

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

28 10.12 2022

**COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LEITO DE JORRO
CONSTITUÍDO POR MISTURA DE PARTÍCULAS**

OSVALDO SOARES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
ABRIL - 1996

**COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LEITO DE JORRO
CONSTITUÍDO POR MISTURA DE PARTÍCULAS**

OSVALDO SOARES DA SILVA

*Dissertação apresentada ao curso de Pós-
Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADORA: Prof^ª D.Sc. ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA

**CAMPINA GRANDE
1996**



S586c Silva, Osvaldo Soares da
Comportamento fluidodinamico em leito de jorro
constituído por mistura de partículas / Osvaldo Soares da
Silva. - Campina Grande, 1996.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia.

1. Fluidodinamica 2. Fluxo e Mistura de Fluidos 3.
Operacoes Unitarias - 4. Dissertacao I. Alsina, Odelsia
Leonor Sanchez de, Dra. II. Universidade Federal da Paraíba
- Campina Grande (PB) III. Título

CDU 66.021.2(043)

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LEITO DE JORRO
CONSTITUÍDO POR MISTURA DE PARTÍCULAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15 / abril / 1996



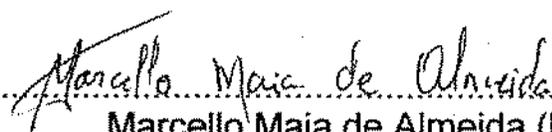
Odelsia Leonor Sánchez de Alsina (D.Sc.)
Orientadora



Florencia C. Menegalli (D.Sc.)
Examinadora



Michel François Fossy (D.Sc.)
Examinador



Marcello Maia de Almeida (M.Sc.)
Examinador

Campina Grande, Abril de 1996

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Pedro Arthur e Maria José.
À Cássia e aos meus irmãos, pelo respeito e admiração.
Com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

À DEUS que nos orienta e nos dá discernimento na escolha do melhor caminho a ser seguido.

À Professora Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, orientadora e amiga, pela compreensão, sugestões e ajuda na minha formação profissional durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Marcello Maia de Almeida pela amizade, companheirismo e contribuição significativa em todas as sugestões na parte experimental e redação da dissertação.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, nas pessoas do Professor Kepler Borges França, Maria José B. Cavalcanti e Maricé P. da Silva pela colaboração e disponibilidade em todos os momentos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À Josilene A. Cavalcante pela amizade e ajuda no desenvolvimento do trabalho experimental.

À turma amiga do "Éramos Seis" : Josy, Christiano, Walter, Fabiana, Koila, Bonádia, Joelma e Gorethe pelos momentos de alegria e do bate-papo saudável.

Aos colegas e amigos do processo de seleção, Verônica, Cilene, Wilton e Miriam pelos momentos de companheirismo nas horas de estudo.

À Nagel por todas as vezes que se mostrou disponível quando consultado.

Aos amigos do Mestrado Wilton, Chico, Djane, Maurício, Lucianna, Verônica, Vera, Lígia e Mérgia que compartilharam comigo dos momentos de descontração, dificuldade e expectativa ao ver a defesa se aproximar.

Aos colegas Carlos, Delba, Lilly, Ilza, Magnus, Baraquízio, Richard e Bruno pela amizade e confiança nos momentos de convivência.

À todos colegas, amigos, Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Química, que de alguma forma deram sua contribuição durante esta longa caminhada.

