

onde R é o raio do corpo cilíndrico, RODRIGUES (1993).

OGINO et al. (1993) obtiveram as seguintes equações para o cálculo da ΔP_M , utilizando colunas cilíndricas de 10,0; 15,0 e 20,0 cm de diâmetro e alturas do leito de 20,0 a 50,0 cm:

$$\frac{\Delta P_M}{\rho_s g H} = 1,15 \left(\frac{H}{D_c} \right)^{1/2} \left(\frac{d_o}{D_c} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

2.3.3 - Queda de Pressão de Jorro Estável (ΔP_{je})

A queda de pressão de jorro estável é a perda de carga quando do jorro constante e desenvolvido. Esse parâmetro fornece a energia utilizada durante a operação do jorro (SILVA, 1996).

De acordo com MATHUR & EPSTEIN (1974), MATHUR & GISHLER (1955) afirmaram que o gradiente de pressão, no anel de sólidos descendentes, depende da velocidade do gás na seção transversal, naquele nível.

MALEK et al. (1965) desenvolveram a equação descrita a seguir, para o cálculo da queda de pressão de jorro estável. Os autores utilizaram um equipamento com geometria cone-cilíndrica:

$$\Delta P_{jm} = \frac{2Mg}{3A_c} \quad (2.4)$$

LEFROY & DAVIDSON (1969) propuseram uma equação para geometria cone-cilíndrica, onde usaram um leito com $D_c = 30,5$ cm, $\theta = 180^\circ$ e partículas com diâmetro e densidade de 0,17 cm e 0,58 g/cm³, respectivamente. Dos seus estudos, obtiveram a seguinte equação empírica:

$$\Delta P_{jm} = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)(2H / \pi)g \quad (2.5)$$

SAMPAIO (1978), citado por LIMA (1992), propôs a seguinte equação:

$$\Delta P_{jm} = \frac{2}{3} \rho_b g H \quad (2.6)$$

Onde: $\rho_b = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)$

2.3.4 - Velocidade de Jorro Mínimo (U_{jm})

A velocidade de jorro mínimo foi definida por MATHUR & EPSTEIN (1974) como sendo a velocidade mínima para que o jorro exista. Esta velocidade depende das propriedades físicas do fluido e das partículas, bem como da geometria do leito. A velocidade de jorro mínimo aumenta, em leitos cônicos, com o aumento da altura do leito e com a diminuição do diâmetro da coluna cilíndrica. O diâmetro do orifício de entrada de ar não tem grande efeito na velocidade de jorro mínimo.

KMIEC (1983), citado por RODRIGUES (1993), afirmou que a influência da altura estática do leito é maior em leitos cônicos do que em leitos cone-cilíndricos.

A máxima velocidade mínima de jorro foi considerada por BECKER (1961), como sendo igual à velocidade mínima de fluidização e por MATHUR & EPSTEIN (1974), como sendo 20% maior que este parâmetro (HUFENÜSSLER, 1985).

MATHUR & GISHLER (1955) propuseram a seguinte equação, para o cálculo da velocidade de jorro mínimo:

$$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right) \left(\frac{d_0}{D_c}\right)^{1/3} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

esta equação foi obtida através de resultados experimentais, utilizando uma coluna com diâmetro entre 7,6 e 30,5 cm, usando ar como também água como fluido (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

WU et al. (1987), citados por CHOI & MEISEN (1992), estudaram a equação a seguir para leitos de jorro:

$$U_{jm} = 10,6 (2gH)^{0,5} \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{1,05} \left(\frac{d_0}{D_c}\right)^{0,266} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{-0,095} \left[\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,256} \quad (2.8)$$

O trabalho de CHOI & MEISEN (1992), utilizando leitos de jorro, sob as seguintes condições: D_c e H variando entre 0,24 e 0,45 m e 0,24 e 0,40 m, respectivamente; $\theta = 60^\circ$; d_o entre 21 e 35 mm, forneceu a seguinte equação:

$$U_{jm} = 13,5(2gH)^{0,5} \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{1,17} \left(\frac{d_o}{D_c}\right)^{0,372} \left(\frac{H}{D_c}\right)^{-0,148} \left[\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,289} \quad (2.9)$$

2.3.5 - Circulação de Sólidos (W_s)

A quantificação da taxa de circulação ou vazão de partículas no jorro, como citado por LIMA (1992), pode ser determinada de duas maneiras distintas: diretamente por técnicas experimentais ou de forma indireta, através de medidas de velocidade das partículas na parede da coluna (V_w).

THORLEY et al. (1955), citados por LIMA (1992), determinaram a taxa de circulação de sólidos de forma indireta, tomando uma série de medidas da velocidade das partículas de trigo na parede da coluna semi-circular transparente. Foi observado que a velocidade das partículas na parede da coluna era ligeiramente menor que na interface jorro-anel, no mesmo nível do leito e concluíram, com isso, que esta velocidade seria uma boa aproximação da velocidade média das partículas no anel, ou um indicador da vazão de sólidos que descem nesta região em contra-corrente com o gás. Essa medida da velocidade das partículas era feita ao longo da seção cilíndrica da coluna circular completa, obtendo-se a vazão de sólidos que atravessam num plano horizontal da parte cilíndrica do leito.

MATHUR & EPSTEIN (1974) citam a técnica piezoelétrica, desenvolvida inicialmente por GORSHTAIN & SOROKO (1964) e posteriormente usada para medidas de velocidade do jorro por outros pesquisadores soviéticos, tais como: MIKHAILIK & ANTANISHIN (1967), que

utilizaram partículas de painço, sílica gel e poliestireno com diâmetros variando entre 1,5 e 7,0 mm em uma coluna cone-cilíndrica de diâmetro igual a 9,4 cm. Essa técnica também foi usada por GORSHTAIN & MUKHLENOV (1967) para medir velocidades de partículas de pequenas esferas de catalisador, em um leito cônico.

Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), na região cônica, as linhas de trajetória das partículas eram desviadas pela inclinação do cone, negando assim a afirmativa de ser a V_w um indicador representativo da taxa de circulação de sólidos.

BERRUTI et al. (1988) utilizaram uma técnica direta e simples para o cálculo da taxa de circulação de sólidos em leito de jorro e em leito de jorro fluidizado, ambos com tubo central, usando uma célula de medida tipo "peneira" que era colocada na região anular. A vazão de sólidos era determinada pesando-se a massa de sólidos recolhida na "peneira" em intervalos de tempos predeterminados. Os resultados obtidos indicaram um crescimento na taxa de circulação de sólidos com o aumento da velocidade do gás, sendo observado um valor máximo a uma dada velocidade, em seguida passando a decrescer. Os dados experimentais usando esta técnica, mostraram uma reprodutibilidade muito boa com um erro máximo de aproximadamente 7%. Em geral, um erro médio de 3% foi observado durante todo o experimento.

BENKRID & CARAM (1989), citados por RODRIGUES (1993), estudaram a circulação de sólidos em um leito de jorro, usando a técnica de fotografia estroboscópica e métodos de fibra ótica para medir a velocidade das partículas na região anular, e identificaram diferentes regiões de velocidade: uma região de escoamento pistonado na parte superior da região anular, onde as partículas movem-se com velocidade uniforme; uma região de fluxo radial, onde as partículas apresentam um movimento no sentido da base do leito; uma região entre a parede do leito e o jorro, formada de uma fina camada de

partículas, e uma região de zona morta, formada na superfície plana do fundo do leito.

Uma análise da influência da carga de inertes e vazão do ar no comportamento da circulação de sólidos é de grande importância para a secagem, já que estes parâmetros estão diretamente relacionados com o consumo de energia e capacidade de produção do secador. LIMA et al. (1991a, 1991b) estudaram o comportamento da taxa de circulação de sólidos com relação à vazão do gás, no leito de jorro convencional. As experiências foram realizadas com polpa de umbu, sendo utilizado como material inerte, partículas de poliestireno. Os resultados mostraram que o fluxo de circulação de inertes (W_s) cresce com o fluxo de ar de entrada (Q), tendendo a permanecer constante para vazões superiores a $34,0 \text{ cm}^3/\text{s}$. Observaram também que, mantendo-se as mesmas condições operacionais, a taxa de circulação de sólidos diminui em presença de polpa, afetando assim a performance do equipamento.

Quanto à circulação de partículas sólidas em leitos úmidos, RODRIGUES (1993) mencionou o trabalho desenvolvido por PATEL et al. (1986), o qual destaca que, durante a secagem de suspensões, a circulação de sólidos é afetada pelas forças entre as partículas, causadas por propriedades reológicas das suspensões e, analisando a circulação de sólidos úmidos, afirma que o leito de jorro deve operar com velocidade de gás entre 20 e 30% maior do que a velocidade de jorro mínimo.

RODRIGUES (1993) cita os trabalhos de THORLEY et al. (1955, 1959), onde estudaram a influência do ângulo da base cônica, altura do leito, diâmetro da coluna, velocidade do gás e diâmetro do orifício de entrada do gás na circulação de sólidos, e observaram que um aumento do ângulo do cone (de 45° para 85°), na altura do leito de partículas e na velocidade do gás, provocou um aumento na taxa de circulação de sólidos.

A chave para a aplicação da técnica de leito de jorro aos processos de secagem de pastas e suspensões e recobrimento de comprimidos é, sem dúvida, o movimento sistemático de recirculação das partículas no leito. Sendo assim, é fundamental que se conheça a recirculação das partículas em função dos parâmetros geométricos e de operação do leito. De acordo com DAY (1986), a recirculação está intimamente relacionada à distribuição da velocidade das partículas no jorro e ao perfil de porosidade nesta região (WILDHAGEN et al., 1994).

REYES (1994), através do estudo fluidodinâmico em leito de jorro cônico e semi-cônico, analisou as curvas características de queda de pressão versus fluxo de ar e parâmetros como velocidade de circulação de inertes (partículas de polietileno de alta densidade) e diâmetro do jorro. Para avaliar a taxa de circulação de inertes foi utilizada uma proveta deslizável com uma abertura em sua parte superior, para reter os sólidos que caíam da "fonte" de partículas. Os ensaios consistiram em tomar amostras de partículas para diferentes posições radiais. Com base nos dados obtidos, de distribuição do fluxo de inertes em função da distância radial, foi observado que a maior captação de partículas se produz nas imediações do jorro e o fluxo de circulação de inertes cresce linearmente com a massa de partículas e com o fluxo de ar da entrada; concluindo, então, que a proveta horizontal deslizável permite determinar adequadamente a velocidade de circulação de inertes. Para uma massa de inertes de 5,0 e 7,0 kg, o autor ajustou a expressão a seguir:

$$W_s = [17,95M_i + 0,02] \frac{Q}{Q_{jm}} - 17M_i - 0,2 \quad (2.10)$$

WILDHAGEN et al. (1994), estudando a influência de diversos parâmetros na recirculação e atrição de partículas em um leito de jorro convencional, utilizando partículas de polietileno, polipropileno e poliestireno

como inertes, verificaram o aumento da recirculação e da atrição com a vazão de entrada do ar e com a altura do leito. Observaram ainda que, para uma mesma altura de leito, a recirculação aumenta com a esfericidade das partículas.

2.3.6 - Diâmetro do Jorro (D_j)

Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), o fato de que um leito de jorro constantemente assume uma forma estável, implica na existência de um estado de equilíbrio dinâmico entre as várias forças agindo na interface jorro-anel. Desde que estas forças surgem do movimento de ambos, sólidos e gases, a forma do jorro pode proporcionar valiosos indícios para um entendimento completo da dinâmica do leito de jorro, tendo por isso recebido considerável atenção.

Observações sobre a forma do jorro têm sido usualmente feitas sobre a face plana de colunas semi-circulares ou bidimensionais transparentes. De acordo com a literatura, uma variedade de formas tem sido observada com base em diferentes condições experimentais, e mostram que o diâmetro do jorro varia com o nível do leito, principalmente nas vizinhanças do orifício de entrada do gás, podendo ocorrer uma expansão ou contração repentina do jorro.

Uma mudança substancial do diâmetro do jorro nas proximidades do orifício de entrada do gás, mencionada anteriormente, é um assunto de considerável importância desde que afetam diretamente o perfil longitudinal de velocidade do gás no jorro e, conseqüentemente, influenciam a velocidade das partículas e o perfil de porosidade. Devido à diversidade de formas do jorro, a previsão com respeito ao comportamento do D_j com o nível do leito torna-se bastante complexa. Por este motivo, a maioria dos modelos teóricos relacionados com a fluidodinâmica do leito despreza a variação axial sofrida pelo diâmetro do jorro.

SILVA & FREIRE (1985) desenvolveram um estudo comparativo entre a hidrodinâmica do leito de jorro convencional e com tubo central, e concluíram que o perfil de perda de carga para o leito convencional apresentou, como esperado, maiores gradientes de pressão na seção cônica, havendo um nivelamento ao longo da seção cilíndrica.

Através do mapeamento de pressão, RÉ (1986) obteve dados experimentais para leitos de jorro à $H/D_c = 1,36$, com e sem tubo central, concluindo então, que existe uma região característica de baixa pressão próxima ao orifício de entrada, e que a pressão na região anular é radialmente uniforme para valores de Z/H iguais a 0,67 e 0,56, utilizando leito de jorro convencional e modificado, respectivamente. A autora destaca que estes resultados concordaram com os dados de THORLEY et al. (1959) e de GRBAVCIC et al. (1976), onde a pressão na região anular é radialmente uniforme para $Z/H > 0,5$.

LIMA (1992) determinou o diâmetro do jorro na extremidade superior através dos perfis adimensionais de temperatura, onde observou que a temperatura decresceu com o raio até um dado valor que caracterizou a região do jorro, alcançando um extenso patamar na região anular, devido às perdas de calor para o ambiente nas imediações da parede da coluna. Concluiu então, que o raio do jorro foi considerado como a medida que limita a queda de temperatura entre o centro e a região de temperatura uniforme.

A distribuição da queda de pressão radial foi utilizada por ALMEIDA (1993), na determinação do diâmetro do jorro. O autor observou que os perfis de pressão obtidos numa região próxima à superfície superior do cone apresentaram comportamento similar, independente da altura do leito ou velocidade do ar, com formação de uma descontinuidade da curva muito acentuada, que caracterizou a interface jorro-anel.

Algumas equações empíricas correlacionando o valor médio do diâmetro do jorro, medido ao longo do leito, são encontradas na literatura e estão listadas a seguir:

ABDELRAZEK (1969), citado por MATHUR & EPSTEIN (1974), utilizando um leito cone-cilíndrico com D_c variando entre 5,0 e 10,0 cm e H entre 7,6 e 33,0 cm, obteve a seguinte equação:

$$D_j = 0,315D_c \left[\frac{U_{jm}}{(gH)^{1/2}} \right]^{0,33} \quad (2.11)$$

LEFROY & DAVIDSON (1969) desenvolveram a expressão seguinte para determinar o D_j , para uma geometria cone-cilíndrica:

$$D_j = 1,07 D_c^{2/3} d_p^{1/3} \quad (2.12)$$

2.4 - Histórico da Matéria-Prima

2.4.1 - A Acerola

A descoberta da acerola foi anunciada por uma das revistas de melhor conceito científico na Europa, editada em Milão, "Scienza e Vita", onde revelava que tinha sido encontrada a "bomba C" da medicina em um fruto nativo da América Central (Porto Rico). A denominação de "bomba C", dada pelo cronista, derivava do seu espetacular teor de vitamina C (ácido ascórbico), cerca de 80 vezes maior que o encontrado nas frutas cítricas conhecidas. Seu valor vitamínico foi descoberto pelo Prof. Corrado Ansenjo, do Instituto de Bioquímica da Universidade de Porto Rico. O nome acerola é de origem hispânica e, por ser muito popular por todo o Caribe, é também chamada de cereja-das-antilhas. A cerejeira-das-antilhas pode ser plantada

em qualquer região, em todos os meses do ano, e desenvolve-se bem em quase todos os tipos de solo (MARINO NETTO, 1986).

A acerola é uma planta *Dicotiledonea*, pertencente à família das *Malpighiáceas*, cujo nome científico é *Malpighia emarginata*, DC. A aceroleira é um arbusto glabro de tamanho médio, medindo de 2,0 a 4,0 m de altura e com um diâmetro que pode ir até 3,0 m. Constitui-se de uma haste ou pequeno tronco único ou freqüentemente ramificado com copa densa, formada por numerosos ramos lenhosos espalhados e geralmente curvados para baixo. Os frutos variam em tamanho, forma e peso. A forma pode ser oval e subglobosa, o tamanho varia de 1,0 a 4,0 cm de diâmetro, enquanto que, em relação ao peso, podem pesar de 2,0 a 10,0 g. Quanto à cor, o fruto apresenta tonalidades diferentes: verde quando em desenvolvimento, passando a amarelo e finalmente vermelho-escuro quando maduro. O fruto apresenta normalmente três sementes e um suco avermelhado, que representa 80% do seu peso. A acerola é considerada também fonte de vitamina A, ferro e cálcio, além do alto grau de vitamina C (COUCEIRO, 1984; citado por MARINO NETTO, 1986).

CAPÍTULO III

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Materiais

3.1.1 - Partículas Inertes

Foram usadas como material inerte, partículas de poliestireno 849, produzidas pela Estireno do Nordeste (EDN), em Camaçari - Bahia, devidamente aprovado para o uso em contato com alimentos. Sua caracterização e algumas propriedades determinadas pelas técnicas tradicionais, estão indicadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Caracterização das partículas de poliestireno.

PROPRIEDADES	VALORES OBTIDOS	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO
d_v (cm)	0,3260	Pelo volume de líquido deslocado
ρ_l (g/cm ³)	0,6511	Determinação da massa contida num recipiente de volume conhecido
ρ_s (g/cm ³)	1,0450	Picnometria líquida
ϵ_l	0,4110	Picnometria de comparação a ar
γ (°)	59	MATHUR & EPSTEIN (1974), Tab. 2.1

FONTE - ALSINA et al., 1996.

3.1.2 - Matéria- Prima Utilizada

A matéria-prima utilizada na alimentação do secador em leito de jorro, foi a polpa de acerola (*Malpighia emarginata*, DC); suas propriedades estão mostradas na tabela a seguir:

TABELA 3.2 - Propriedades da polpa de acerola

DENSIDADE (g/cm ³)	PERCENTAGEM DE SÓLIDOS SOLÚVEIS	PERCENTAGEM DE SÓLIDOS TOTAIS
0,9893-1,0211	3,00-11,0	9,00-12,00

FONTE - ALSINA et al., 1995 (no prelo).

3.2 - Equipamentos

3.2.1 - Secador em Leito de Jorro

O secador em leito de jorro utilizado é constituído de uma base cônica de aço inoxidável, com ângulo interno de 60°. Sobre a base cônica é acoplado, através de solda, uma coluna cilíndrica também em aço inoxidável, com 0,297 m de diâmetro interno e 0,73 m de altura, contendo visores em acrílico para o acompanhamento visual do processo de secagem.

Na parte superior interna da coluna é colocada uma placa defletora de tela metálica, para impedir o arraste das partículas de poliestireno, permitindo porém a passagem dos finos. Na lateral superior é conectado um ciclone, onde o pó é separado e recolhido em um recipiente adaptado ao mesmo. O secador possui tomadas de pressão ao longo da coluna cilíndrica e uma próxima ao distribuidor. A alimentação da polpa é feita por gravidade, utilizando-se um frasco tipo reservatório de polpa, colocado sobre uma base móvel, com o intuito de controlar a vazão de polpa que flui através de um

conduto conectado à tampa da coluna. A Figura 3.1 apresenta uma visão detalhada do equipamento.

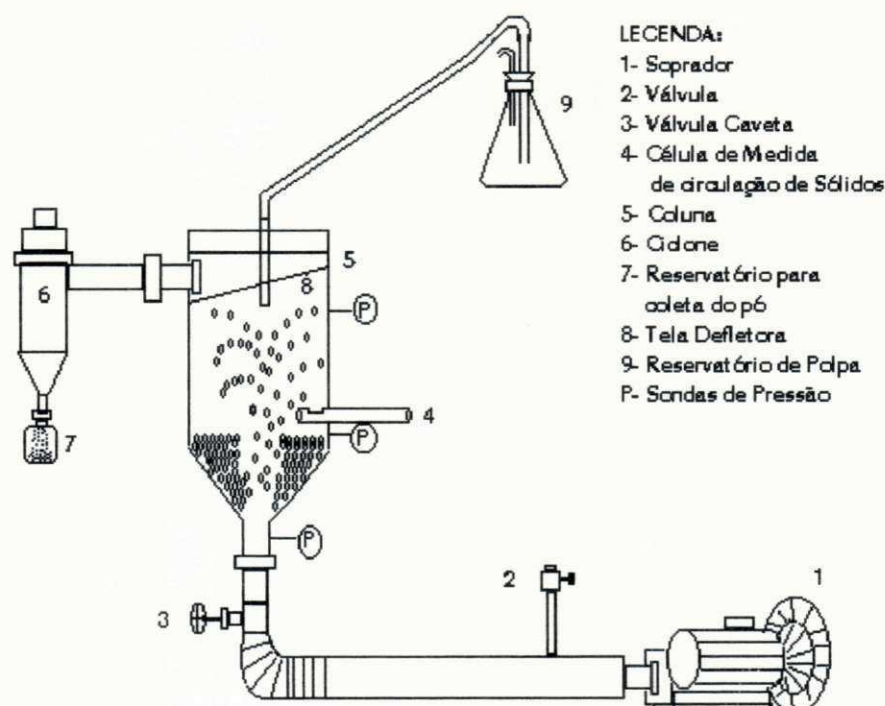


FIGURA 3.1 - Leito de jorro cone-cilíndrico convencional.

3.2.2 - Equipamentos Complementares

- Soprador, modelo S100, marca EBERLE com potência de 4 HP, utilizado para distribuir o ar necessário ao processo de secagem. A vazão do ar é controlada por uma válvula tipo gaveta e uma outra válvula para respiro.
- Anemômetro digital, MOD. AM 4201, marca LUTRON, com sensor tipo hélice de baixa fricção, produzido pela HOMIS Controle e Instrumentação Ltda - SP, para medir a velocidade do ar.
- Ciclone construído em P.V.C. (policloreto de vinila), para coletar o pó.