RESUMO

A importância do conhecimento dos parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro constituído por mistura de partículas é observada em vários processos na indústria química, farmacêutica e tecnologia de alimentos. A desidratação de polpas e suspensões, a obtenção de um concentrado em pó das sementes de urucum (*Bixa Orellana L.*) por atrição em leito de jorro, são exemplos. Quando partículas de diâmetro da ordem de $100\mu\text{m}$, ditas arrastáveis, estão presentes no leito de partículas jorráveis, os mecanismos de circulação são diferentes dos que são descritos para leito de jorro convencional. As partículas jorráveis e parte das arrastáveis circulam no leito e outra parte é arrastada para fora da coluna e recolhida por um ciclone. O resto dos finos fluidizam no topo da região anular. Atualmente, os estudos disponíveis para prever o comportamento destes sistemas são insuficientes. Portanto, estudos adicionais se fazem necessários para uma melhor compreensão e preditibilidade no projeto dessas unidades. Em um trabalho anterior, foi analisado o efeito da presença do pó, obtido por atrição das sementes de urucum, na fluidodinâmica em leito de jorro. No presente trabalho, os resultados são estendidos para diferentes proporções de finos e partículas grossas. Um sistema sintético de farinha de milho e polipropileno foi estudado para efeito de comparação. Uma importante influência da presença dos finos nos parâmetros fluidodinâmicos foi verificada. Através das curvas características foi observado que o $\Delta P_{\text{máx}}$ diminui e o ΔP_{jm} aumenta com o aumento da proporção de finos. Todavia, a U_{jm} não sofre influência com a presença dos finos no leito. Em seguida, os parâmetros fluidodinâmicos foram analisados através de correlações e observou-se que as correlações predizem os valores dos parâmetros dentro do intervalo apresentado pelos dados experimentais, sendo que o ΔP_{jm} apresentou melhores resultados. O diâmetro médio do jorro, calculado a partir dos perfis radiais de pressão e através de correlações, ficou em torno de 5cm.

ABSTRACT

The importance of the knowledge about fluid dynamics of spouted beds constituted by mixture of particles is apparent in a number of process in the chemical pharmaceutical industry and food technology. The dehydration of pulps and suspensions, the obtention of a bixine concentrated powder by attrition of annatto seeds (*Bixa Orellana L.*), are examples. When particles of diameter in the order of $100\mu\text{m}$, whom we will call "entrainable" are present in the bed of spoutables particles, the mechanisms of circulation are different of those in the conventional spouted bed. As the spoutable and a part of the entrainable particles circulate in the bed, an other part of the fines is trained and captured by the cyclone and the rest accumulate fluidizing at the top of the annulus. Although there are some studies about the fluid dynamics of beds with a mixture of particles with diameters of the same magnitude, works about the behavior of these type of systems when constituted by particles with great differences in size, are scarce. In previous work the effect of the presence of the powder, obtained by the attrition of the seeds, over the fluid dynamics of a spouted bed of annatto seeds was analyzed. In this work, the results were extended to different mass ratio of fine to coarse particles. A synthetic system of polypropylene and maize flour was also studied for comparison. An important influence of the fines proportion over the circulation characteristics and fluid dynamics parameters were verified. The characteristics curves were followed by the partial entrainment of the fines. It was observed that the ΔP_{max} is decreased and ΔP_{jm} is augmented with the increasing of the entrainable particles proportion. Nevertheless no influence of the fines over the U_{jm} was detected.

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

- A_c área da seção transversal da coluna, cm^2
- Ar Número de Arquimedes ou Galileu (Ga), $\frac{d_p^3 g \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2}$
- a, b termos da equação (26)
- D_c diâmetro da coluna, (cm)
- D_i diâmetro do orifício de entrada do ar, (cm)
- D_j diâmetro do jorro, (cm)
- d_c diâmetro da menor esfera circunscrita na projeção do grão em repouso, (cm)
- d_i diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do grão em repouso, (cm)
- d_p diâmetro da partícula, (cm)
- d_m diâmetro médio da mistura, (cm)
- g aceleração da gravidade, (981cm/s^2)
- h altura adimensional, $h = H/H_{\text{máx}}$
- H altura do leito, (cm)
- $H_{\text{máx}}$ altura máxima jorrável, (cm)
- m massa de finos arrastada em função do tempo, (g)
- M_g massa do leito, (g)
- M_t massa total de finos arrastada, (g)
- M_i massa de polipropileno, (g)
- $M_{\text{pó}}$ massa de pó (farinha de milho), (g)
- P_1, P_2 pressões no picnômetro de comparação a ar, (cm de Hg)
- r posição radial, (cm)
- R_c raio da coluna, (cm)
- Re_{mf} Número de Reynolds na condição de mínima fluidização
- T_{op} temperatura do ar de operação, ($^{\circ}\text{C}$)
- U velocidade superficial do ar, (m/s)

U_f	velocidade de mínima fluidização das partículas flotáveis, (m/s)
U_M	velocidade de mínima fluidização de uma mistura de partículas, (m/s)
U_p	velocidade de mínima fluidização das partículas imergíveis, (m/s)
U_{mf}	velocidade mínima de fluidização, (m/s)
U_{ju}	velocidade mínima de jorro, (m/s)
U_t	velocidade terminal da partícula, (m/s)
x_i	fração ponderal do polipropileno
$x_{pó}$	fração ponderal da farinha de milho
z	posição axial da sonda de pressão, (cm)
ΔP_{jm}	queda de pressão de jorro mínimo, (Pa)
$\Delta P_{máx}$	queda de pressão máxima, (Pa)
ρ_g	massa específica do ar, (g/cm ³)
ρ_a	massa específica aparente do leito, (g/cm ³)
ρ_m	massa específica da mistura, (g/cm ³)
ρ_c	massa específica real da partícula, (g/cm ³)
ρ_i	massa específica das partículas de polipropileno, (g/cm ³)
$\rho_{pó}$	massa específica das partículas de farinha de milho, (g/cm ³)
ε	porosidade do leito de partículas
ε_m	porosidade da mistura
γ	ângulo de repouso, (°)
ϕ	fator de forma

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).....	11
Tabela 2- Resumo das correlações para o cálculo da máxima altura capaz de jorrar ($H_{máx}$).....	19
Tabela 3- Resumo das correlações para o cálculo da perda de carga máxima ($\Delta P_{máx}$).....	20
Tabela 4- Resumo das correlações para o cálculo da perda de carga de jorro mínimo (ΔP_{jm}).....	21
Tabela 5- Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de jorro (U_{jm}).....	22
Tabela 6- Resumo das correlações para o cálculo do diâmetro do jorro (cm).....	25
Tabela 7 - Caracterização física das partículas jorráveis	26
Tabela 8 - Caracterização física dos finos.....	27
Tabela 9 - Caracterização física do sistema farinha de milho/polipropileno.....	28
Tabela 10 - Distribuição radial de pressão - Condições operacionais	33
Tabela 11 - Diâmetro do jorro determinado por correlações (cm)	56
Tabela 12 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_l = 0,00$).....	68
Tabela 13 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_l = 0,05$).....	69
Tabela 14 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_l = 0,10$).....	70
Tabela 15 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_l = 0,10$).....	71
Tabela 16 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_l = 0,10$) - sem ciclone.....	72

Tabela 17 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,15$)	73
Tabela 18 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,20$)	74
Tabela 19 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,20$)	75
Tabela 20 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,30$)	76
Tabela 21 - Perda de carga máxima ($\Delta P_{m\acute{a}x}$) determinada por correlações e experimentalmente, (Pa)	77
Tabela 22 - Perda de carga de jorro mínimo (ΔP_{jm}) determinada por correlações e experimentalmente, (Pa)	77
Tabela 23 - Velocidade mínima de jorro (U_{jm}) determinada por correlações e experimentalmente, (m/s)	78
Tabela 24 - Velocidade mínima de Fluidização (U_{mf}) determinada por correlações, (m/s)	79
Tabela 25 - Altura máxima jorrável ($H_{m\acute{a}x}$) determinada por correlações, (cm)	79
Tabela 26 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	80
Tabela 27 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	80
Tabela 28 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	81
Tabela 29 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	81
Tabela 30 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	82
Tabela 31 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	82
Tabela 32 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)	83
Tabela 33 - Perfil radial de pressão	83
Tabela 34 - Dados da distribuição granulométrica das partículas arrastáveis por análise de peneiras	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1	Classificação de partículas segundo GELDART (1973)	6
Figura 2. 2	Perda de carga em um leito binário em função da velocidade gás	11
Figura 2. 3	Curva característica genérica em leito de jorro	15
Figura 2. 4	Efeito do diâmetro da partícula na determinação da altura máxima do leito com $D_c = 0,15m$	18
Figura 3. 1	Equipamento Experimental em Leito de Jorro	29
Figura 3. 2	Diagrama Esquemático dos Equipamentos	30
Figura 4.0	Perda de carga em leito fixo em função da velocidade do ar	36
Figura 4. 1	Comportamento de uma curva característica experimental em leito de jorro - $M_{pd}/M_i = 0,10$	37
Figura 4. 2	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna. $M_{pd}/M_i = 0,00$	38
Figura 4. 3	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna. $M_{pd}/M_i = 0,05$	39
Figura 4. 4	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna $M_{pd}/M_i = 0,10$	39
Figura 4. 5	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna $M_{pd}/M_i = 0,15$	40
Figura 4. 6	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna. $M_{pd}/M_i = 0,20$	40
Figura 4. 7	Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade do ar na coluna. $M_{pd}/M_i = 0,30$	41
Figura 4. 8	Velocidade do ar quando ocorre o $\Delta P_{máx}$ em função de M_{pd}/M_i	41
Figura 4. 9	Perda de carga máxima em função de M_{pd}/M_i em função de M_{pd}/M_i	44
Figura 4. 10	Perda de carga de jorro mínimo em função de M_{pd}/M_i	44
Figura 4. 11	Velocidade mínima de jorro em função de M_{pd}/M_i	45