- Frasco tipo reservatório de polpa, constituído por um erlenmeyer de 1000 ml com conduto de P.V.C. acoplado ao mesmo.
- Manômetro diferencial tipo tubo em "U", cujo líquido manométrico é óleo com densidade igual a $870,0 \text{ kg/m}^3$, para medidas de pressão.
- Cronômetro marca Gallemkanp, referência TKM 340 Y.
- Balança Mettler PC 440, capacidade 0,440 kg, com precisão de leitura de 0,001 g, fabricada pela Mettler Instrument, AG, Suíça.
- Balança Sartorius, capacidade de 2,2 kg, com precisão de leitura de 0,01 g, fabricada pela Sartorius, Alemanha Federal.
- Estufa de secagem e esterilização, modelo 315 SE, fabricada pela VEB Anemometerban Dusden, Alemanha Federal.
- Picnômetro de comparação a ar, fabricado pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenamento da UFPB, Campus II.
- Célula de medida da taxa de circulação de sólidos, confeccionada em P.V.C., medindo 30,0 cm de comprimento, com uma abertura superior de área igual a $3,0 \text{ cm}^2$.

3.3 - Métodos Experimentais

3.3.1 - Introdução

Neste trabalho estão apresentados os dados experimentais relativos à fluidodinâmica do processo de secagem, para a operação de uma unidade em leito de jorro. As principais curvas analisadas foram: curvas características de queda de pressão no leito em função da velocidade do gás, circulação de sólidos e perfis axiais e radiais de queda de pressão.

Através das curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar, foram obtidas as medidas de queda de pressão máxima no jorro, queda de pressão no jorro estável e velocidade de jorro mínimo.

O estudo da dinâmica do secador para desidratação de polpa de acerola foi realizado utilizando-se, como material inerte, partículas de poliestireno. A opção para o uso deste polímero, teve como base estudos experimentais desenvolvidos por ALMEIDA (1991) para a desidratação da polpa de umbu.

As condições de operação para as análises fluidodinâmicas, foram determinadas através de testes experimentais, com o objetivo de obter parâmetros que propiciassem ao leito uma boa qualidade de jorro. Os valores utilizados para a altura do leito de inertes (H) foram iguais a 18,0; 23,0; 26,0; 28,0 e 30,0 cm e, para a relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo (U/U_{jm}), os valores variaram de 1,2 a 1,5. A outra variável estudada foi a quantidade de polpa alimentada (M_p/M_i); seus valores foram adotados com base nos determinados por LIMA (1992), para a desidratação da polpa de umbu. Os valores percentuais de polpa usados foram 2, 3 e 5% da massa de inertes.

3.3.2 - Extração e Armazenamento da Polpa de Acerola

Inicialmente, foi feita a seleção dos frutos, seguida de sua assepsia, lavando-os em água corrente. A polpa de acerola foi obtida por trituração dos frutos em liquidificador industrial durante 1 minuto, sendo logo após extraída por prensagem em peneira de nylon com malha de 22 mesh. Posteriormente, o material foi acondicionado em sacos plásticos apropriados para congelamento, devidamente etiquetados e, em seguida, estocado em freezer doméstico a uma temperatura de -10°C . Para ser utilizada no processo de secagem, a polpa foi previamente descongelada à temperatura ambiente.

3.3.3 - Obtenção das Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar

Iniciava-se o experimento, introduzindo no secador uma quantidade de material inerte previamente determinada. Em seguida, ligava-se o soprador que injetava ar através de um orifício localizado na base do leito, para propiciar o jorro. Estabelecido o jorro, fazia-se o cálculo do tempo de alimentação da polpa, de acordo com a vazão aproximadamente constante. Esse tempo de alimentação variava num intervalo de 17 segundos a 2 horas, a uma temperatura, medida no interior da coluna, de 40 °C. Ao final da alimentação, retirava-se o alimentador e acompanhava-se a secagem por cerca de 15 minutos. Após a secagem, o equipamento era desligado e procedia-se um novo empacotamento do material presente na coluna; em seguida, acionava-se o compressor variando a vazão de forma crescente, sendo feito o controle da velocidade do fluido através do anemômetro mediante abertura da válvula e, fazendo-se assim, a leitura da queda de pressão correspondente. Este procedimento era realizado até a abertura total da válvula. No momento da formação de um jorro interno, registrava-se a ΔP_M e, se atingida a estabilidade, anotava-se a ΔP_{je} . Quando alcançado este ponto, fazia-se o procedimento inverso, variando-se a vazão do gás para obtenção da curva de retorno, fazendo-se as leituras para cada ΔP correspondente. No momento em que era observado o menor valor da velocidade em que ainda verificava-se um jorro estável, anotava-se a U_{jm} e a ΔP_{jm} , prosseguindo-se com o experimento até cessar a passagem do fluxo de gás pelo leito.

3.3.4 - Medidas de Circulação de Sólidos

O procedimento inicial foi semelhante ao utilizado para a construção das curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar. Estabilizava-se o sistema com o material inerte, alimentava-se determinada quantidade de polpa por um período prefixado, o material contido na coluna foi secado durante um tempo estabelecido, em seguida iniciavam-se as medidas

de W_s , utilizando-se uma célula de medidas na forma de um cilindro, deslizável, com uma abertura na parte superior, onde são retidas as partículas que caem da "fonte". A medida de circulação de sólidos foi feita tomando-se amostras de partículas, num intervalo de 1 segundo, para diferentes posições radiais; após a coleta das partículas no tempo estabelecido, a abertura de recebimento foi fechada e, em seguida, a célula foi retirada da coluna para ser feita a quantificação do material recolhido através da pesagem e, finalmente, os cálculos para a determinação da taxa de circulação total de sólidos na superfície do leito foram efetuados.

A Figura 3.2 mostra um esquema da célula de medidas, que foi introduzida no secador através de uma abertura localizada a 37,0 cm da entrada de ar.

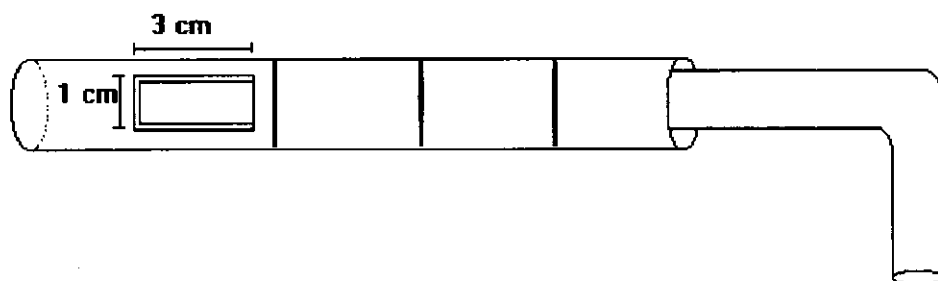


FIGURA 3.2 - Célula de medidas de circulação de sólidos.

A medida da distribuição da taxa de circulação de partículas foi realizada com tomadas de amostra na forma local. A seção circular da coluna cilíndrica foi dividida em regiões anulares, tomando como ponto de origem o centro geométrico do círculo, correspondendo ao centro da coluna .

Para o cálculo da taxa de circulação total de sólidos, inicialmente obtém-se o valor da taxa de circulação local de partículas sólidas, utilizando a equação a seguir:

$$W_{ls} = \frac{W_{pm} \cdot A_A}{A_{AM}} \quad (3.1)$$

sendo, logo após, calculado o valor da taxa de circulação total das partículas sólidas, através da seguinte equação:

$$W_{ls} = \sum W_i \quad (3.2)$$

3.3.5 - Perfis Axial e Radial de Queda de Pressão

Adotava-se a metodologia inicial de estabilização do sistema e secagem da polpa, semelhante aos procedimentos indicados nos itens 3.3.3 e 3.3.4. Os valores dos perfis de queda de pressão foram mensurados, utilizando-se sondas de cobre de 1,8" acopladas ao manômetro de tubo em "U". Os perfis axiais foram medidos em três posições da coluna, enquanto as posições radiais variaram de $r = 0,0$ no centro da coluna à $r = 14,86$ cm na parede. Estes perfis foram obtidos em três pontos na região cilíndrica, e um ponto na região cônica através de uma sonda com uma inclinação, devido às dificuldades de acesso pelas sondas normais.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Introdução

Neste capítulo são mostrados os resultados das variáveis fluidodinâmicas, obtidos através dos métodos experimentais citados no Capítulo III. Os parâmetros como queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo, foram determinados através da plotagem da curva de queda de pressão em função da velocidade do ar. Também foram medidos a taxa de circulação de sólidos no leito e os perfis axiais e radiais de queda de pressão. Com base nos dados recolhidos, serão feitas as discussões referentes a cada variável determinada, estudando o efeito dos mesmos na dinâmica do secador em leito de jorro, durante o processo de secagem.

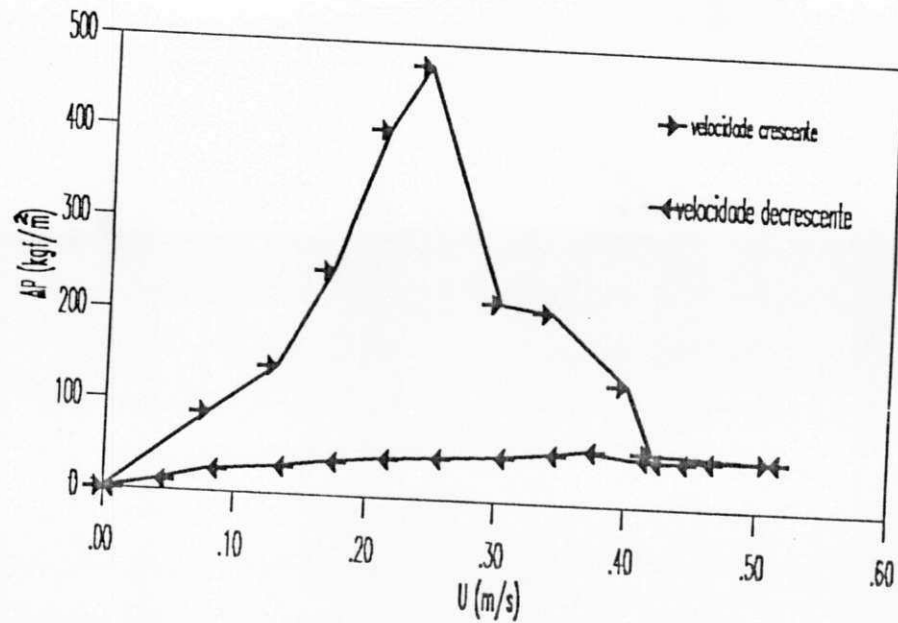
Para a finalização da análise fluidodinâmica dos parâmetros importantes na técnica de secagem, serão testados modelos matemáticos propostos para a secagem em secador de leito de jorro, já existentes na literatura, com os resultados experimentais deste trabalho.

4.2- Tratamento dos Dados Fluidodinâmicos

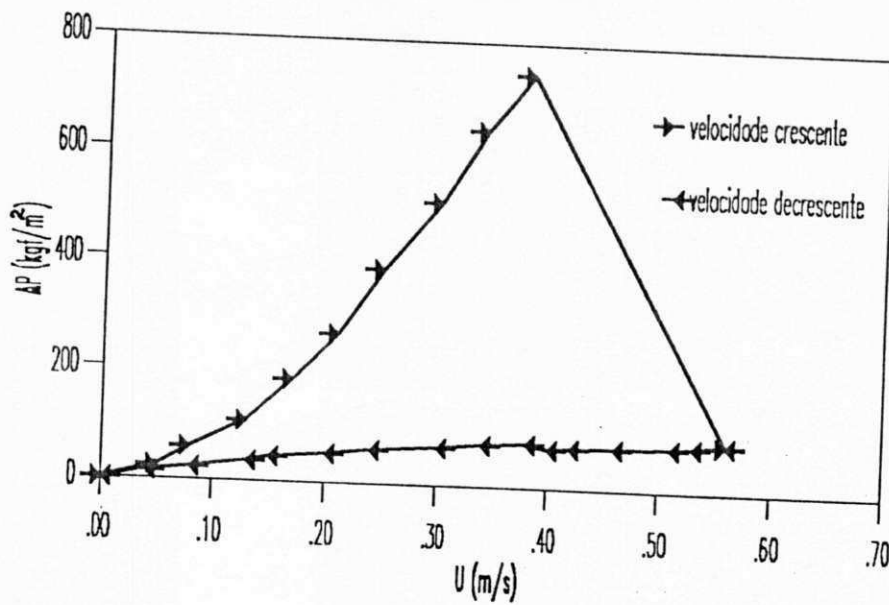
4.2.1- Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar

Através dos resultados experimentais de queda de pressão e velocidade do ar na coluna, foram plotadas as curvas características do leito de jorro, sob diversas condições, para alturas da camada do leito numa faixa compreendida entre 18,0 e 28,0 cm, para uma mesma geometria com uma base tronco-cônica de 60° . Também houve variações nas quantidades de polpa alimentada, adotadas em valores percentuais relacionados com a massa de inerte; as mesmas variaram entre 2 e 5%. As curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar, obtidas a partir dos valores apresentados no Apêndice A, nas Tabelas A.1 a A.12, são mostradas nas figuras a seguir. Para facilitar a apreciação dos dados de queda de pressão obtidos experimentalmente, para as curvas em função da velocidade do ar, a apresentação das figuras será dividida em blocos, sendo que, cada bloco refere-se a um mesmo valor para altura do leito de partículas utilizado, variando-se a quantidade de polpa alimentada. Observa-se nestas figuras uma boa semelhança das mesmas com a curva típica de um leito de jorro, descrita por MATHUR & EPSTEIN (1974). Todas as curvas mostraram uma boa reprodutibilidade, sendo observado claramente um ponto máximo na curva de velocidade crescente, denominado de queda de pressão máxima, havendo, logo em seguida, um decréscimo onde deveria ser obtido o valor de queda de pressão estável, o que não foi observado. Para as curvas com velocidade decrescente, há um leve decréscimo em um determinado ponto, chamado de velocidade de jorro mínimo, onde também é obtido o valor da queda de pressão de jorro mínimo.

BLOCO A : Apresentação das curvas características, para $H=18,0$ cm.



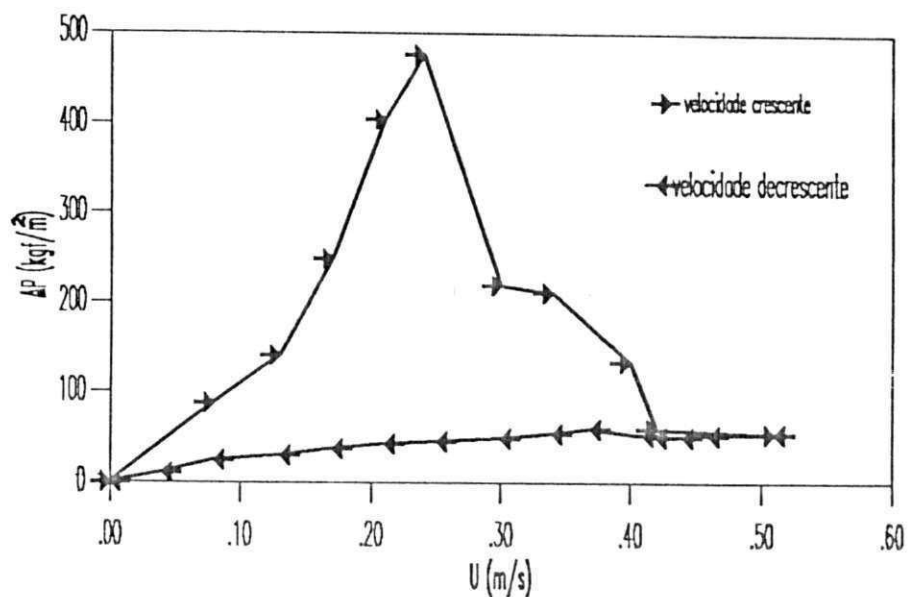
(a)



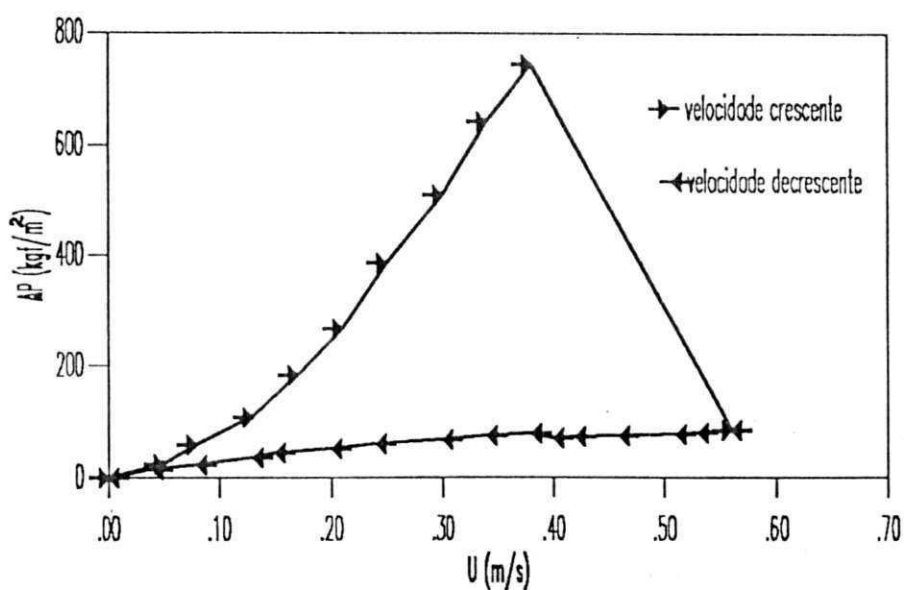
(b)

Figura 4.1- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (a) $M_p/M_i = 0\%$; (b) $M_p/M_i = 2\%$.

BLOCO A : Apresentação das curvas características, para $H=18,0$ cm.

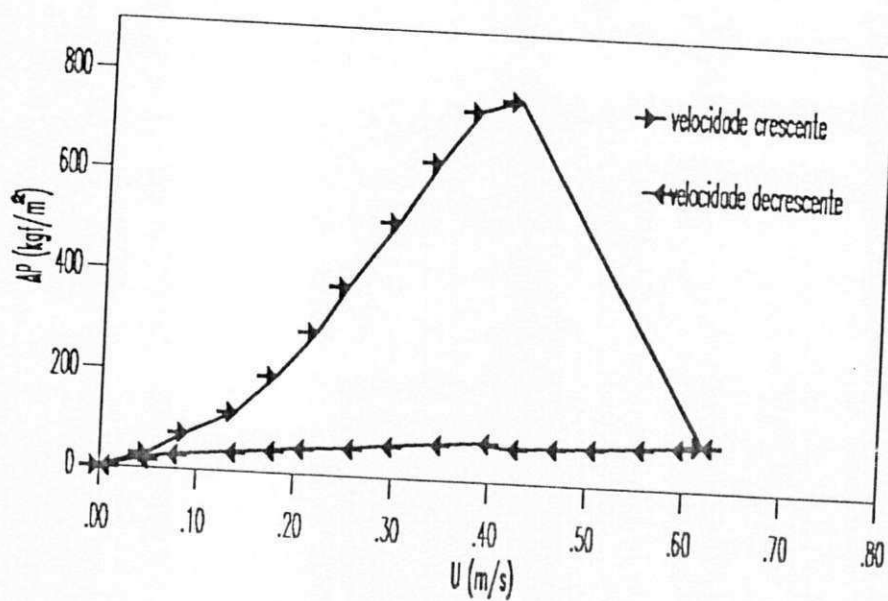


(a)

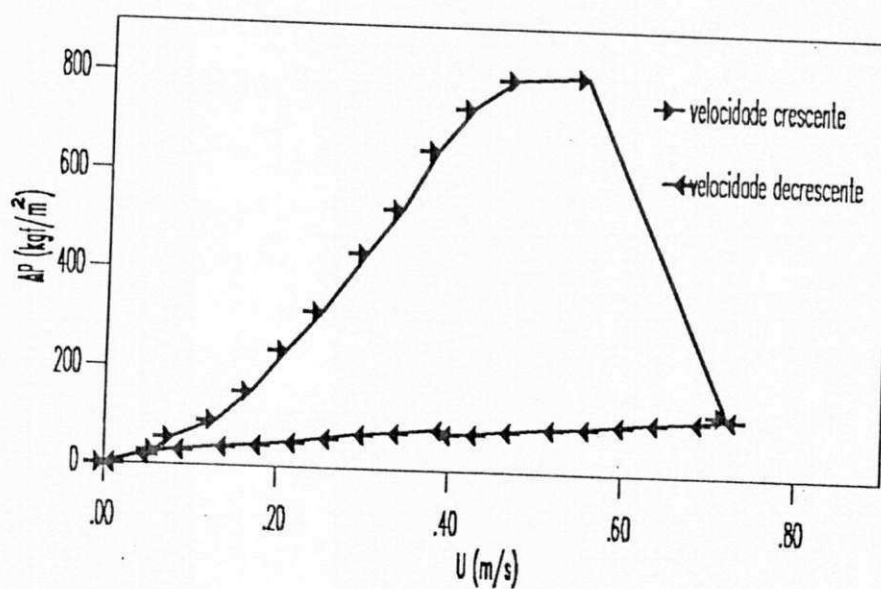


(b)

Figura 4.1- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (a) $M_p/M_i=0\%$; (b) $M_p/M_i=2\%$.