Figura 4. 12 - Perda de carga em leito de jorro (vel. decrescente).....	45
Figura 4. 13 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,05$ (vel. crescente).....	46
Figura 4. 14 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,10$ (vel. crescente).....	47
Figura 4. 15 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,15$ (vel. crescente).....	47
Figura 4. 16 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,20$ (vel. crescente).....	48
Figura 4. 17 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,05$ (vel. decrescente).....	48
Figura 4. 18 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,10$ (vel. decrescente).....	49
Figura 4. 19 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,15$ (vel. decrescente).....	49
Figura 4. 20 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,20$ (vel. decrescente).....	50
Figura 4. 21 - Perda de carga máxima experimental e estimada por correlações. em função de $M_{pó}/M_i$	51
Figura 4. 22 - Perda de carga de jorro mínimo experimental e estimada por correlações. em função de $M_{pó}/M_i$	51
Figura 4. 23 - Velocidade mínima de jorro experimental e estimada por correlações. em função de $M_{pó}/M_i$	52
Figura 4. 24 - Distribuição radial de pressão.....	54
Figura 4. 25 - Distribuição radial de pressão.....	54
Figura 4. 26 - Distribuição radial de pressão.....	55
Figura 4. 27 - Distribuição radial de pressão.....	55
Figura 4. 28 - Distribuição radial de pressão para uma mistura de proporções 0,10 e 0,30. $U = 1,32\text{m/s}$	56
Figura C. 1 - Distribuição granulométrica das partículas arrastáveis por análise de peneiras.....	86

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Classificação de Partículas	5
2.2 - Estado Estacionário de uma Mistura	7
2.3 - Dinâmica em Leito Fixo	8
2.4 - Leito Fluidizado	9
2.4.1 - Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf})	10
2.5 - Leito de Jorro	12
2.6 - Limitações do Leito de Jorro	12
2.7 - Dinâmica do Leito de Jorro	13
2.7.1 - Altura Máxima Jorrável do Leito ($H_{máx}$)	15
2.7.2 - Perda de Carga Máxima ($\Delta P_{máx}$)	19
2.7.3 - Perda de Carga de Jorro Mínimo (ΔP_{jm})	20
2.7.4 - Velocidade Mínima de Jorro (U_{jm})	21
2.8 - Diâmetro do Jorro	24
CAPÍTULO III	26
MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 - Propriedades da Mistura para o Cálculo das Correlações	27
3.2 - Descrição do Equipamento	28
3.3 - Procedimento Experimental	31
3.3.1 - Curvas Características	31
3.3.2 - Cinética de Separação de Finos	32