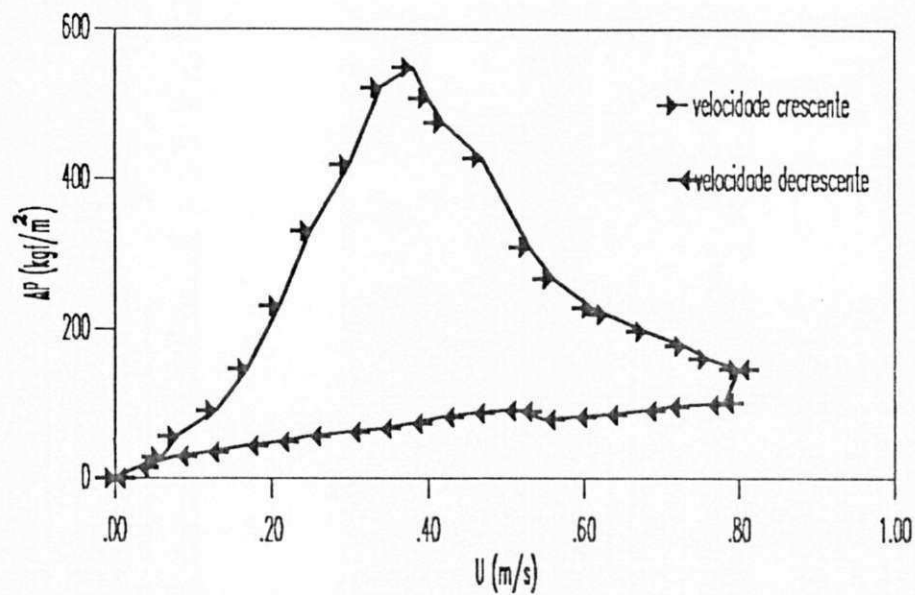
(c)



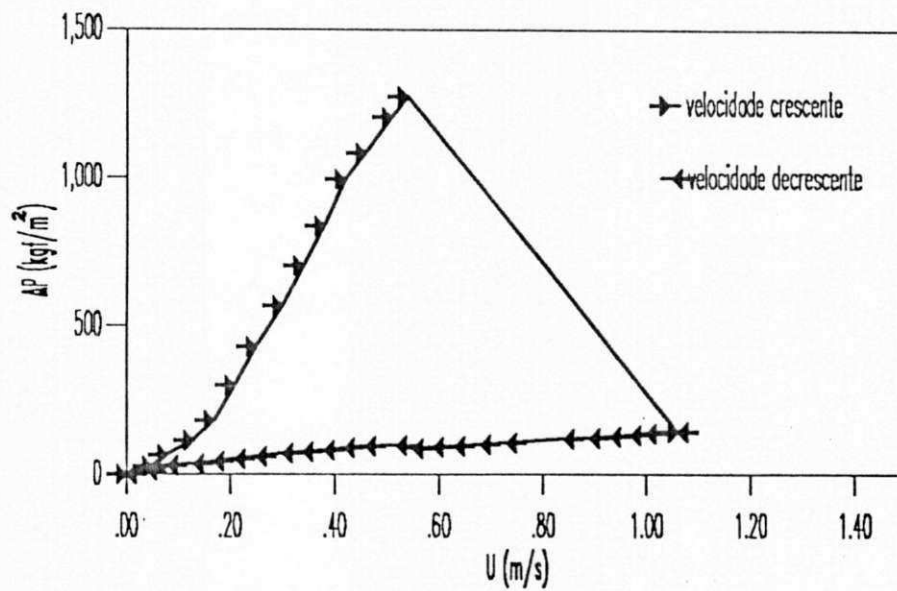
(d)

Figura 4.2- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (c) $M_p/M_i=3\%$; (d) $M_p/M_i=5\%$.

BLOCO B : Apresentação das curvas características, para $H=23,0$ cm.

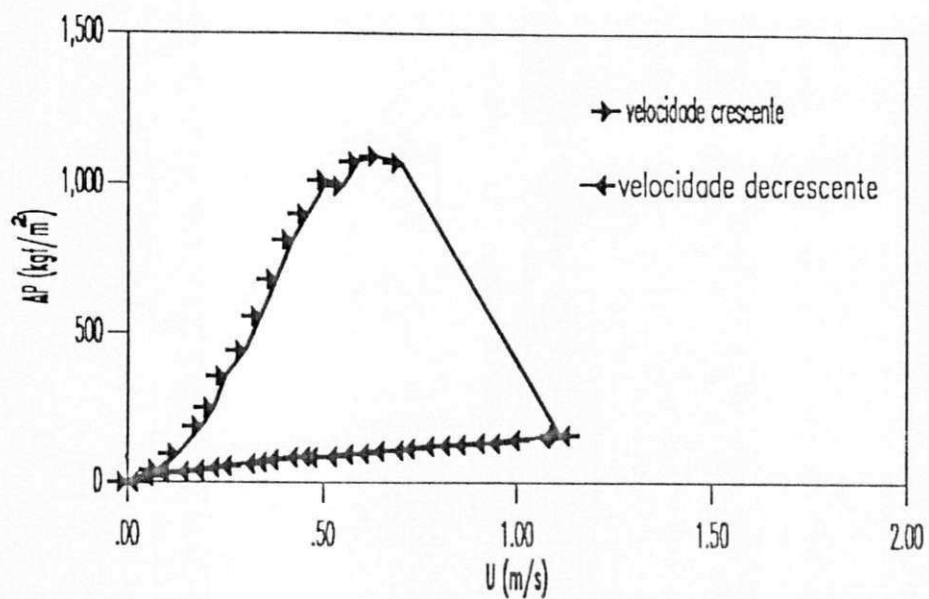


(e)

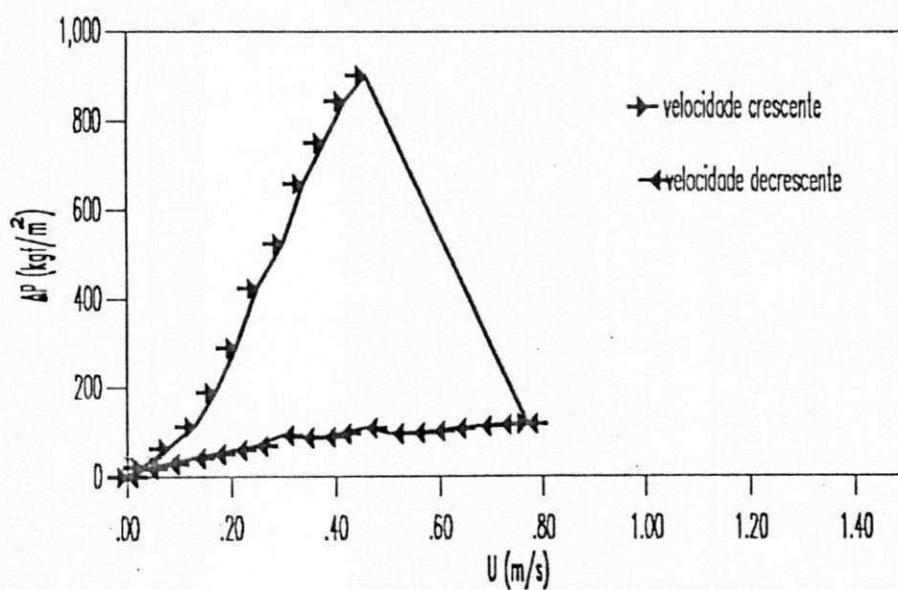


(f)

Figura 4.3- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (e) $M_p/M_i = 0\%$; (f) $M_p/M_i = 2\%$.



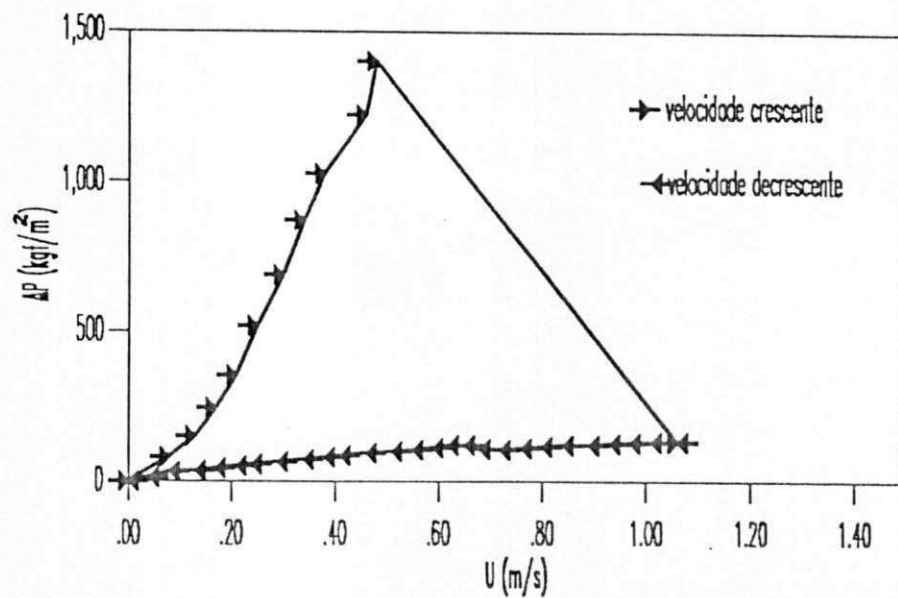
(g)



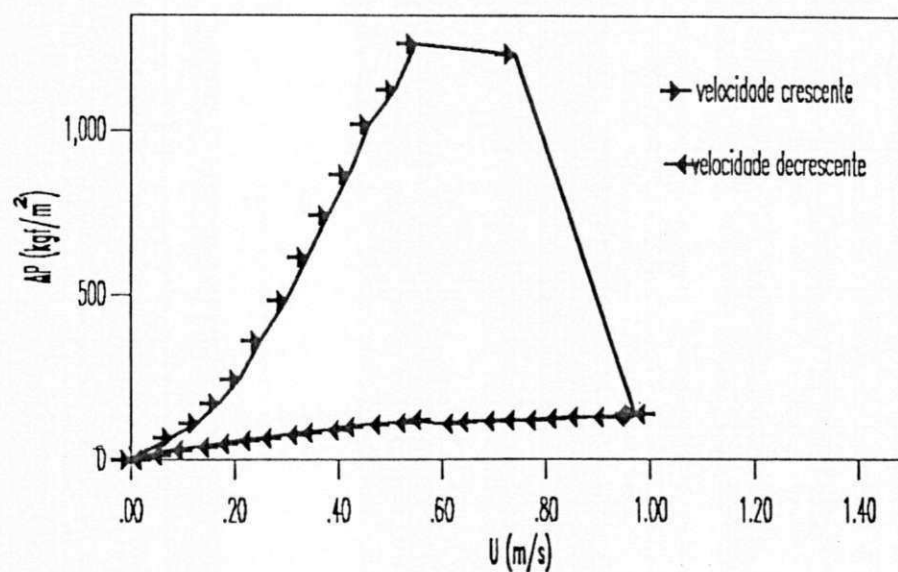
(h)

Figura 4.4- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (g) $M_p/M_i = 3\%$; (h) $M_p/M_i = 5\%$.

BLOCO C : Apresentação das curvas características, para $H=28,0$ cm.

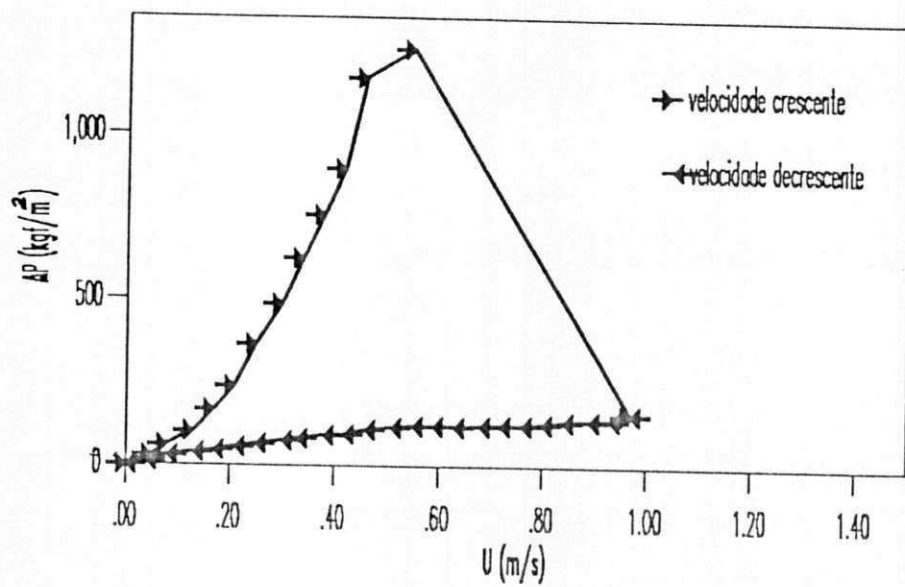


(i)

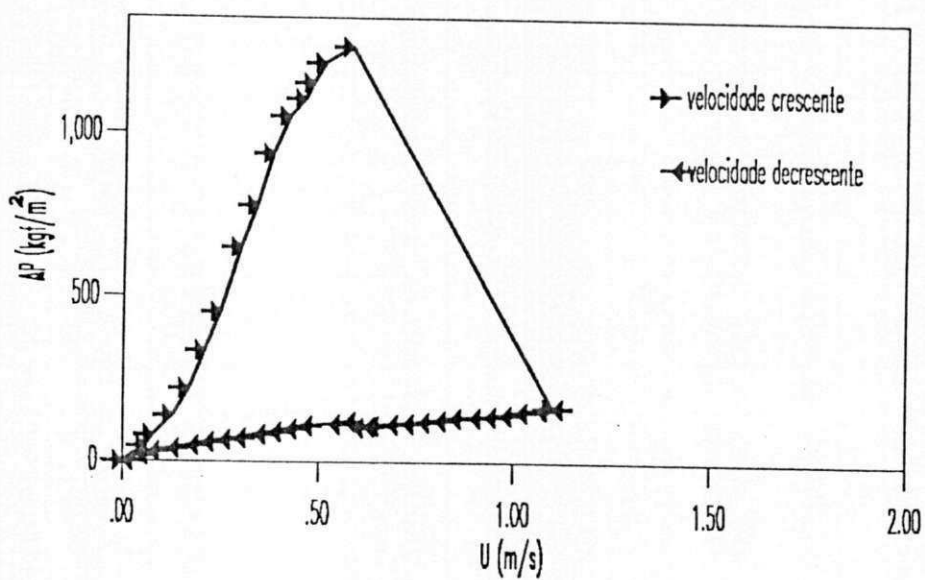


(j)

Figura 4.5- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (i) $M_p/M_i = 0\%$; (j) $M_p/M_i = 2\%$.



(k)



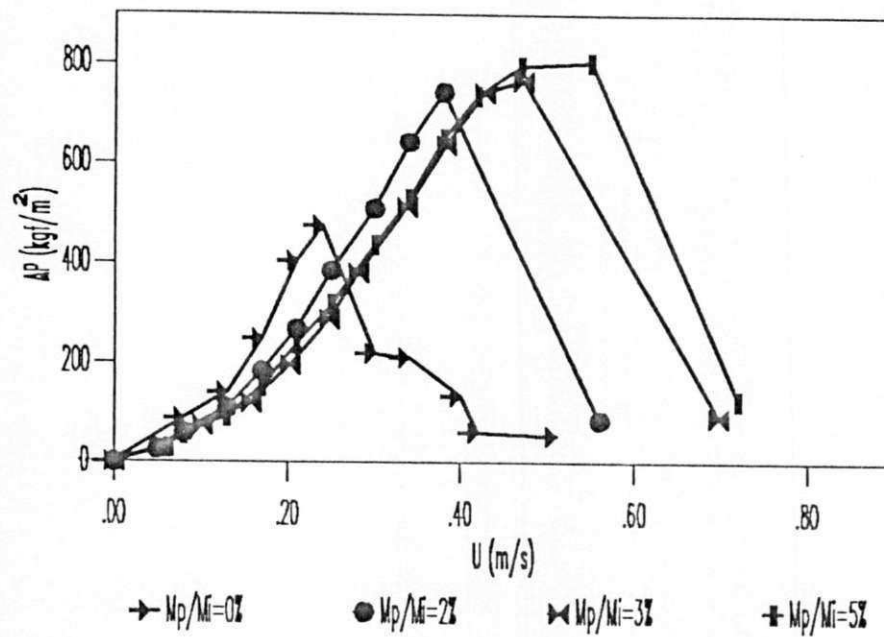
(l)

Figura 4.6- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar: (k) $M_p/M_i=3\%$; (l) $M_p/M_i=5\%$.

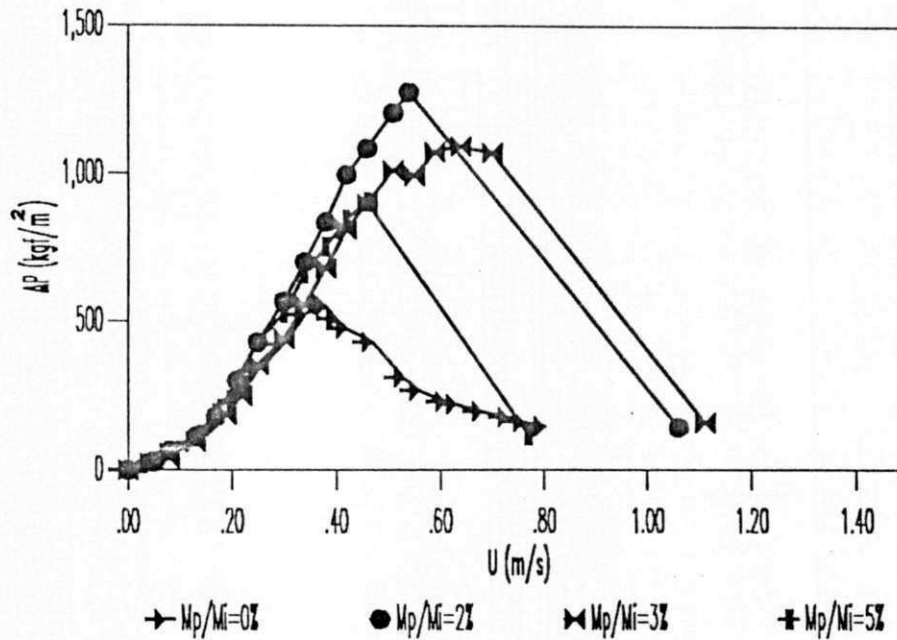
4.2.2- Efeito da Relação Massa de Polpa / Massa de Partículas Inertes sobre as Curvas Características de Queda de Pressão em Função da Velocidade do Ar

Na Figura 4.7a está representada a curva de queda de pressão em função da velocidade do ar, mostrando a comparação das curvas características para velocidade crescente, utilizando uma altura do leito de inertes igual a 18,0 cm, referente à seção cônica, para quantidades de polpa alimentada iguais a 0, 2, 3 e 5 %. Percebe-se que há uma tendência de elevação nos valores de queda de pressão, com o aumento da quantidade de polpa alimentada. Esta elevação poderia ser justificada pela exigência de uma maior energia requisitada pelo jato de ar para romper a estrutura mais aderida da camada de sólidos, devido à aglomeração das partículas causada pela presença de polpa no leito, o que acarreta uma diminuição da porosidade.

O mesmo comportamento não foi observado para as alturas do leito iguais a 23,0 e 28,0 cm, destacados nas Figuras 4.7b e 4.8, respectivamente. Para 23,0 cm, percebe-se um mesmo efeito em relação ao aumento da queda de pressão máxima nas curvas características obtidas com polpa, onde, à medida que a concentração de polpa aumentou, houve uma diminuição nos valores da queda de pressão. Já para a altura de 28,0 cm, não foi observado efeito significativo. Deve-se observar que as alturas de 18,0; 23,0 e 28,0 cm correspondem às regiões do cone, interface cone-cilindro e cilíndrica, respectivamente, o que explicaria as diferenças de comportamento presentes nas curvas analisadas.



(a)



(b)

Figura 4.7- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar: (a) $H=18,0$ cm; (b) $H=23,0$ cm.

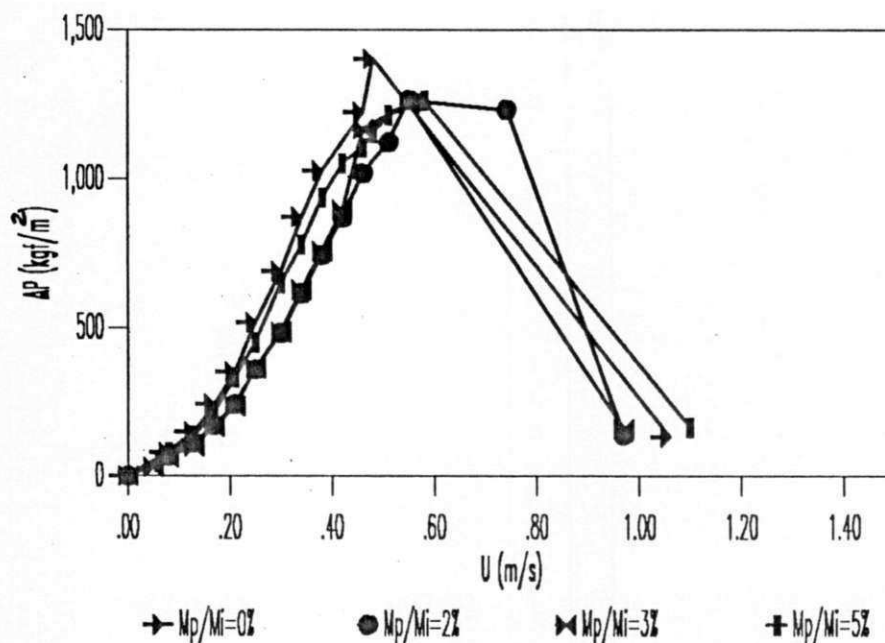
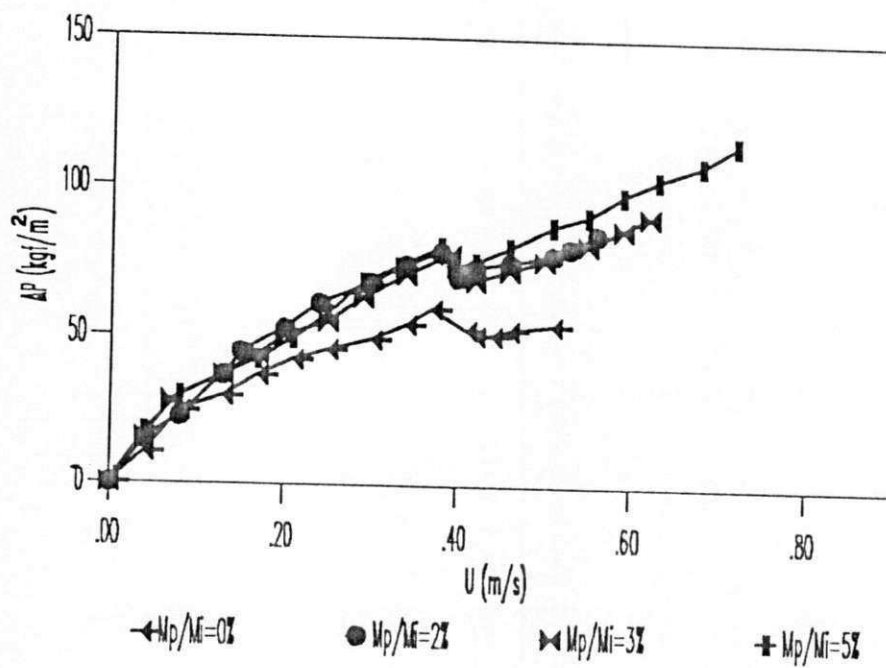
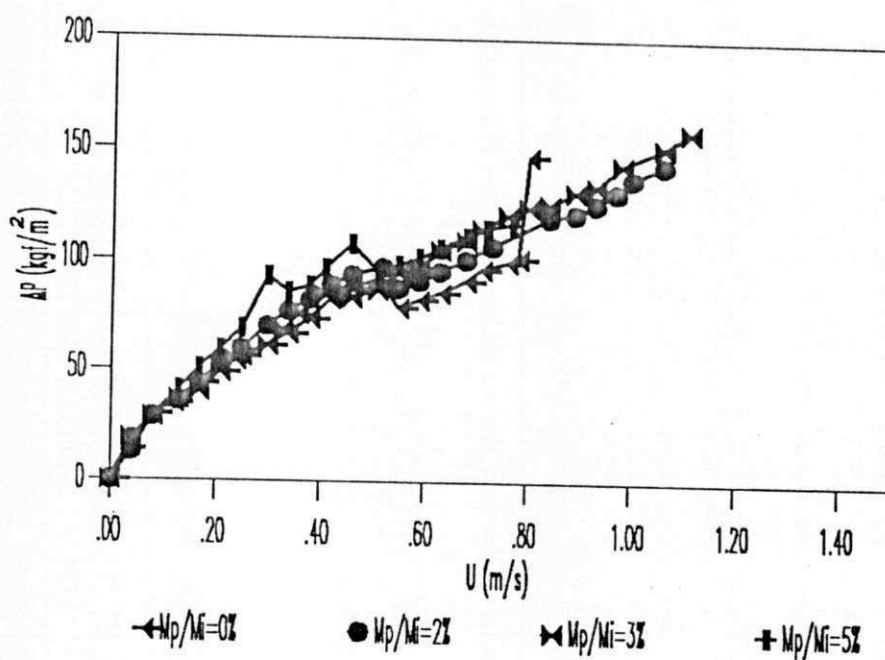


Figura 4.8- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar: $H=28,0$ cm.

Para as curvas de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar, mostradas nas Figuras 4.9 e 4.10, verifica-se, em cada uma delas, que a presença de polpa provoca um acréscimo pouco significativo para os valores de queda de pressão. A Tabela A.13 mostra que os dados de queda de pressão de jorro mínimo aumentaram com a elevação da quantidade de polpa, salvo algumas exceções, para todas as alturas do leito analisadas. Enquanto que, para a velocidade de jorro mínimo, os valores diminuíram à medida que a proporção de massa de polpa/massa de inerte aumentou. Estes resultados obtidos para ΔP_M , ΔP_{jm} e U_{jm} concordaram com os encontrados por LIMA (1992), trabalhando com polpa de umbu, que atribuiu a contradição observada para a U_{jm} ao efeito que a polpa de acerola pode exercer sobre a dinâmica do leito, sendo observado que, após o rompimento da camada de sólidos, o efeito lubrificante da polpa facilita o escoamento do gás e o jorro estável será alcançado em velocidades mais baixas.



(a)



(b)

Figura 4.9- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar: (a) $H = 18,0$ cm; (b) $H = 23,0$ cm.

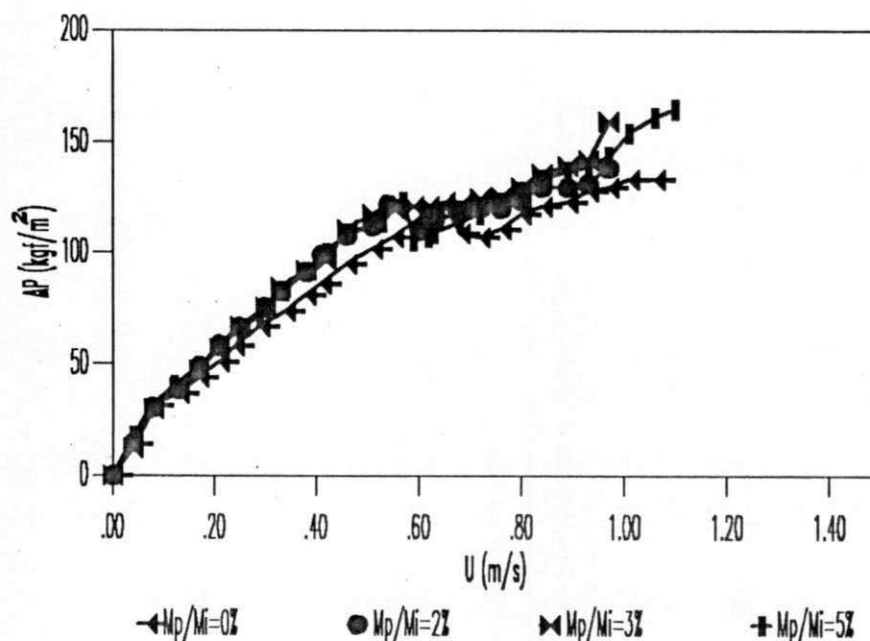


Figura 4.10- Curvas características de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar: $H=28,0$ cm.

4.2.3- Efeito da Altura do Leito nos Parâmetros Fluidodinâmicos

As características fluidodinâmicas deste tipo de equipamento têm sido intensivamente estudadas nos últimos anos, tendo merecido atenção dois parâmetros: 1) a queda de pressão máxima atingida antes do início do jorro, no final do período em que as partículas se comportam como um leito fixo; 2) a queda de pressão quando do jorro constante e desenvolvido. O primeiro valor é de utilidade no dimensionamento do soprador necessário ao início do jorro, enquanto o segundo fornece a energia utilizada durante a operação do mesmo (RÉ, 1986).

Os valores das alturas do leito de inertes iguais a 18,0 e 23,0 cm correspondem à região cônica e à interface cone-cilindro da coluna de secagem, respectivamente. Enquanto que os valores que variaram de 26,0 a 30,0 cm, foram medidos na seção cilíndrica do secador.

Observa-se através das curvas apresentadas a seguir e da tabela mostrada no Apêndice A (Tabela A.13) que, para todas as alturas citadas anteriormente e relação massa de polpa/massa de inerte igual a 0 %, isto é, na ausência de polpa de acerola, houve um aumento do valor da queda de pressão máxima à medida que aumentava-se a quantidade de partículas inertes, ou seja, a altura do leito, havendo um decréscimo apenas para altura igual a 30,0 cm, onde o jorro mostrava-se instável, com tendência ao colapso.

Na presença de polpa, para as curvas de quantidade de polpa alimentada iguais a 2, 3 e 5 %, percebeu-se uma elevação nos valores de queda de pressão máxima à medida que aumentou-se a altura do leito de partículas inertes, sendo observada uma mudança no comportamento das curvas para alturas de 28,0 e 30,0 cm, que correspondem à seção cilíndrica da coluna.

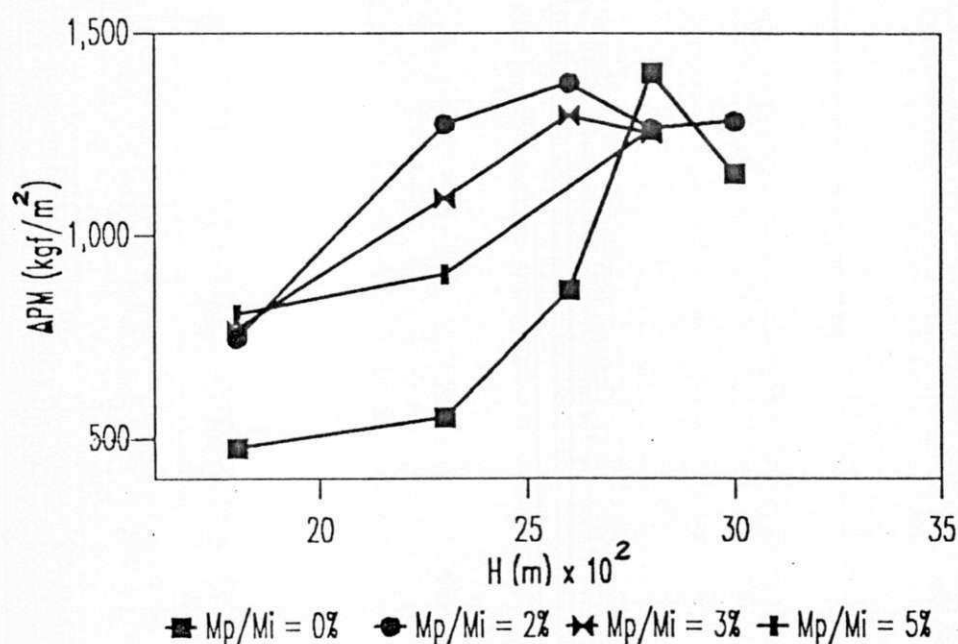


Figura 4.11- Queda de pressão máxima em função da altura do leito.

Observando-se a Figura 4.12, a curva que representa os dados na ausência de polpa obedeceu ao que foi esperado, tendo um aumento nos valores da queda de pressão de jorro mínimo quando elevou-se a altura do leito de partículas, para todas as alturas estudadas. Para a presença de polpa, as curvas apresentaram um comportamento semelhante às curvas sem polpa, com exceção da curva correspondente a 2 % de polpa alimentada, para uma altura do leito igual a 30,0 cm.

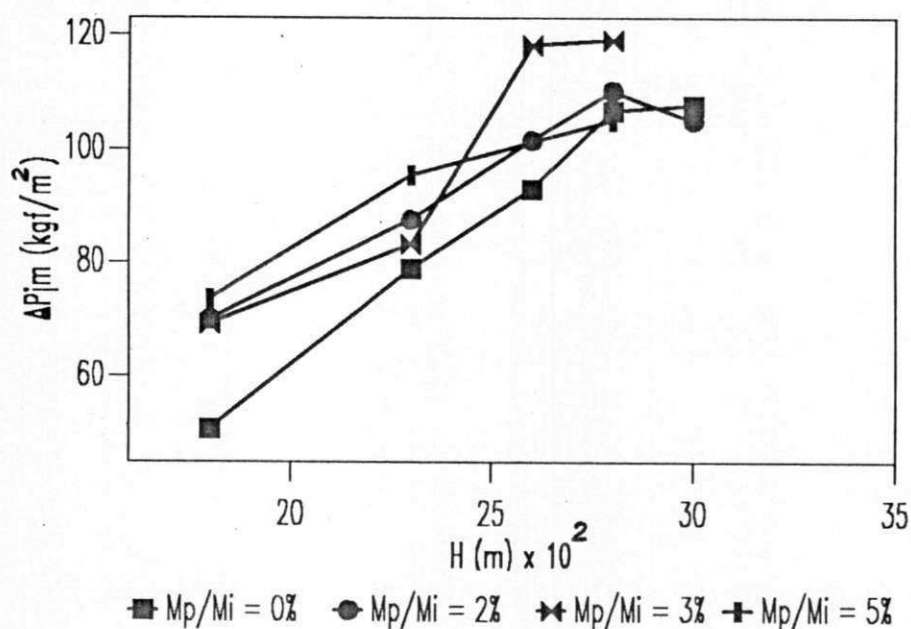


Figura 4.12- Queda de pressão de jorro mínimo em função da altura do leito.

A Figura 4.13 mostra que, na ausência de polpa, houve uma elevação nos valores da velocidade de jorro mínimo, à medida que aumentou-se a altura do leito de inertes, como era esperado, exceto para altura igual a 30,0 cm; sendo observado o mesmo comportamento quando foram analisados os dados experimentais, utilizando-se percentagens de polpa de acerola iguais a 2, 3 e 5 % da massa de partículas inertes.

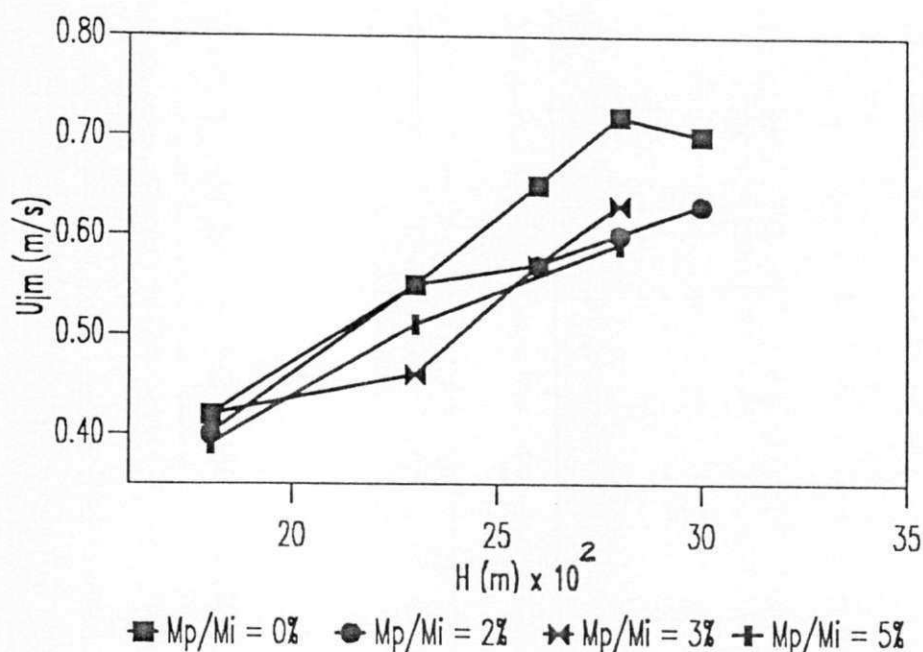


Figura 4.13- Velocidade de jorro mínimo em função da altura do leito.

4.2.4- Comparação dos Dados Experimentais com Correlações Matemáticas

Inúmeros pesquisadores tentaram estabelecer correlações teóricas ou empíricas para o cálculo dos parâmetros fluidodinâmicos; porém, normalmente sua aplicabilidade está restrita aos dados que as originaram (HUFENÜSSLER, 1985).

Antes da análise dos resultados, é importante destacar que as correlações utilizadas neste trabalho aplicam-se apenas aos sistemas gás-sólidos, não havendo, portanto, a presença do parâmetro quantidade de polpa alimentada, levando em conta apenas características da geometria do equipamento, como diâmetro da coluna e diâmetro do orifício de entrada do gás, e propriedades das partículas utilizadas, tais como: porosidade, massa específica e esfericidade.

As Figuras 4.14 a 4.16 mostram a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles obtidos através das correlações matemáticas apresentadas no Capítulo II, para os parâmetros queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo. Os resultados calculados para estes parâmetros estão relatados no Apêndice A, Tabelas A.14 a A.16.

As correlações de THORLEY et al. (1959) e OGINO et al. (1993) não foram satisfatórias pois mostraram valores inferiores aos dados experimentais para queda de pressão máxima, apresentando desvios médios acima de 70 % para ensaios com polpa e sem polpa, referentes a todas as alturas estudadas. Enquanto que os resultados preditos pela correlação de ASENJO et al. (1977) foram os que mais se aproximaram dos experimentais, sendo observado um menor desvio de 18 % para altura do leito igual a 23,0 cm sem polpa, referente à interface cone-cilindro, e um maior desvio de 64 % para a mesma altura, com 2 % de polpa de acerola. A Figura 4.14 mostra a comparação para percentagens de polpa iguais a 0 e 5 %.

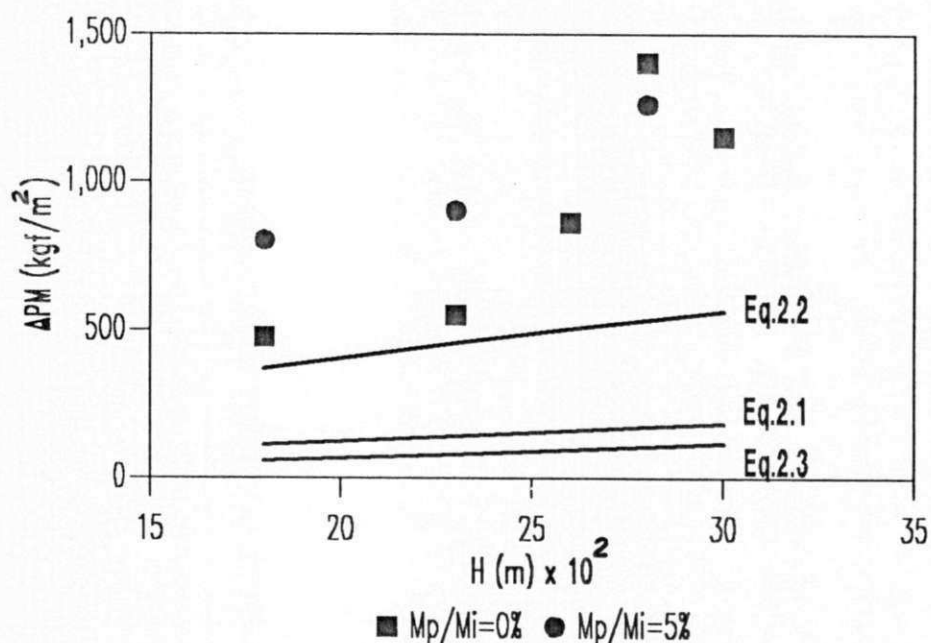


Figura 4.14- Queda de pressão máxima em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.

Os valores obtidos experimentalmente e através das correlações matemáticas para a queda de pressão de jorro mínimo, em função da altura do leito, estão reportados na Figura 4.15, para 0 e 5 % de polpa, e na Tabela A.15, para todas as quantidades de polpa. Observa-se que a correlação de MALEK et al. (1965) foi inferior aos dados experimentais, com desvios variando entre 24 e 63 %, para alturas do leito de inertes iguais a 30,0 e 18,0 cm, respectivamente; sendo o primeiro valor para quantidade de polpa igual a 2 % e o segundo para 5 %. As equações de LEFROY & DAVIDSON (1969) e SAMPAIO (1978) apresentaram os valores mais satisfatórios, sendo observado um desvio mínimo de 0,3 %, para uma altura do leito de 26,0 cm, com 2 % de polpa, utilizando a correlação de LEFROY & DAVIDSON (1969) e um desvio máximo de 45 %, para 18,0 cm de altura, na ausência de polpa, obtido através da correlação de SAMPAIO (1978).

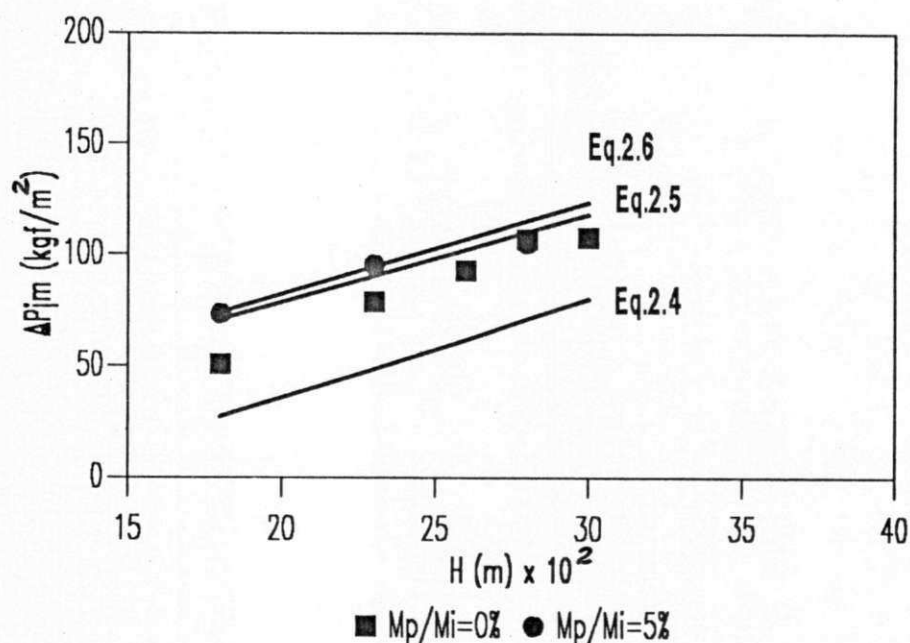


Figura 4.15- Queda de pressão de jorro mínimo em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.

Na Figura 4.16 estão mostradas as curvas da velocidade de jorro mínimo comparadas às obtidas através das correlações matemáticas, adequadas ao parâmetro. Os dados obtidos utilizando a correlação de MATHUR & GISHLER (1955) mostraram um menor desvio de 10 %, para altura de 18,0 cm e 5 % de polpa alimentada. O maior desvio foi de 40 %, para altura do leito igual a 28,0 cm, na ausência de polpa. Os resultados calculados pelas correlações de WU et al. (1987) e CHOI & MEISEN (1992) são maiores que os deste trabalho, com algumas exceções, sendo observado que, para WU et al. (1987), os desvios para todas as alturas variaram de 10 a 69 %, com todos os valores acima dos experimentais. Para a correlação de CHOI & MEISEN (1992), houve uma boa aproximação com um menor desvio de 2 % para uma altura de 30,0 cm, com 2 % de polpa alimentada e um maior valor de 33 % para altura do leito igual a 18,0 cm, com 5 % de polpa.

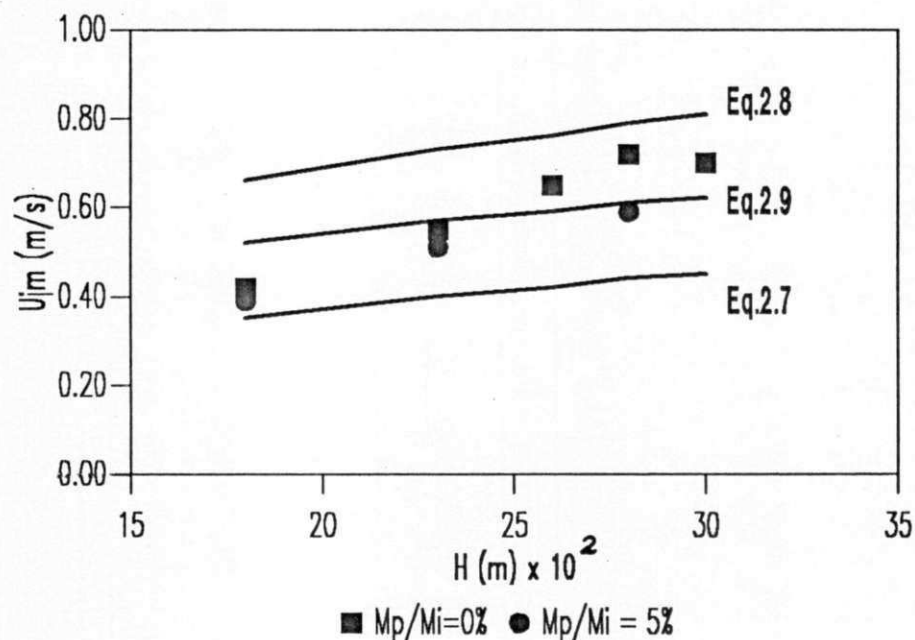


Figura 4.16- Velocidade de jorro mínimo em função da altura do leito. Comparação com previsões da literatura.

4.2.5- Circulação de Partículas Sólidas

No Apêndice B estão relacionadas as tabelas correspondentes às figuras discutidas a seguir.

Na Figura 4.17 são mostrados valores locais de circulação de sólidos, relativos à seção circular da coluna cilíndrica, considerado como anel de amostragem, para diferentes posições radiais. Para a altura do leito de 18,0 cm, a distribuição radial de circulação de sólidos corresponde à fonte a uma distância de 19,0 cm da superfície do anel. Observa-se que a circulação local de partículas aumenta com o raio, desde o centro da fonte, em direção à parede, à medida que a velocidade do ar e, em consequência, a altura da fonte, aumentam, significando que boa parte das partículas sólidas choca-se contra a parede da coluna. Na Figura 4.18 são ilustrados os resultados correspondentes à mesma altura do leito, com 5 % de polpa alimentada. Pode-se ver que a presença da polpa afeta o comportamento, deslocando a posição do máximo e obtendo-se valores locais de circulação menores.

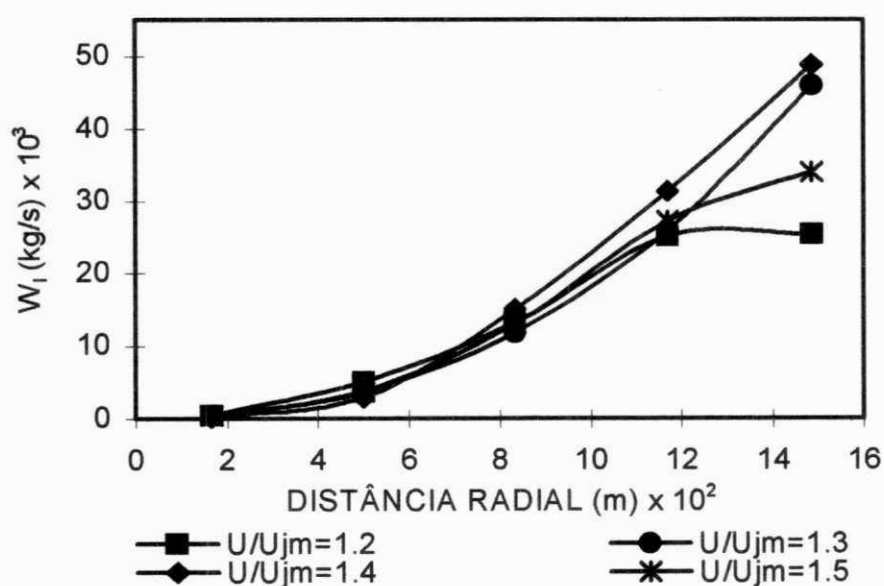


Figura 4.17- Circulação de sólidos correspondente ao anel de amostragem em função da distância radial: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.

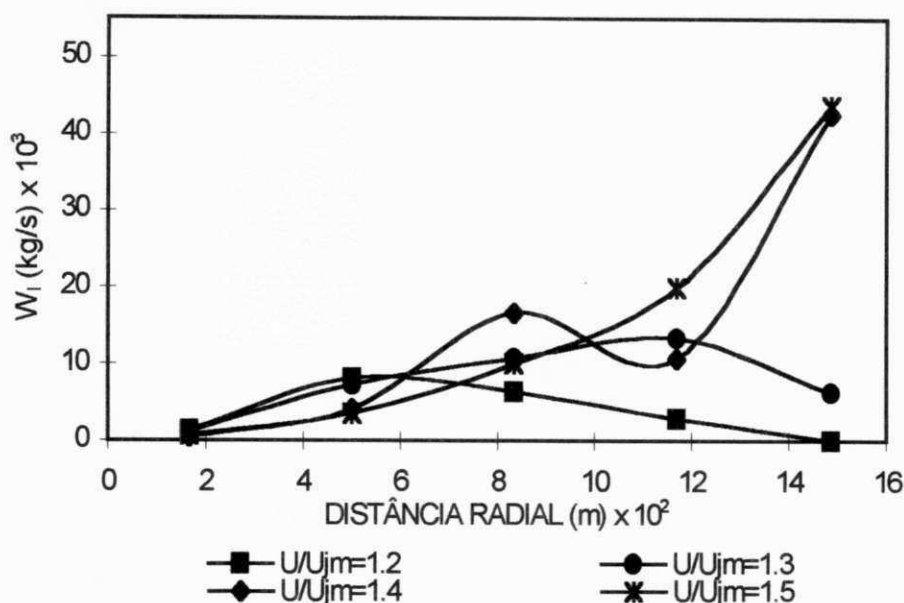


Figura 4.18- Circulação de sólidos correspondente ao anel de amostragem em função da distância radial: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=5$ %.

O efeito da presença de polpa é melhor observado nas Figuras 4.19 e 4.20, onde são mostrados valores de circulação total de sólidos, a uma altura do leito de 18,0 cm, com percentagens de polpa de 0, 2 e 5 %, e 23,0 cm, para 0 e 2 % de polpa, respectivamente, em função da relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo, para valores de 1,2 a 1,5. Das figuras, conclui-se que a circulação total de sólidos diminui com o aumento da proporção de polpa alimentada; e que há um crescimento significativo até um valor máximo da W_{ts} para a relação U/U_{jm} igual a 1,4, sendo observada uma tendência a decrescer logo após este valor ; observa-se também que os ensaios realizados sem a presença de polpa, apenas com as partículas de poliestireno, nas mesmas condições operacionais mostraram valores acima dos experimentos desenvolvidos com polpa. Através dessas conclusões, acredita-se que a presença de polpa afeta a *performance* do equipamento, como também foi destacado por LIMA (1992), quando trabalhou com polpa de umbu, neste mesmo secador.

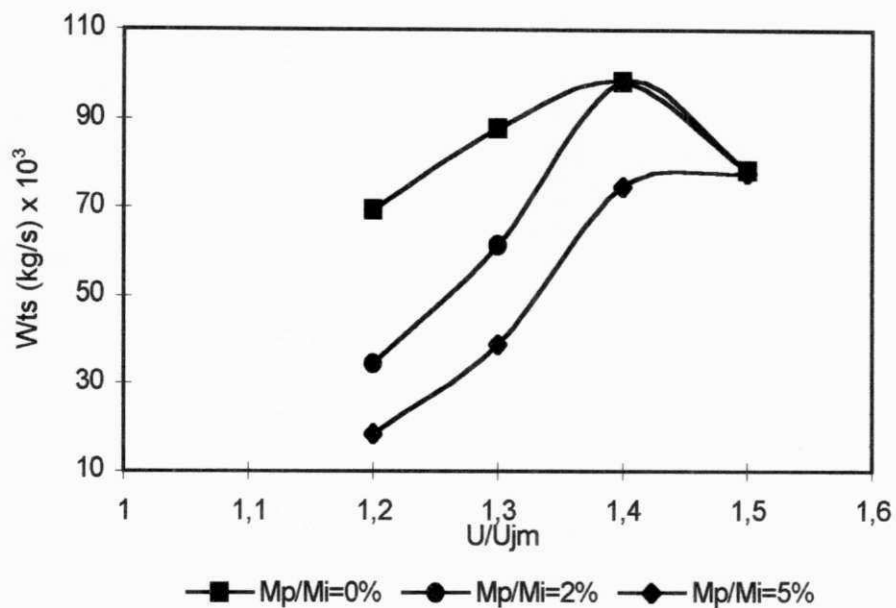


Figura 4.19- Circulação total de sólidos em função da relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo: H=18,0 cm.

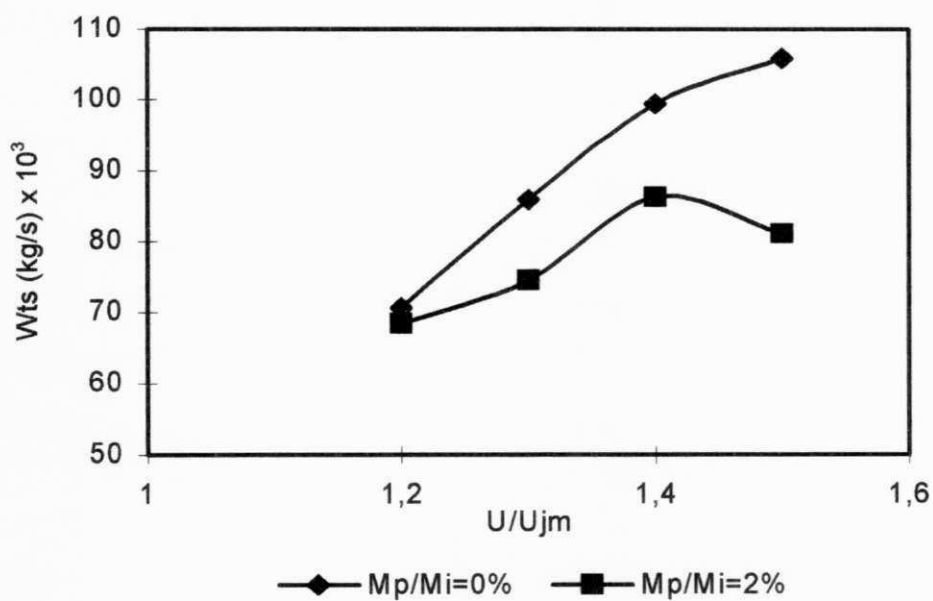


Figura 4.20- Circulação total de sólidos em função da relação velocidade total do gás/velocidade de jorro mínimo: H=23,0 cm.

Com relação à altura do leito, na Figura 4.21 vemos que, para leitos localizados na região cônica e interface cone-cilindro, que correspondem a 18,0 e 23,0 cm, respectivamente, a circulação de sólidos na fonte não é afetada, reproduzindo valores muito próximos para ambas as regiões. Entretanto, para alturas do leito maiores que 23,0 cm, na região cilíndrica, a circulação total de sólidos eleva-se com o aumento da altura do leito. O comportamento é melhor analisado se considerarmos o parâmetro Z_i , que é a distância medida desde a interface anel-fonte até a posição da célula de medida. É de se esperar que, quanto menor for a distância Z_i , maior deve ser a circulação de partículas, já que a fonte se torna mais rarefeita e as partículas se desaceleram na medida em que se distanciam do anel. Enquanto que, para distâncias de Z_i maiores, ocorre o inverso, isto é, há uma menor coleta de partículas, podendo ser atribuído ao fato de que a interface anel-fonte se distancia da posição da célula de medida, ocorrendo a desaceleração das partículas e havendo, então, perda das mesmas, antes de alcançarem a abertura da célula de medida. Este estudo pode ser analisado dessa maneira, pelo fato de que todas as medidas foram realizadas, por limitações experimentais, numa posição fixa.

Podemos observar, também, que um aumento da velocidade do ar provocou um aumento na circulação de sólidos. Entretanto, para relações de U/U_{jm} maiores que 1,4, a mudança na tendência pode ser atribuída a que uma boa parte das partículas seja arrastada e se choque contra a tela defletora, sendo dispersadas no seu retorno ao leito, em um movimento aleatório.

Portanto, o aumento de circulação total de sólidos, observado na Figura 4.21, deve-se em parte ao fato de que as medidas foram realizadas em regiões cada vez mais densas, mas também devido ao aumento intrínseco da velocidade das partículas com a vazão do gás.

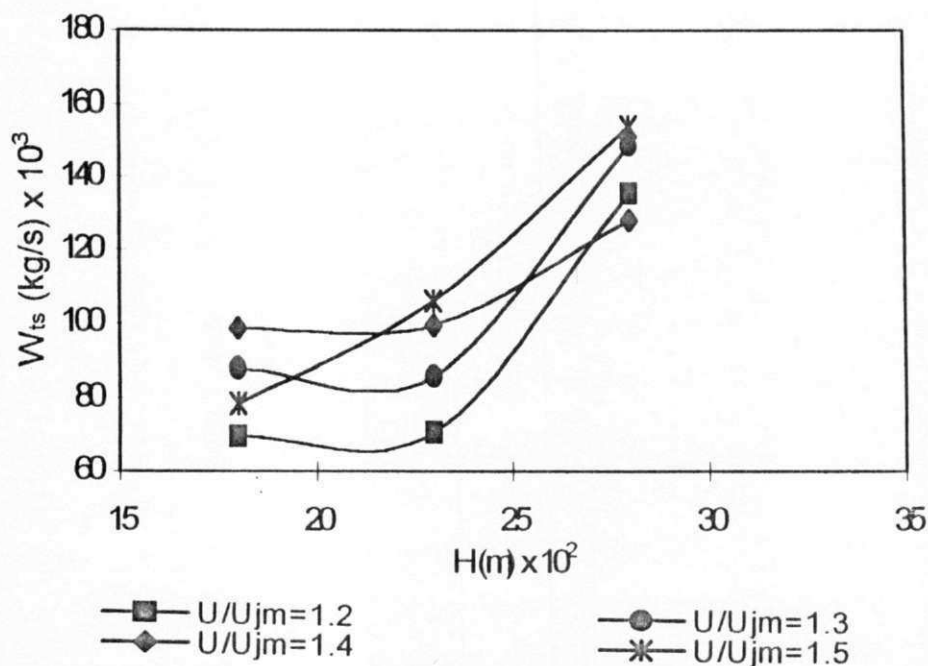


Figura 4.21- Circulação total de sólidos em função da altura do leito:
 $M_p/M_i = 0\%$.

No caso de leito cônico, REYES (1994) mostrou que a maior captação de partículas ocorre na região próxima ao jorro. Contrariamente ao observado por tal trabalho, mesmo no leito cônico, a nossa medida de circulação de sólidos encontrava-se na fonte, na região cilíndrica, apresentando um deslocamento do máximo em direção à parede com o aumento da vazão. Com relação à circulação total de sólidos, a Figura 4.22 mostra uma comparação dos valores experimentais, para alturas do leito de 23,0 cm, com valores calculados pela correlação de REYES (1994). Observa-se que nossos dados apresentam a mesma tendência, embora com valores maiores que os preditos pela correlação.

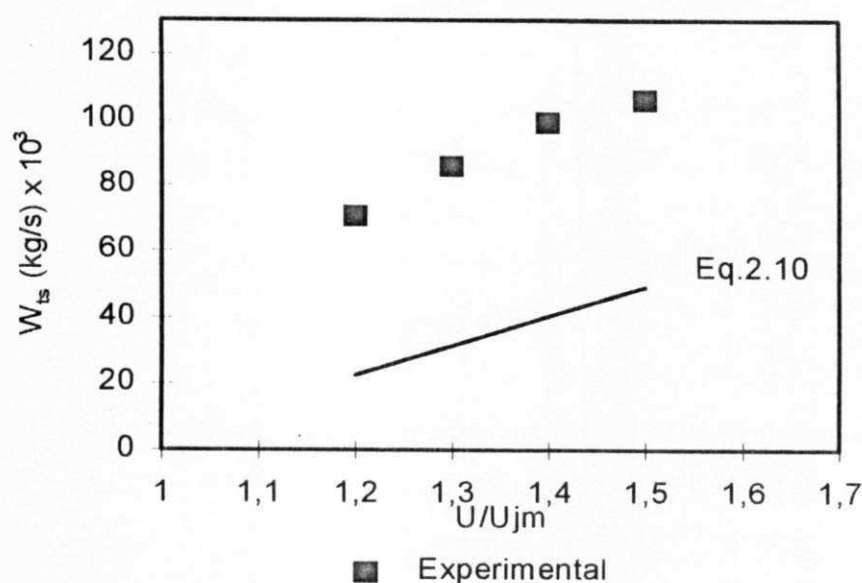


Figura 4.22- Circulação total de sólidos em função da relação U/U_{jm} . Comparação com correlação matemática: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.

4.2.6- Perfis Axial e Radial de Queda de Pressão

Na análise dos perfis de pressão, os parâmetros mais importantes são: a velocidade do gás que atravessa o leito e a pressão medida ao longo da coluna, em posições axiais e radiais. As curvas dos perfis de queda de pressão também são destinados à determinação do diâmetro do jorro, segundo a técnica descrita no Capítulo III e os dados experimentais estão relacionados no Apêndice C, Tabelas C.1 a C.8, mostrados nas figuras a seguir. Cada perfil foi determinado a uma velocidade correspondente à necessária para que houvesse o jorro, sem a tendência ao colapso.

As Figuras 4.23 a 4.25b mostram a queda de pressão em função do raio adimensional, medida através das sondas de pressão, para uma altura do leito igual a 18,0 cm, variando a quantidade de polpa alimentada. Na Figura

4.23, observa-se que não há variação nos valores de queda de pressão com a posição radial, ao longo das medidas feitas na região cilíndrica, como observado por THORLEY et al. (1959), GRBAVCIC et al. (1976) e RÉ (1986), onde destacaram que a pressão na região anular é radialmente uniforme para $Z/H > 0,5$. O mesmo comportamento não foi observado na medida localizada no centro da coluna, havendo uma diminuição da queda de pressão com o raio, na região central, onde existe interferência do jorro. Para as medidas feitas na região cônica da coluna, com 0 % de polpa, que corresponde a $Z/H = 1,00$, esperava-se que a queda de pressão registrasse valores menores que os obtidos nas medidas realizadas na região cilíndrica. Esta discrepância pode ser atribuída à localização da sonda curvada próxima à posição da *vena contracta*, que é o ponto de pressão estática mínima e seção transversal mínima do jato de fluido que emerge do orifício. Sendo assim, as tomadas na *vena contracta* podem produzir, para uma dada vazão, a maior diferença de pressão.

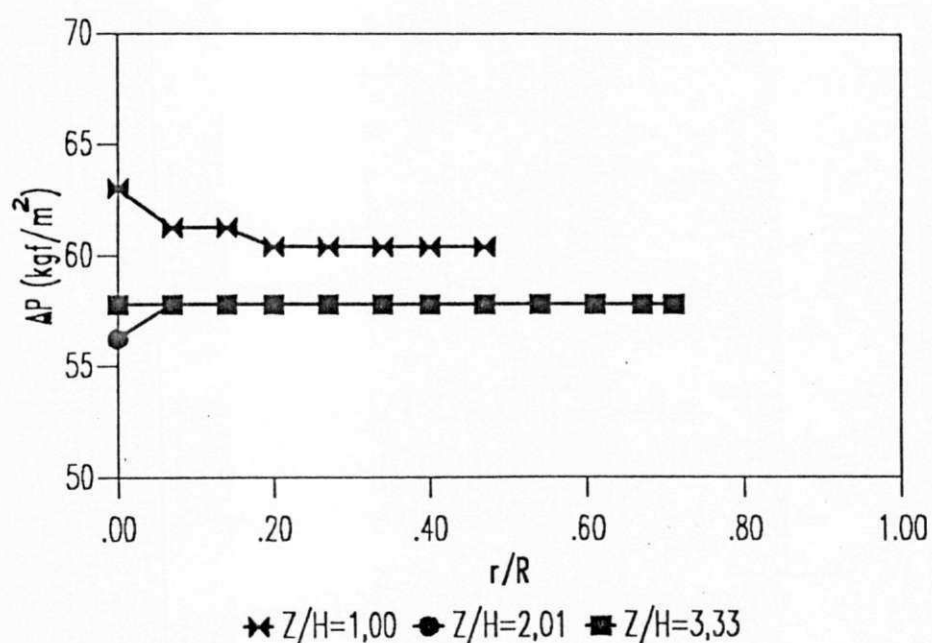


Figura 4.23- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm, $M_p/M_i=0$ % e $U_j=0,51$ m/s.

A discrepância observada anteriormente não foi encontrada nas medições realizadas com polpa. Nas Figuras 4.24, 4.25a e 4.25b, referentes à altura do leito igual a 18,0 cm, com quantidades de polpa de 2, 3 e 5 %, respectivamente, os resultados obtidos foram os esperados, pois os valores de queda de pressão para a tomada na região cônica ($Z/H = 1,00$) foram inferiores aos relativos às tomadas na seção cilíndrica.

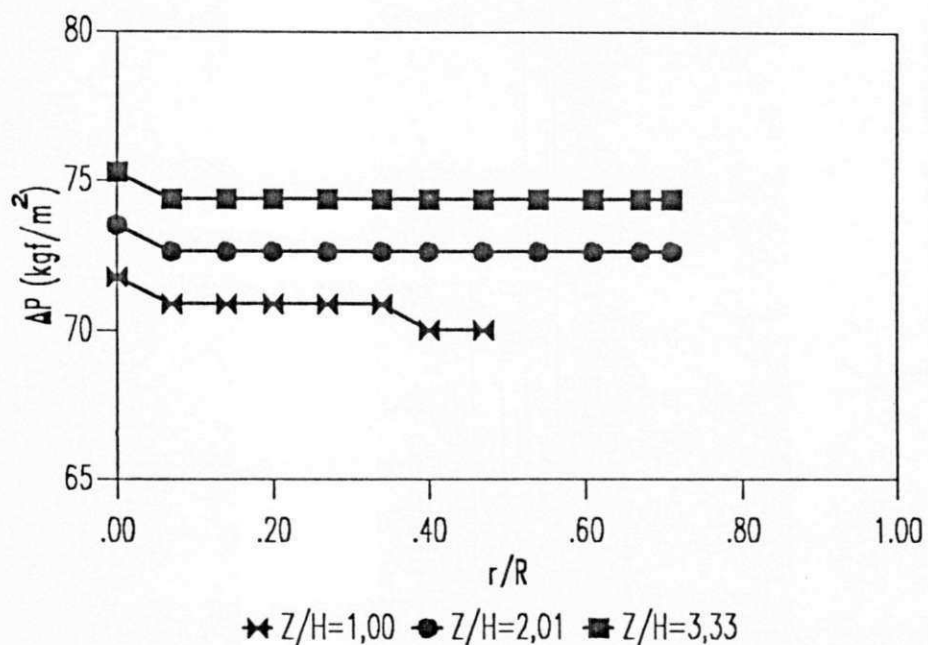


Figura 4.24- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=2$ % e $U_j=0,56$ m/s.

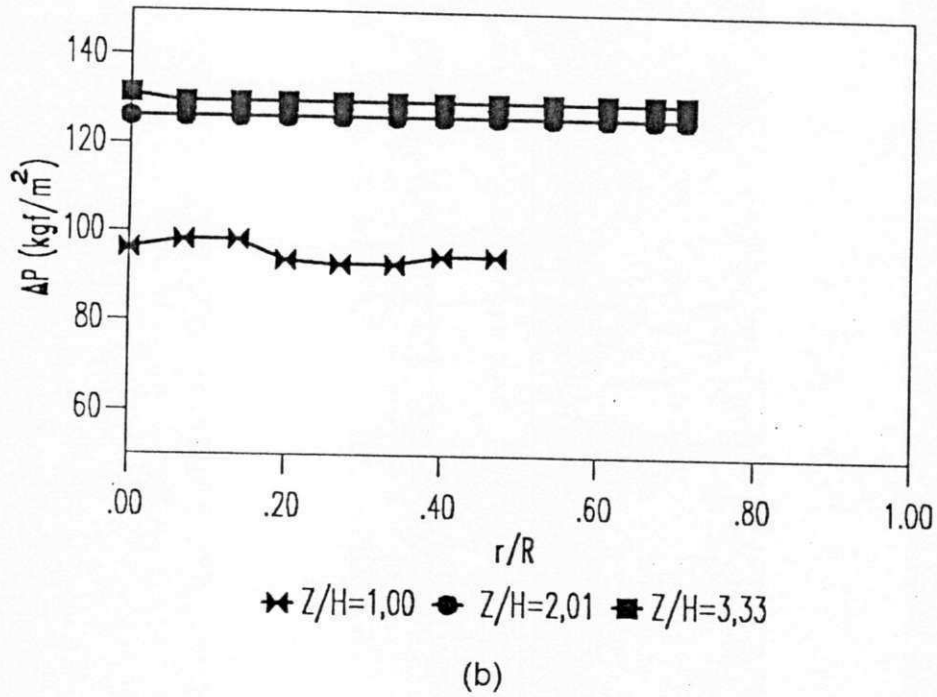
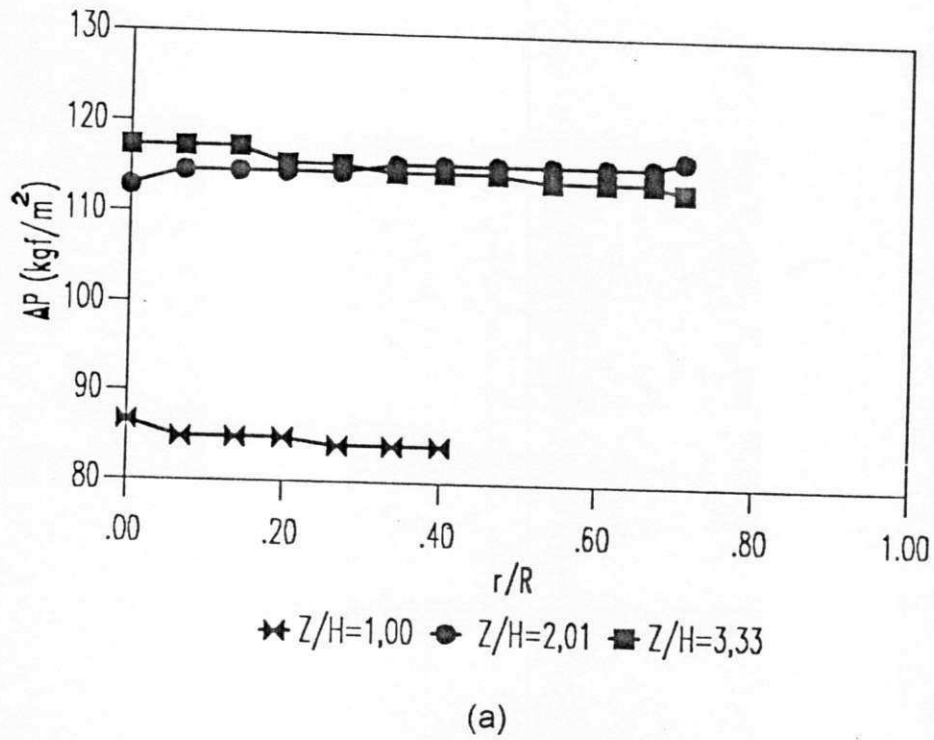


Figura 4.25- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm;
 (a) $M_p/M_i=3\%$ e $U_j=0,62$ m/s; (b) $M_p/M_i=5\%$ e $U_j=0,72$ m/s.

Analisando as curvas para a tomada localizada na superfície do leito, seção cônica, de maneira conjunta, isto é, para altura do leito igual a 18,0 cm e todas as razões de massa de polpa/massa de inerte, mostradas na Figura 4.26, percebe-se um aumento nos valores de queda de pressão com a quantidade de polpa, visto que o aumento da massa do leito tende a reduzir a porosidade, aumentando assim a resistência à passagem do gás, como já mencionado para as curvas características com os parâmetros e dados citados acima.

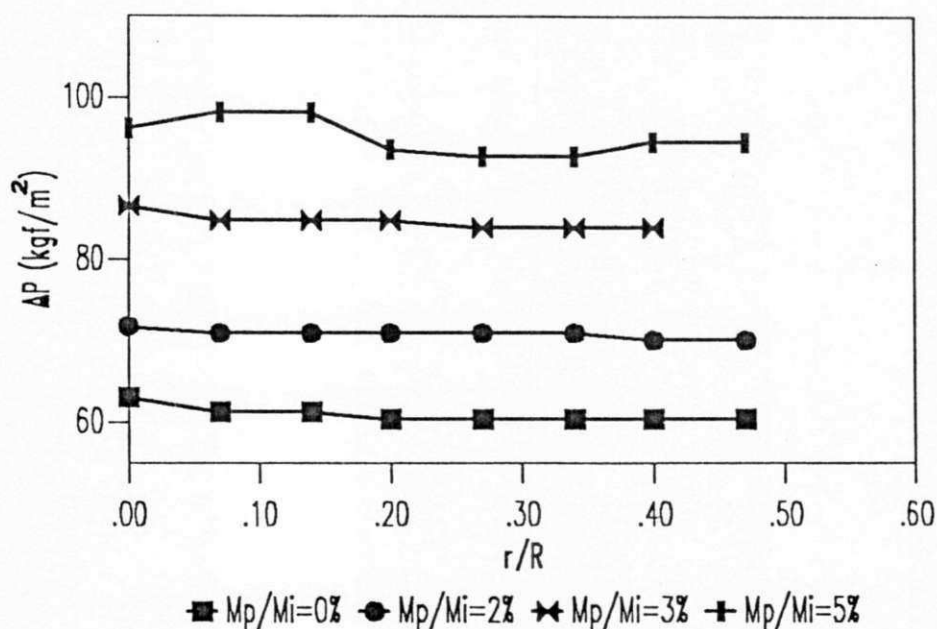


Figura 4.26- Efeito da presença de polpa sobre os perfis de queda de pressão, para a tomada localizada na superfície do leito, seção cônica: $H=18,0$ cm.

Os perfis axiais e radiais de queda de pressão, para a altura do leito igual a 23,0 cm, referente à interface cone-cilindro, com quantidades de polpa de 0 e 2 %, apresentaram resultados satisfatórios. Em decorrência da expansão do leito, todas as medidas se concentraram na região cilíndrica. Os dados relativos a esses experimentos estão relatados no Apêndice C, Tabelas C.5 e C.6, e mostrados nas figuras a seguir.

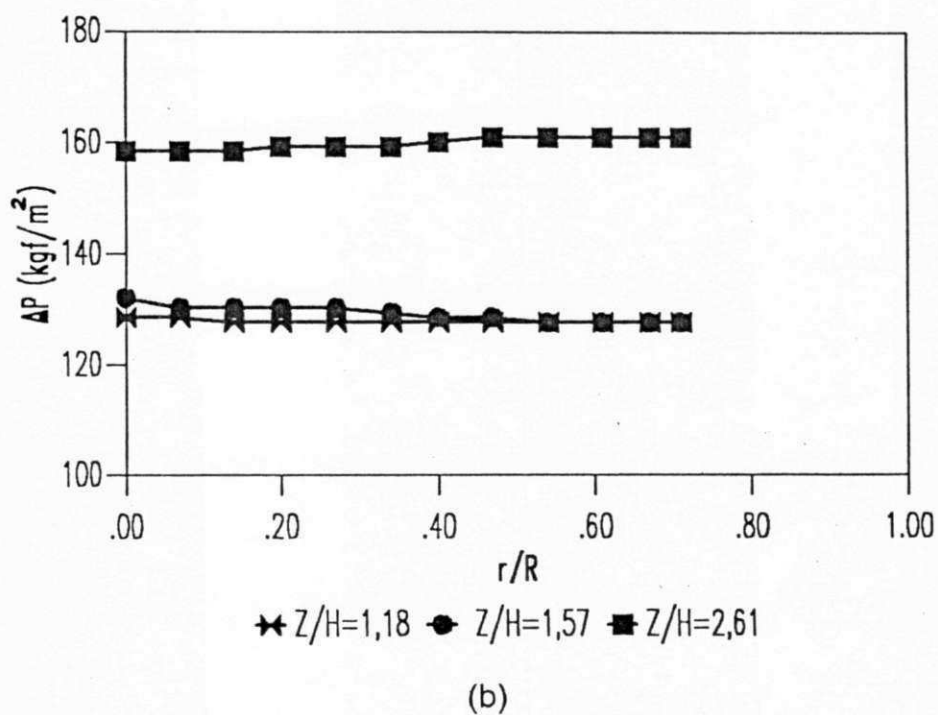
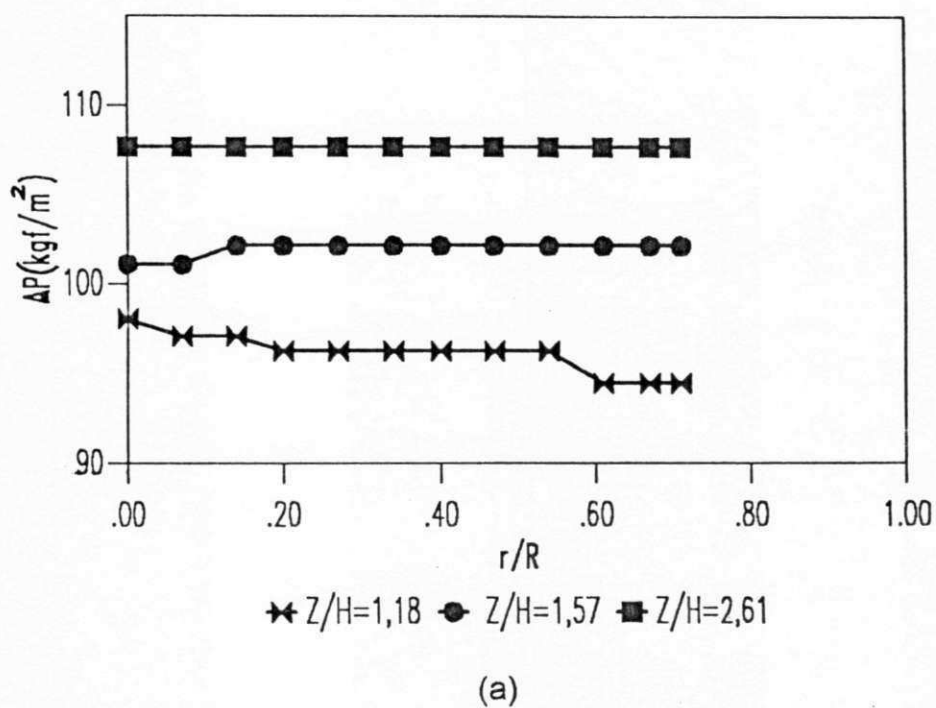


Figura 4.27- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm;
 (a) $M_p/M_i=0\%$ e $U_j=0,80$ m/s; (b) $M_p/M_i=2\%$ e $U_j=1,06$ m/s.

Para a altura do leito igual a 28,0 cm só foi possível realizar um ensaio, apenas com partículas inertes, por limitação do equipamento, produzindo um jorro instável tendendo ao colapso, na presença de polpa. A Figura 4.28 mostra as duas tomadas feitas na região cilíndrica, onde as curvas se cruzaram em um ponto que, de acordo com o que foi observado por SILVA (1996), é considerado como determinante do diâmetro do jorro.

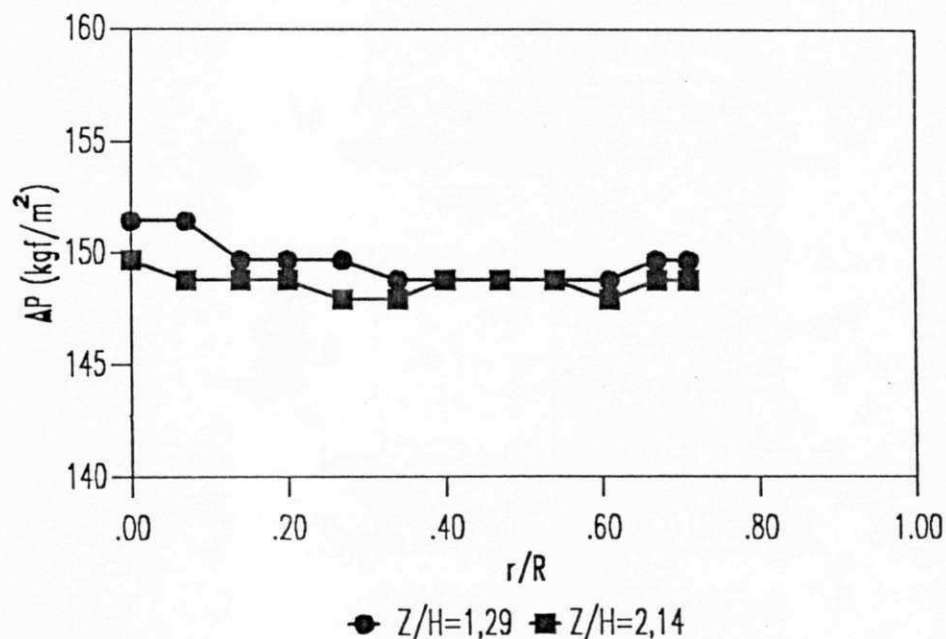


Figura 4.28- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=28,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=1,06$ m/s.

No Apêndice C, Tabela C.8, está ilustrada a comparação entre os dados experimentais do diâmetro do jorro, obtidos das figuras dos perfis de queda de pressão, e os calculados através de correlações matemáticas relatadas na literatura. A correlação de ABDELRAZEK (1969) aproximou-se dos dados experimentais, apresentando valores coincidentes, nos casos sem polpa e com 5 % de polpa, para 18,0 cm de altura, e um maior desvio em 23,0 cm com 2 % de quantidade de polpa. Enquanto que, LEFROY & DAVIDSON (1969) mostraram um desvio de 17 % para as alturas de 18,0 cm, com 0 e 5 % de polpa, e 23,0 cm, com 0 % de polpa e um máximo de 75 % para 23,0 cm de altura, com 2 e 3% de polpa alimentada.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho, foi possível concluir que:

- as curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar apresentaram comportamento semelhante à curva típica de um leito de jorro convencional, descrita por MATHUR & EPSTEIN (1974), com boa reprodutibilidade. Entretanto, foram observadas mudanças nas curvas devido à presença de polpa;
- quanto aos parâmetros fluidodinâmicos, as curvas características ilustraram claramente um ponto máximo na curva de velocidade crescente, denominado de queda de pressão máxima; enquanto que a velocidade de jorro mínimo e a queda de pressão de jorro mínimo foram observadas através de um leve decréscimo na curva com velocidade decrescente;
- com relação à influência da presença de polpa de acerola nas variáveis fluidodinâmicas, pôde-se observar que, com o aumento da percentagem de polpa alimentada, os valores da queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro mínimo aumentaram, ao contrário da velocidade de jorro mínimo, que não sofreu influência deste parâmetro, verificando-se um decréscimo pouco significativo, na faixa de proporção de polpa utilizada neste trabalho;
- foi verificado que, para a ΔP_M , as correlações de THORLEY et al. (1959) e OGINO et al. (1993) subestimaram os valores experimentais, apresentando desvios acima de 70 % para todos os ensaios experimentais. Enquanto que os resultados preditos pela equação de ASENJO et al. (1977) ajustaram-se

melhor aos experimentais. Já para a ΔP_{jm} , observou-se que os dados da correlação de MALEK et al. (1965) foram inferiores aos experimentais; porém, as equações de LEFROY & DAVIDSON (1969) e SAMPAIO (1978) apresentaram valores mais satisfatórios, com um desvio mínimo de 0,3 %, utilizando a correlação de LEFROY & DAVIDSON (1969);

- o método de medida através da célula cilíndrica forneceu resultados confiáveis de circulação de sólidos local, na região da fonte. A circulação local de sólidos na região da fonte apresentou um máximo para uma posição radial, que depende da vazão do gás, da altura do leito e da proporção de polpa presente;
- observou-se que a circulação total de sólidos depende das mesmas variáveis que a circulação local, aumentando com a elevação da vazão do gás e da altura do leito. A presença de polpa diminui a circulação de sólidos. Apesar das diferenças nos sistemas utilizados, o efeito da vazão é razoavelmente bem predito pela correlação de REYES (1994), para o caso de ausência de polpa;
- os perfis de queda de pressão, em relação ao raio adimensional, para as alturas do leito e quantidades de polpa analisadas, exibiram comportamentos semelhantes quando as tomadas de pressão foram feitas na seção cilíndrica, com tendência a se tornarem planos na região anular. Enquanto que os perfis de pressão obtidos na região próxima à superfície do cone apresentaram uma descontinuidade que caracterizou a interface jorro-anel;
- o diâmetro do jorro foi determinado a partir dos perfis radiais de queda de pressão, estimando-se este valor no ponto localizado no início da descontinuidade da curva. Através dos dados experimentais obtidos, observou-se que este parâmetro é pouco influenciado pela presença de polpa.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Baseando-se nos resultados e conclusões apresentados neste trabalho, são destacadas a seguir algumas sugestões para o aprimoramento do mesmo:

- analisar a fluidodinâmica do leito, durante o processo de secagem de polpa de acerola, no estudo da mudança de escala em leito de jorro convencional;
- aperfeiçoar a técnica de alimentação da polpa, para obter uma vazão constante que não prejudique a *performance* do jorro, utilizando um alimentador adequado ao tipo de geometria do equipamento;
- realizar medidas de circulação de sólidos a uma mesma distância da superfície do leito, com relação à posição da célula de medida, variando as alturas do leito de partículas inertes;
- aprofundar a análise do perfil de queda de pressão na região cônica da coluna de secagem e avaliar a influência da velocidade do ar na obtenção do diâmetro do jorro;
- desenvolver estudos sobre a influência da aderência da polpa no desempenho do secador em leito de jorro;
- estender as pesquisas sobre a dinâmica de leito de jorro a outros tipos de frutas.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELRAZEK, I. D. An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds. **Ph. D. Thesis, Univ. of Tennessee**, Knoxville, 1969 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, 1974.
- ALMEIDA, M. M. **Desidratação de polpa de umbu**. Campina Grande-PB: UFPB, 1991. (Relatório de estágio).
- ALMEIDA, M. M. **Processamento de urucum em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos**. Campina Grande-PB, p. 94. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — UFPB, 1993.
- ALSINA, O. L. S.; LIMA, L. M. R.; MORAIS, V. L. M. & NÓBREGA, E. S. “Estudo da circulação de sólidos em um leito de jorro convencional para secagem de polpa da acerola”. In: I CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS (**Anais**), 1995, Campinas-SP, no prelo.
- ALSINA, O. L. S.; MORAIS, V. L. M. ; LIMA, L. M. R. & SOARES, F. H. L. “Studies on the performance of the spouted bed dryer for the dehydration of West Indian cherry pulp”. In: DRYING'96 (**Anais**), vol. B, 1996, Poland, p. 865-872.

- ASENJO, J. A.; MUNOZ, R. & PYLE, D. L. "On the transition from a fixed to a spouted bed", *Chem. Eng. Sci.*, 32 (2), p. 109-117, 1977, apud RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. UFSCar - SP, 1993, p.116.
- AYUB, G. E. & ROCHA, S. C. S. "Recobrimento de partículas em leito de jorro bi-dimensional. In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), vol. I, São Carlos-SP, 1992, p. 115-127.
- BARRET, N. & FANE, A. "Drying liquid materials in a spouted bed", In: DRYING'89 (Anais), Canada: Hemisphere, 1989, p. 415-420.
- BARROSO, M. A. S.; DUTRA, C. H. M. C. & MASSARANI, G. "Dinâmica do leito-de-jorro não convencional", In: XI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), vol. I, Rio de Janeiro-RJ, 1983, p. 140-152.
- BECKER, H. A. An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. *Chem. Eng. Sci.*, 13 (4), p. 245-262, 1961 apud HUFENÜSSLER, M. & KACHAN, G. C. **Secagem de purê de banana em um secador de leito com jorro**, 1985, p. 340-354 e MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- BENKRID, A. & CARAM, H. S. Solid flow in the annular region of a spout bed. *AIChE Journal*, nº 8, vol. 35, p. 1328-1336, Agosto, 1989 apud RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. UFSCar - SP, 1993, p.116.
- BERRUTI, F.; MUIR, J. R. & BEHIE, L. A. "Solids circulation in a spout-fluid bed with draft tube", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 66, p. 919-923, 1988.

- BRONOWSKI, A.; VIEIRA, L. C. S. & NASCIMENTO, C. A. O. "Dinâmica de leito de jorro com tubo central: influência da geometria na perda de carga e circulação do material sólido". In: XIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Paulo-SP, 1985, p. 409-419.
- BUCHANAN, R. H. & WILSON, B. The fluid — lift solids recirculators. **Mech. Chem. Eng. Trans.**, vol. I, 1965 apud ZULKE, K. R.; FREIRE, J. T. & GUBULIN, J. C. **Leito de jorro com aeração complementar. Aspectos hidrodinâmicos**. In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, vol. I, 1987, p. 132-140.
- CHOI, M. & MEISEN, A. "Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, vol. 70, 1992.
- CLAFLIN, J. R. & FANE, A. G. "Gas distribution and heat transfer in a draft-tube spouted bed", **AIChE**, Symp. Ser., 241 (80), 17-23, 1984a apud PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. **Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications**. In: DRYING TECHNOLOGY, 1994, p. 351-391.
- CLAFLIN, J. K. & FANE, A. G. Fluid mechanics, heat transfer and drying in spouted beds with draft-tubes, In: DRYING'84, **A. S. Mujumdar, Ed. Hemisphere McGraw-Hill**, New York, NY, p. 137-141, 1984b apud PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. **Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications**. In: DRYING TECHNOLOGY, 1994, p. 351-391.
- CLAFLIN, J. R. & FANE, A. G. "Spouting with a porous draft-tube", **Can. Journal Chem. Eng.**, nº 349, vol. 61, 1983.

- COUCEIRO, E. M. Diversos boletins editados em 1984, Recife-PE, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, apud MARINO NETTO, L. **Acerola — a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S. A., 1986, p. 94.
- COUTINHO, P. L. A. Secagem de soja em leito de jorro. Rio de Janeiro-RJ. **Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ**, 1983 apud ALMEIDA, M. M. **Processamento de urucum em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos**. Campina Grande-PB, p. 94. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — UFPB, 1993.
- DAY, J. Y. Spout voidage distribution and particle circulation rates in spouted beds. **Troy: Rensselaer Polytechnic Institute, Ph.D. Thesis**, 1986 apud WILDHAGEN, G. R. S.; CHARBEL, A. & MASSARANI, G. **Estudo da recirculação e atrição de partículas em leito de jorro**, In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Florianópolis-SC, vol. II, 1994, p. 666-673.
- EPSTEIN, N.; LIN, C. J. & MATHUR, K. B. Data and models for flow distribution and pressure drop in spouted beds, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 56: 436-447, 1978 apud GIUDICI, R.; CHIAPPETTA, A. & NASCIMENTO, C. A. O. **Perda de carga em leito com jorro modificado**. In: XI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, Rio de Janeiro-RJ, vol. I, 1983, p. 128-139.
- FERNANDES, E. G. & MASSARANI, G. "Nota sobre a secagem de politereftalato de etileno em leito de jorro". In: XVI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Petrópolis-RJ, 1988, p. 394-398.

- FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C.; BORGES, S. M. & MAGALHÃES, M. H. A. **Manual para normalização de publicações técnico-científicas**. Belo Horizonte-MG: Editora UFMG, 1990, p. 168.
- FREIRE, J. T. **Secador de sangue em leito de jorro**. São Carlos-SP: Departamento de Engenharia Química/UFSCar, 1984 (Relatório interno da área de Sistemas Particulados) apud GUBULIN, J. C. & FREIRE, J. T. **Secagem de pastas e similares em leito de jorro: testes de secagem e estudos hidrodinâmicos globais em escala piloto**. In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), São Carlos-SP, vol. I, 1989, p. 203-213.
- GIUDICI, R.; CHIAPPETTA, A. & NASCIMENTO, C. A. O. "Perda de carga em leito com jorro modificado". In: XI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Rio de Janeiro-RJ, vol. I, 1983, p. 128-139.
- GORSHTAIN, A. E. & SOROKO, V. E. Piezoelectric method of studying a suspended layer. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Tekhnol.*, nº 1, p. 137, 1964 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- GORSHTAIN, A. E. & MUKHLENOV, I. P. The movement of solid material in the spouting bed. *Zh. Prikl. Khim.*, 40, 2469, Leningrad, 1967 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- GRBAVCIC, A. B.; VUKOVIC, D. U. & ZDANSKI, F. K. Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, vol. 54, p. 33, 1976 apud RÉ, M. I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado, 1986, p. 89.

GUBULIN, J. C. Aeração da região anular do leito de jorro. Algumas técnicas para melhorar o transporte de calor e massa. **Relatório Interno do Grupo de Sistemas Particulados do DEQ/UFSCar**, São Carlos-SP, SP-01: 03/86, 1986 apud ZULKE, K. R.; FREIRE, J. T. & GUBULIN, J. C. **Leito de jorro com aeração complementar. Aspectos hidrodinâmicos.** In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. I, 1987, p. 132-140.

GUBULIN, J. C. & FREIRE, J. T. "Secagem de pastas e similares em leito de jorro: testes de secagem e estudos hidrodinâmicos globais em escala piloto". In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Carlos-SP, vol. I, 1989, p. 203-213.

HUFENÜSSLER, M. & KACHAN, G. C. "Secagem de purê de banana em um secador de leito com jorro". In: XIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Paulo-SP, vol. II, 1985, p. 340-354.

KACHAN, G. C. & CHIAPPETTA, E. "Desidratação de pasta de tomate em um secador de leito com jorro". In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (**Anais**). "A engenharia química em tempo de mudanças", vol. II, 1988, p. 510-523.

KEAIRNS, D. L. & YANG, W. C. Studies on the solid circulation rate and gas bypassing in spouted fluid-bed with a draft-tube. **Can. Journal Chem. Eng.**, vol. 61, nº 349, 1983 apud ZULKE, K. R.; FREIRE, J. T. & GUBULIN, J. C. **Leito de jorro com aeração complementar. Aspectos hidrodinâmicos.** In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, vol. I, 1987, p. 132-140.

- KMIEC, A. The minimum spouting velocity in conical beds. **Can. Journal Chem. Eng.**, vol. 61, p. 274, 1983 apud RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1993, p. 116.
- LAMA, R. F.; MADONNA, L. A. & BRISSON, W. L. Solids-air jets, **Brit. Chem. Eng.**, vol. 6, p. 524, 1961 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- LEFROY, G. A. & DAVIDSON, J. F. "The mechanics of spouted beds", **Trans. Int. Chem. Eng.**, vol. 47, p. 120, 1969.
- LEITE, A. C. B.; WODTKE, R. M. P.; LISBOA, A. C. L. & RESTINI, F. "Pirólise de finos de xisto em reator de leito de jorro". In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (**Anais**), Campinas-SP, vol. I, 1984, p. 248-261.
- LIMA, M. F. M.; SOUZA, F. M. F. & ALSINA, O. L. S. "Influência da vazão do ar e carga de inerte na taxa de circulação de sólidos no leito do jorro". In: 43ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC (**Anais**), Rio de Janeiro-RJ, vol. 43, 1991a, p. 97-98.
- LIMA, M. F. M.; SOUZA, F. M. F. & ALSINA, O. L. S. "Secagem de polpa de umbu em leito de jorro — Variáveis fluidodinâmicas do leito". In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), UNICAMP, Campinas-SP, vol. I, 1991b, p. 367-377.
- LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande-PB. p. 132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

- LIMA, M. F. M. & ALSINA, O. L. S. "Dehydration of umbu pulp in spouted bed. Thermal studies". In: CONGRESSO EUROPEO DE FLUIDIZACIÓN (Anais V), Las Palmas de Gran Canaria, 1994, p. 299-308.
- LIMA, M. F. M.; SANTOS, E. M. B. D.; CARVALHO, L. P.; COSTA, F. A.; SANTOS, C. I. & LIMA, L. M. O. "Influência das variáveis operacionais na desidratação da polpa de seriguela em leito de jorro". In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS - antigo ENEMP (Anais), Maringá-PR, 1995, p. 147-152.
- LISBOA, A. C. L.; GAIÃO, U. & SOUZA, E. J. J. "Desenvolvimento de uma unidade piloto para pirólise de finos de xisto em leito de jorro". In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Uberlândia-MG, 1987, p. 712-725.
- LISBOA, A. C. L. "Leito em jorro: um método adequado para processamento de finos de materiais carbonosos". In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (Anais) — "A engenharia química em tempo de mudanças", vol. II, 1988, p. 470-479.
- MALEK, M. A. & LU, B. C. Y. Pressure drop and spoutable bed height in spouted beds. In: **Eng. Chem. Process Des. Develop.**, 4, 123, 1965 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.

- MANN, U. & CROSBY, E. J. Cycle-time distribution measurements in spouted beds. **Can. Journal Chem. Eng.**, 53: 579-583, 1975 apud GIUDICI, R.; CHIAPPETTA, A. & NASCIMENTO, C. A. O. **Perda de carga em leito com jorro modificado**. In: XI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Rio de Janeiro-RJ, vol. I, 1983, p. 128-139 e BRONOWSKI, A.; VIEIRA, L. C. S. & NASCIMENTO, C. A. O. **Dinâmica de leito de jorro com tubo central: influência da geometria na perda de carga e circulação do material sólido**. In: XIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Paulo-SP, 1985, p. 409-419.
- MARINO NETTO, L. **Acerola — a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S. A., 1986, p. 94.
- MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- MATHUR, K. B. & GISHLER, P. E. A technique for contacting gases with coarse solid particles, **American International Chemical Engineering Journal**, vol. I, nº 2, p. 157-164, 1955 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- MELLO, M. V. D. & GUBULIN, J. C. "Estudo de parâmetros de projeto de um leito de jorro utilizando como fluido a água". In: XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Ouro Preto-MG, vol. I, 1993, p. 125-136.
- MIKHAILIK, V. D. & ANTANISHIN, M. V. The speed of particles and voidage in the core of the spouting bed. **Vesti Akad. Nauk. BSSR Ser. Fiz. Tankhn. Nauk.**, nº 3, 81, 1967 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.

- MUJUMDAR, A. S. "Spouted bed technology — a brief review". In: X ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Carlos-SP, vol. A, 1982.
- MUJUMDAR, A. S. Spouted bed technology — a brief review. In: DRYING'84, **A. S. Mujumdar, Ed. Hemisphere McGraw-Hill**, New York, NY, p. 151-157, 1984 apud PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. "Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications". In: DRYING TECHNOLOGY (**Anais**), 1994, p. 351-391.
- MUJUMDAR, A. S. "Spouted beds: principles and recent developments", In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. I, p. 3-13, 1989.
- OCHOA-MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G. & NIRANJAN, K. "Spouted bed dryer for liquid foods", **Food Control**, nº 1, vol. 4, p. 41-45, 1993.
- OGINO, F.; ZHANG, L. & MAHASHI, Y. "Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed", **Inter. Chem. Eng. of Japan**, vol. 33 (2), p.265-272, 1993.
- OJALVO, J. R. O. & GUBULIN, J. C. **Leito de jorro de geometria retangular: Aspectos hidrodinâmicos**. São Carlos-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1989 apud MELLO, M. V. D. & GUBULIN, J. C. **Estudo de parâmetros de projeto de um leito de jorro utilizando como fluido a água**. In: XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Ouro Preto-MG, vol. I, 1993, p. 125-136.

- OLIVEIRA, I. M. & PASSOS, M. L. "Simulação da secagem de suspensões em leito de jorro cônico com inertes". In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Florianópolis-SC, 1994, p. 702-711.
- OLIVEIRA, W. P. & FREIRE, J. T. "Análise comparativa do revestimento de partículas: método convencional com o processo em leito de jorro". In: XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Ouro Preto-MG, vol. II, 1993, p. 555-562.
- PALLAI, I. & NÉMETH, J. "Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram". In: INT. CONGR. CHEM. ENG. (CHISA), Prague, 3rd, Setembro, paper n^o c2.4, **Czechoslovak Society for Industrial Chemistry**, 1969 apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & RAGHAVAN, V. G.S. Spouted beds for drying: principles and design considerations. In: ADVANCES IN DRYING, vol. IV, **A. S. Mujumdar, Ed. Hemisphere Publishing Corp.**, New York, NY, pp. 359-398, 1987 apud PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. **Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications**. In: DRYING TECHNOLOGY (**Anais**), 1994, p. 351-391.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & RAGHAVAN, V. G. S. "Dinâmica do leito de jorro fluidizado bidimensional". In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Carlos-SP, vol. I, 1989.

PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & RAGHAVAN, V. G. S. Design parameters for a two dimensional spouted bed. In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPOUTED BEDS (**Anais**), Vancouver, BC, 1991 apud PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. **Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications**. In: DRYING TECHNOLOGY (**Anais**), 1994, p. 351-391.

PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. & MASSARANI, G. "Scale-up of spouted bed dryers: criteria and applications". In: DRYING TECHNOLOGY (**Anais**), 1994, p. 351-391.

PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C. G. J. & SCHNEIDER, T. Spouting behaviour of wet solids. In: DRYING' 86 (**Anais**), vol. 1, 1986 apud RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos-SP. p. 116. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1993.

PAVARINI, P. J. **Granulação de rocha fosfática em leito de jorro**. São Carlos-SP. p. 118. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1987.

PEREIRA, N. C. & REBOLA, P. "Secagem de soja em leito de jorro". In: XII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. II, 1984, p. 73-87.

PHAM, Q. T. "Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, n^o 6, vol. 61, p. 426-434, 1983.

- RÉ, M. I. & FREIRE, J. T. "Secagem de sangue animal em leito de jorro".
In: XIV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS
(Anais), Campinas-SP, 1986, p. 187-198.
- RÉ, M. I. **Secagem de sangue animal em leito de jorro**. São Carlos-SP.
p. 89. Dissertação de Mestrado, 1986.
- REGER, E. O.; ROMANKOV, P. G. & RASHKOVSKAYA, N. B. Drying of paste-
like materials on inert bodies in a spouting bed, 1967 apud LIMA, M. F. M.
**Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos
fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande-PB. p. 132. Dissertação
(Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.
- REYES, A. E. & MASSARANI, G. "Evaluacion del secado de pastas en un
lecho de chorro conico". In: XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM
MEIOS POROSOS (Anais), Ouro Preto-MG, vol. II, 1993, p. 479-487.
- REYES, A. E., "Fluidinamica en lecho de chorro conico y semi-conico". In: XXII
ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais),
Florianópolis-SC, vol. I, 1994, p. 346-353.
- ROCHA, S. C. S. & TARANTO, O. P. "Fluidodinâmica do leito de jorro bi-
dimensional para partículas não esféricas". In: IX CONGRESSO
BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Salvador-BA, vol. I, 1992,
p. 117-126.
- RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro
com partículas inertes**. São Carlos-SP. p. 116. Dissertação (Mestrado
em Engenharia Química), UFSCar, 1993.

SAMPAIO, L. Dinâmica do leito de jorro. Rio de Janeiro-RJ: Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, 1978 apud LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande-PB. p. 132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

SAMPAIO, L.; LOPES, M. F.; HERNANDEZ, P. E. & ALVES, T. L. "Apreciações relativas à dinâmica do leito de jorro cônico convencional e modificado". In: XII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. I, 1984, p. 218-235.

SCHNEIDER, T. & BRIDGWATER, J. In: DRYING'89. Ed. by A. S. MUJUMDAR, Mc Gill University, Canadá: Hemisphere, p. 421-425, 1989 apud LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande-PB. p. 132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

SILVA, E. L. & FREIRE, J. T. "Hidrodinâmica e transferência de calor em leito de jorro convencional e com tubo draft". In: XIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Paulo-SP, 1985, p. 383-407.

SILVA, O. S. **Comportamento fluidodinâmico em leito de jorro constituído por mistura de partículas**. Campina Grande-PB. p. 77. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1996.

SILVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, W. P. & FREIRE, J. T. "Parâmetros globais do leito de jorro: queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo". In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Florianópolis-SC, vol. II, 1994, p. 746-754.

- SOUZA Jr., L. M.; OLIVEIRA, I. M. & PASSOS, M. L. "Estudo das variáveis dinâmicas do leito de jorro cônico: comparação de modelos". In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Florianópolis-SC, vol. I, 1994, p. 360-370.
- SOUZA, C. A. G. & KIECKBUSCH, T. G. "Leito de jorro — vibrado bidimensional: estudos preliminares da dinâmica das partículas". In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Florianópolis-SC, vol. II, 1994, p. 763-768.
- SZENTMARJAY, T.; SZALAY, A.; PALLAI, E. & ORMÓS, Z. "Study of drying process on inert particles in a mechanically spouted bed drier". In: DRYING'91, edited by **A. S. Mujumdar & I. Filková Elsevier Science Publishers**, Amsterdam, 1991, p. 334-342.
- TARANTO, O. P. Estudo experimental da fluidodinâmica em um leito de jorro bi-dimensional: Aplicação em recobrimento de comprimidos. Campinas-SP. Dissertação (Mestrado), UNICAMP, 1992 apud AYUB, G. E. & ROCHA, S. C. S. **Recobrimento de partículas em leito de jorro bi-dimensional**. In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. I, São Carlos-SP, 1992, p. 115-127.
- THORLEY, B.; MATHUR, K. B.; KLASSEN, J. & GISHLER, P. E. The effect of design variables on flow characteristics in a spouted bed, **Rep. Nat. Res. Council of Can.**, Ottawa, 1955 apud LIMA, M. F. M. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande-PB. p. 132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992 e RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos-SP. p. 116. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1993.

- THORLEY, B.; SAUNBY, J. B.; MATHUR, K. B. & OSBERG, G. L. An analysis of air and solid flow in a spouted wheat bed, **Can. Journal Chem. Eng.**, vol. 37, p. 184, 1959 apud RODRIGUES, C. C. **Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes**. São Carlos-SP. p. 116. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSCar, 1993 e MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974, p. 303.
- WILDHAGEN, G. R. S.; CHARBEL, A. & MASSARANI, G. "Estudo da recirculação e atrição de partículas em leito de jorro". In: XXII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Florianópolis-SC, vol. II, 1994, p. 666-673.
- WU, S. W. M.; LIM, C. J. & EPSTEIN, N. Hydrodynamics of spouted beds at elevated temperatures, **Chem. Eng. Commun.**, 62, p. 251-268, 1987 apud CHOI, M. & MEISEN, A. **Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds**, The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 70, 1992.
- ZULKE, K. R.; FREIRE, J. T. & GUBULIN, J. C. "Leito de jorro com aeração complementar. Aspectos hidrodinâmicos". In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), vol. I, 1987, p. 132-140.

APÊNDICES

APÊNDICE A

- Valores obtidos experimentalmente para a obtenção das curvas características de queda de pressão, com variação crescente e decrescente da velocidade do ar.
- Efeito da altura do leito nos parâmetros fluidodinâmicos.
- Comparação dos dados fluidodinâmicos experimentais com correlações matemáticas.

TABELA A.1- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,51	54,26
0,08	87,52	0,46	52,52
0,13	140,04	0,44	50,76
0,17	248,57	0,42	50,76
0,21	404,36	0,41	52,52
0,24	476,13	0,37	59,52
0,30	218,81	0,34	54,26
0,34	210,06	0,30	49,01
0,40	133,04	0,25	45,51
0,42	59,52	0,21	42,01
0,51	54,26	0,17	36,76
—	—	0,13	29,76
—	—	0,08	24,51
—	—	0,04	10,50
—	—	0,00	0,00

TABELA A.2- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=2$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,56	84,90
0,05	25,38	0,53	80,52
0,08	59,52	0,51	77,90
0,13	108,53	0,46	75,27
0,17	182,92	0,42	73,52
0,21	266,95	0,40	70,02
0,25	385,11	0,38	78,77
0,30	509,39	0,34	74,40
0,34	643,30	0,30	68,27
0,38	744,83	0,24	61,27
0,56	84,90	0,20	52,52
—	—	0,15	44,64
—	—	0,13	36,76
—	—	0,08	22,76
—	—	0,04	14,88
—	—	0,00	0,00

TABELA A.3- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=3$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,62	91,02
0,05	28,88	0,59	86,65
0,09	73,52	0,55	81,40
0,14	119,03	0,50	76,15
0,18	195,18	0,46	72,64
0,22	286,20	0,42	69,14
0,25	380,73	0,39	77,90
0,30	512,89	0,34	70,89
0,34	638,05	0,29	63,02
0,38	742,20	0,25	55,14
0,42	766,71	0,20	49,89
0,62	91,02	0,17	43,76
—	—	0,13	36,76
—	—	0,07	28,01
—	—	0,04	15,75
—	—	0,00	0,00

TABELA A.4- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=18,0 cm e $M_p/M_i=5\%$.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,72	115,53
0,06	28,01	0,68	108,53
0,08	56,02	0,63	103,28
0,13	91,02	0,59	98,03
0,17	150,54	0,55	91,02
0,21	236,32	0,51	87,52
0,25	316,84	0,46	80,52
0,30	437,62	0,42	75,27
0,34	528,64	0,39	73,52
0,38	651,18	0,38	80,52
0,42	736,95	0,33	73,52
0,47	796,47	0,29	68,27
0,55	803,47	0,25	57,77
0,72	124,28	0,21	49,01
—	—	0,17	42,01
—	—	0,13	36,76
—	—	0,08	29,76
—	—	0,04	17,51
—	—	0,00	0,00

TABELA A.5- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=0$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,80	147,04
0,06	28,01	0,78	101,53
0,08	56,02	0,76	99,78
0,13	91,02	0,71	96,28
0,17	147,04	0,68	91,02
0,21	231,06	0,63	85,77
0,25	330,84	0,59	82,27
0,30	420,11	0,55	78,77
0,34	521,64	0,52	89,27
0,38	549,65	0,50	91,02
0,40	507,64	0,46	87,52
0,42	476,13	0,42	82,27
0,47	428,87	0,38	73,52
0,53	309,83	0,34	66,52
0,56	267,82	0,30	61,27
0,61	229,31	0,25	56,02
0,63	220,56	0,21	49,01
0,68	197,80	0,17	43,76
0,73	178,55	0,12	35,01
0,76	161,04	0,08	29,76
0,80	147,04	0,03	14,00
—	—	0,00	0,00

TABELA A.6- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=2$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	1,06	143,54
0,05	27,13	1,00	137,41
0,08	63,89	0,97	131,29
0,13	112,91	0,93	126,03
0,17	180,30	0,89	121,66
0,21	298,46	0,84	119,91
0,25	428,87	0,73	106,78
0,30	566,28	0,68	100,65
0,34	701,07	0,63	95,40
0,38	834,98	0,59	91,02
0,42	996,02	0,55	87,52
0,46	1085,30	0,52	97,15
0,51	1206,96	0,46	93,65
0,54	1276,97	0,42	89,27
1,06	143,54	0,38	82,27
—	—	0,34	77,02
—	—	0,30	70,02
—	—	0,25	59,52
—	—	0,21	52,52
—	—	0,17	43,76
—	—	0,13	35,88
—	—	0,08	28,88
—	—	0,00	0,00

TABELA A.7- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=3$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	1,11	158,42
0,08	42,01	1,06	151,42
0,13	93,65	0,98	143,54
0,19	187,30	0,93	133,91
0,22	248,57	0,89	131,29
0,25	353,60	0,84	126,03
0,30	441,12	0,80	124,28
0,34	556,65	0,76	120,78
0,38	680,06	0,71	114,66
0,42	811,35	0,68	109,41
0,46	897,12	0,63	105,03
0,51	1011,78	0,59	97,15
0,55	993,40	0,55	94,52
0,59	1073,04	0,51	86,65
0,64	1091,42	0,46	83,15
0,70	1071,29	0,44	87,52
1,11	158,42	0,41	84,02
—	—	0,36	75,27
—	—	0,33	68,27
—	—	0,30	61,27
—	—	0,24	54,26
—	—	0,21	49,01
—	—	0,17	40,26
—	—	0,13	36,76
—	—	0,08	28,88
—	—	0,04	19,26
—	—	0,00	0,00

TABELA A.8- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=23,0$ cm e $M_p/M_i=5$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,77	117,28
0,03	21,88	0,72	114,66
0,08	63,89	0,68	111,16
0,13	112,03	0,63	105,90
0,17	188,18	0,59	101,53
0,21	288,83	0,55	98,03
0,25	425,37	0,51	95,40
0,30	526,02	0,46	107,66
0,34	659,93	0,41	96,28
0,38	751,83	0,38	88,40
0,42	845,48	0,34	85,77
0,46	902,37	0,30	92,78
0,77	117,28	0,25	69,14
—	—	0,21	59,52
—	—	0,17	50,76
—	—	0,13	41,14
—	—	0,08	28,88
—	—	0,04	18,38
—	—	0,00	0,00

TABELA A.9- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: H=28,0 cm e $M_p/M_i=0$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	1,06	133,04
0,08	80,52	1,01	133,04
0,13	150,54	0,97	129,54
0,17	245,07	0,93	127,78
0,21	353,60	0,89	122,53
0,25	518,14	0,84	120,78
0,30	687,94	0,80	117,28
0,34	871,74	0,76	110,28
0,38	1027,53	0,72	106,78
0,46	1223,58	0,68	108,53
0,48	1402,13	0,65	122,53
1,06	133,04	0,62	120,78
—	—	0,59	113,78
—	—	0,55	106,78
—	—	0,51	101,53
—	—	0,46	94,53
—	—	0,41	85,77
—	—	0,38	80,52
—	—	0,34	73,52
—	—	0,29	66,52
—	—	0,24	57,77
—	—	0,21	50,76
—	—	0,17	43,76
—	—	0,13	36,76
—	—	0,08	31,51
—	—	0,04	14,00
—	—	0,00	0,00

TABELA A.10- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=28,0$ cm e $M_p/M_i=2$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,97	138,29
0,08	67,39	0,93	131,29
0,13	112,91	0,89	129,54
0,17	173,30	0,84	129,54
0,21	245,07	0,80	123,41
0,25	361,47	0,76	119,91
0,30	483,13	0,72	119,91
0,34	615,29	0,68	117,28
0,38	742,20	0,63	114,66
0,42	867,36	0,60	110,28
0,46	1019,65	0,54	121,66
0,51	1123,81	0,51	112,03
0,55	1265,60	0,46	107,65
0,74	1233,21	0,41	98,90
0,97	138,29	0,38	91,02
—	—	0,33	82,27
—	—	0,30	75,27
—	—	0,25	66,52
—	—	0,21	58,64
—	—	0,17	49,01
—	—	0,13	38,51
—	—	0,08	30,63
—	—	0,04	14,88
—	—	0,00	0,00

TABELA A.11- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=28,0$ cm e $M_p/M_i=3$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	0,97	159,29
0,05	30,63	0,93	141,79
0,08	62,14	0,89	139,16
0,13	101,53	0,84	135,66
0,17	167,17	0,80	129,54
0,21	238,94	0,76	125,16
0,25	364,97	0,72	124,28
0,30	484,88	0,68	121,66
0,34	624,92	0,63	119,03
0,38	756,21	0,59	120,78
0,42	895,37	0,55	121,66
0,46	1168,44	0,51	117,28
0,55	1254,22	0,46	110,28
0,97	159,29	0,42	96,28
—	—	0,38	91,90
—	—	0,33	84,02
—	—	0,30	75,27
—	—	0,25	66,52
—	—	0,21	56,89
—	—	0,17	47,26
—	—	0,13	39,39
—	—	0,08	29,76
—	—	0,04	12,25
—	—	0,00	0,00

TABELA A.12- Valores de queda de pressão obtidos nas velocidades crescente e decrescente do ar: $H=28,0$ cm e $M_p/M_i=5$ %.

VELOCIDADE CRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)	VELOCIDADE DECRESCENTE (m/s)	ΔP (kgf/m ²)
0,00	0,00	1,10	164,54
0,06	47,26	1,06	161,04
0,08	80,52	1,01	154,04
0,13	138,29	0,97	143,54
0,17	220,56	0,93	138,29
0,21	334,34	0,89	136,54
0,25	451,62	0,84	133,04
0,30	647,68	0,80	127,78
0,34	777,21	0,76	122,53
0,38	936,51	0,72	117,28
0,42	1052,04	0,68	113,78
0,46	1104,55	0,63	108,53
0,48	1153,56	0,62	106,78
0,51	1213,08	0,59	105,03
0,58	1262,10	0,57	122,53
1,10	164,54	0,53	113,78
—	—	0,46	108,53
—	—	0,42	99,78
—	—	0,38	91,02
—	—	0,34	82,27
—	—	0,29	71,77
—	—	0,25	64,77
—	—	0,21	57,77
—	—	0,17	49,01
—	—	0,12	40,26
—	—	0,07	29,76
—	—	0,04	17,51
—	—	0,00	0,00

TABELA A.13- Efeito da altura do leito de inertes sobre os parâmetros fluidodinâmicos com e sem polpa de acerola.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	ΔP _M (kgf/m ²)	ΔP _{jm} (kgf/m ²)	U _{jm} (m/s)
18	0	476,13	50,76	0,42
	2	744,83	70,02	0,40
	3	766,71	69,14	0,42
	5	803,47	73,52	0,39
23	0	549,65	78,77	0,55
	2	1276,97	87,52	0,55
	3	1091,42	83,15	0,46
	5	902,37	95,40	0,51
26	0	862,98	92,78	0,65
	2	1377,63	101,53	0,57
	3	1298,86	118,16	0,57
	5	—	—	—
28	0	1402,13	106,78	0,72
	2	1265,60	110,28	0,60
	3	1254,22	119,03	0,63
	5	1262,10	105,03	0,59
30	0	1152,69	107,66	0,70
	2	1283,98	105,03	0,63
	3	—	—	—
	5	—	—	—

TABELA A.14- Valores da queda de pressão máxima de jorro experimentais e calculados através de correlações matemáticas.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	ΔP_M (kgf/m ²)			
		VALOR PRÁTICO	THORLEY et al. (1959)	ASENJO et al. (1977)	OGINO et al. (1993)
18	0	476,13	110,71	367,28	57,75
	2	744,83			
	3	766,71			
	5	803,47			
23	0	549,65	141,46	452,52	78,78
	2	1276,97			
	3	1091,42			
	5	902,37			
26	0	862,98	159,91	500,64	94,69
	2	1377,63			
	3	1298,86			
	5	—			
28	0	1402,13	172,21	531,52	105,82
	2	1265,60			
	3	1254,22			
	5	1262,10			
30	0	1152,69	184,51	561,48	117,36
	2	1283,98			
	3	—			
	5	—			

TABELA A.15- Valores da queda de pressão de jorro mínimo experimentais e calculados através de correlações matemáticas.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	ΔP_{jm} (kgf/m ²)			
		VALOR PRÁTICO	MALEK et al. (1965)	LEFROY & DAVIDSON (1969)	SAMPAIO (1978)
18	0	50,76	26,95	70,48	73,80
	2	70,02			
	3	69,14			
	5	73,52			
23	0	78,77	48,13	90,05	94,31
	2	87,52			
	3	83,15			
	5	95,40			
26	0	92,78	61,70	101,80	106,61
	2	101,53			
	3	118,16			
	5	—			
28	0	106,78	70,75	109,63	114,81
	2	110,28			
	3	119,03			
	5	105,03			
30	0	107,66	79,80	117,46	123,01
	2	105,03			
	3	—			
	5	—			

TABELA A.16- Valores da velocidade de jorro mínimo experimentais e calculados através de correlações matemáticas.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	U _m (m/s)			
		VALOR PRÁTICO	MATHUR & GISHLER (1955)	WU et al. (1987)	CHOI & MEISEN (1992)
18	0	0,42	0,35	0,66	0,52
	2	0,40			
	3	0,42			
	5	0,39			
23	0	0,55	0,40	0,73	0,57
	2	0,55			
	3	0,46			
	5	0,51			
26	0	0,65	0,42	0,76	0,59
	2	0,57			
	3	0,57			
	5	—			
28	0	0,72	0,44	0,79	0,61
	2	0,60			
	3	0,63			
	5	0,59			
30	0	0,70	0,45	0,81	0,62
	2	0,63			
	3	—			
	5	—			

APÊNDICE B

- Valores da massa coletada na tomada de amostra, correspondentes ao anel de amostragem
- Dados calculados da taxa de circulação total de sólidos
- Comparação dos valores da taxa de circulação total de sólidos, calculados a partir de dados experimentais e através de correlações matemáticas

TABELA B.1-Valores da massa coletada na tomada de amostra,
correspondentes ao anel de amostragem: H=18,0 cm e
 $M_p/M_i = 0 \%$.

U/U_{jm}	DISTÂNCIA RADIAL (m) x 10^2	W_{pm1} (kg/s) x 10^3	W_{pm2} (kg/s) x 10^3	W_{is1} (kg/s) x 10^3	W_{is2} (kg/s) x 10^3	W_i (kg/s) x 10^3
1,2	1,67	0,069	0,094	0,403	0,549	0,476
	5,01	0,173	0,264	4,042	6,168	5,105
	8,35	0,277	0,287	12,943	13,411	13,177
	11,69	0,361	0,357	25,304	25,023	25,164
	14,86	0,307	0,270	27,058	23,797	25,428
1,3	1,67	0,048	0,066	0,280	0,385	0,333
	5,01	0,148	0,168	3,458	3,925	3,692
	8,35	0,266	0,241	12,429	11,261	11,845
	11,69	0,432	0,308	30,280	21,589	25,934
	14,86	0,521	0,523	45,919	46,096	46,008
1,4	1,67	0,041	0,053	0,239	0,310	0,274
	5,01	0,114	0,138	2,663	3,224	2,944
	8,35	0,360	0,285	16,822	13,317	15,070
	11,69	0,419	0,474	29,369	33,224	31,296
	14,86	0,519	0,590	45,743	52,001	48,872
1,5	1,67	0,072	0,082	0,421	0,479	0,450
	5,01	0,201	0,116	4,696	2,710	3,703
	8,35	0,250	0,311	11,682	14,532	13,107
	11,69	0,311	0,465	21,799	32,593	27,196
	14,86	0,355	0,416	31,288	36,665	33,976

TABELA B.2- Valores da massa coletada na tomada de amostra, correspondentes ao anel de amostragem: $H=18,0$ cm e $M_p/M_i=5$ %.

U/U_{jm}	DISTÂNCIA RADIAL (m) $\times 10^2$	W_{pm1} (kg/s) $\times 10^3$	W_{pm2} (kg/s) $\times 10^3$	W_{ls1} (kg/s) $\times 10^3$	W_{ls2} (kg/s) $\times 10^3$	W_i (kg/s) $\times 10^3$
1,2	1,67	0,212	0,241	1,238	1,407	1,322
	5,01	0,372	0,322	8,691	7,523	8,107
	8,35	0,177	0,093	8,271	4,346	6,308
	11,69	0,021	0,059	1,472	4,136	2,804
	14,86	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,3	1,67	0,194	0,224	1,133	1,308	1,221
	5,01	0,233	0,392	5,444	9,158	7,301
	8,35	0,181	0,278	8,458	12,990	10,724
	11,69	0,216	0,166	15,140	11,636	13,388
	14,86	0,059	0,082	5,200	7,227	6,214
1,4	1,67	0,057	0,111	0,333	0,648	0,491
	5,01	0,153	0,201	3,575	4,696	4,136
	8,35	0,340	0,374	15,887	17,476	16,682
	11,69	0,103	0,202	7,220	14,159	10,690
	14,86	0,453	0,516	39,926	45,478	42,702
1,5	1,67	0,106	0,126	0,619	0,736	0,678
	5,01	0,161	0,144	3,762	3,364	3,563
	8,35	0,164	0,263	7,663	12,289	9,976
	11,69	0,293	0,275	20,537	19,276	19,906
	14,86	0,506	0,486	44,597	42,834	43,716

TABELA B.3- Valores calculados da taxa de circulação total de sólidos.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	U/U _{jm}	W _{ts} (kg/s) x 10 ³
18	0	1,2	69,350
		1,3	87,812
		1,4	98,456
		1,5	78,432
	2	1,2	34,538
		1,3	61,568
		1,4	98,456
		1,5	78,432
	5	1,2	18,541
		1,3	38,848
		1,4	74,701
		1,5	77,839
23	0	1,2	70,593
		1,3	85,893
		1,4	99,399
		1,5	105,948
	2	1,2	68,497
		1,3	74,540
		1,4	86,240
		1,5	81,003

TABELA B.4- Valores da taxa de circulação total de sólidos, calculados a partir de dados experimentais e através de correlações matemáticas:
H=23,0 cm e M_p/M_i=0 %.

U/U _{jm}	W _{ts} (kg/s) x 10 ³	
	VALOR PRÁTICO	REYES (1994)
1,2	70,593	22,52
1,3	85,893	31,50
1,4	99,399	40,48
1,5	105,948	49,46

APÊNDICE C

- Perfis axial e radial de queda de pressão
- Comparação dos valores do diâmetro do jorro, obtidos através dos dados experimentais dos perfis axial e radial de queda de pressão, com os calculados por correlações matemáticas

TABELA C.1- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=0$ %
e $U_j=0,51$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,00	Z/H=2,01	Z/H = 3,33
0,00	63,02	56,23	57,77
0,07	61,27	57,77	57,77
0,14	61,27	57,77	57,77
0,20	60,39	57,77	57,77
0,27	60,39	57,77	57,77
0,34	60,39	57,77	57,77
0,40	60,39	57,77	57,77
0,47	60,39	57,77	57,77
0,54	—	57,77	57,77
0,61	—	57,77	57,77
0,67	—	57,77	57,77
0,71	—	57,77	57,77

TABELA C.2- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=2$ %
e $U_j=0,56$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,00	Z/H=2,01	Z/H = 3,33
0,00	71,77	73,52	75,27
0,07	70,89	72,64	74,39
0,14	70,89	72,64	74,39
0,20	70,89	72,64	74,39
0,27	70,89	72,64	74,39
0,34	70,89	72,64	74,39
0,40	70,02	72,64	74,39
0,47	70,02	72,64	74,39
0,54	—	72,64	74,39
0,61	—	72,64	74,39
0,67	—	72,64	74,39
0,71	—	72,64	74,39

TABELA C.3- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=3$ %
e $U_j=0,62$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,00	Z/H=2,01	Z/H = 3,33
0,00	86,65	112,91	117,28
0,07	84,90	114,66	117,28
0,14	84,90	114,66	117,28
0,20	84,90	114,66	115,53
0,27	84,02	114,66	115,53
0,34	84,02	115,53	114,66
0,40	84,02	115,53	114,66
0,47	—	115,53	114,66
0,54	—	115,53	113,78
0,61	—	115,53	113,78
0,67	—	115,53	113,78
0,71	—	116,41	112,91

TABELA C.4- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=18,0$ cm; $M_p/M_i=5$ %
e $U_j=0,72$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,00	Z/H=2,01	Z/H = 3,33
0,00	96,28	126,04	131,28
0,07	98,20	126,04	129,54
0,14	98,20	126,04	129,54
0,20	93,65	126,04	129,54
0,27	92,78	126,04	129,54
0,34	92,78	126,04	129,54
0,40	94,52	126,04	129,54
0,47	94,52	126,04	129,54
0,54	—	126,04	129,54
0,61	—	126,04	129,54
0,67	—	126,04	129,54
0,71	—	126,04	129,54

TABELA C.5- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm; $M_p/M_i=0$ %
e $U_j=0,80$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,18	Z/H=1,57	Z/H=2,61
0,00	98,03	101,08	107,66
0,07	97,12	101,08	107,66
0,14	97,12	102,13	107,66
0,20	96,28	102,13	107,66
0,27	96,28	102,13	107,66
0,34	96,28	102,13	107,66
0,40	96,28	102,13	107,66
0,47	96,28	102,13	107,66
0,54	96,28	102,13	107,66
0,61	94,52	102,13	107,66
0,67	94,52	102,13	107,66
0,71	94,52	102,13	107,66

TABELA C.6- Perfis axial e radial de queda de pressão: $H=23,0$ cm; $M_p/M_i=2$ %
e $U_j=1,06$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)		
	Z/H=1,18	Z/H=1,57	Z/H=2,61
0,00	128,66	132,16	158,42
0,07	128,66	130,41	158,42
0,14	127,78	130,41	158,42
0,20	127,78	130,41	159,29
0,27	127,78	130,41	159,29
0,34	127,78	129,54	159,29
0,40	127,78	128,66	160,17
0,47	127,78	128,66	161,04
0,54	127,78	127,78	161,04
0,61	127,78	127,78	161,04
0,67	127,78	127,78	161,04
0,71	127,78	127,78	161,04

TABELA C.7- Perfis axial e radial de pressão: $H=28,0$ cm; $M_p/M_i=0$ % e $U_j=1,06$ m/s.

r/R	ΔP (kgf/m ²)	
	Z/H=1,29	Z/H=2,14
0,00	151,42	149,67
0,07	151,42	148,79
0,14	149,67	148,79
0,20	149,67	148,79
0,27	149,67	147,92
0,34	148,79	147,92
0,40	148,79	148,79
0,47	148,79	148,79
0,54	148,79	148,79
0,61	148,79	147,92
0,67	149,67	148,79
0,71	149,67	148,79

TABELA C.8- Valores do diâmetro de jorro, obtidos através dos dados experimentais dos perfis axiais e radiais de queda de pressão e calculados por correlações matemáticas.

H (m) x 10 ²	M _p /M _i (%)	D _j (m)		
		VALOR PRÁTICO	ABDELRAZEK (1969)	LEFROY & DAVIDSON (1969)
18	0	0,06	0,06	0,07
	2	0,12	0,06	0,07
	3	0,10	0,06	0,07
	5	0,06	0,06	0,07
23	0	0,06	0,07	0,07
	2	0,04	0,07	0,07
	3	0,04	0,06	0,07
	5	—	—	—
28	0	0,12	0,07	0,07
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	5	—	—	—