3.3.3 - Distribuição de Pressão Radial.....	33
CAPÍTULO IV.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 - Dinâmica em Leito Fixo.....	35
4.2 - Comportamento Fenomenológico de Leito de Jorro com Mistura de Partículas.....	36
4.3 - Curvas Características.....	38
4.4 - Efeito da Presença de Finos nos Parâmetros Fluidodinâmicos.....	42
4.5 - Cinética de Arraste de Finos.....	45
4.6 - Comparação dos Resultados Experimentais com as Correlações Propostas.....	50
4.7 - Distribuição de Pressão Radial.....	53
4.7.1 - Diâmetro do Jorro.....	53
CAPÍTULO V.....	57
CONCLUSÕES.....	57
CAPÍTULO VI.....	59
SUGESTÕES.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	60
APÊNDICE A.....	68
APÊNDICE B.....	84
APÊNDICE C.....	86

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A importância do conhecimento dos parâmetros fluidodinâmicos em leitos de jorro constituídos por mistura de partículas é observada em vários processos tecnológicos. Como exemplos temos: desidratação de polpa de frutas (ALSINA et al., 1988, LIMA & ALSINA, 1994), secagem de pastas (KACHAN & CHIAPPETTA 1988, REYES & MASSARANI, 1991), secagem de extratos farmacológicos (RÉ & FREIRE, 1987), recobrimento de comprimidos (SANTANA et al., 1988), processamento de xisto de materiais carbonosos (LISBOA, 1988), produção de um concentrado em pó de bixina pela atrição das sementes de urucum (*Bixa Orellana L.*) (SILVA & ALSINA, 1991; MASSARANI et al., 1992), entre outros. Em todos esses processos, há no leito a presença de partículas com números de Arquimedes bem diferentes, onde umas são jorráveis ($d_p > 1\text{mm}$) e outras arrastáveis ($40 < d_p < 500\mu\text{m}$, ZARZA & LAGUERIE, 1988).

Em seguida são descritos alguns princípios básicos de funcionamento dos processos citados anteriormente:

a) durante o processo de secagem de pastas e suspensões em leito de jorro, as partículas inertes que constituem o leito são cobertas pelo material a ser seco, o qual vai se tornando frágil e quebradiço à medida que é seco pelo ar quente que entra em contato com as partículas. Colisões entre essas partículas permitem que o produto seco desprenda-se do material inerte e seja arrastado pelo fluido para fora do leito. O processo cíclico de deposição, secagem da suspensão e transporte do produto seco, segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), é reproduzido continuamente sempre que a temperatura do leito, para uma dada vazão de alimentação, é mantida suficientemente elevada para que a proporção de partículas molhadas e pegajosas no leito,

em condições estacionárias, seja pequena e o movimento do leito de partículas não seja dificultado pela aglomeração de tais partículas úmidas;

b) a secagem de extratos farmacológicos em secador de leito de jorro, visando garantir degradação mínima de seus princípios ativos já que seu tempo de permanência no secador é pequeno e, portanto, a sua exposição ao calor é mantida durante um intervalo de tempo bastante limitado. Os extratos vegetais, na forma de soluções hidro-alcoólicas, são alimentados na coluna de leito de jorro, formada por material inerte. Após a secagem, o extrato em pó obtido, é recolhido por um ciclone e submetido a testes organolépticos (RÉ & FREIRE, 1987);

c) o estudo do recobrimento de comprimidos em leito de jorro, é feito num sistema experimental, consistindo de um fluxo de gás aquecido que produz o jorro e seca a solução de recobrimento, que reveste a partícula com uma camada delgada através da atomização do líquido de alimentação (SANTANA et al. 1988);

d) a técnica do leito de jorro foi aplicada ao processamento de materiais carbonosos como xisto e carvão, com distribuição granulométrica menor que 10mm. São apresentadas e discutidas aplicações como pirólise, gaseificação e combustão. No processo, o leito de jorro pode operar com ar ou gás de reciclo, vazões de xisto, vazões de gás e diâmetro médio das partículas. A unidade de processamento possui um reator como parte principal. Além do reator, existem outros equipamentos como silos de carga de xisto cru e descarga de xisto retortado, forno para aquecimento do ar/gás de reciclo, ciclone para coleta de finos arrastados e condensadores para coleta de óleo. (LISBÔA, 1988; LISBÔA et al., 1988);

e) no processo de secagem das sementes do urucuzeiro, é obtido um pó com alto teor de bixina, um corante natural. Através da cinética de atrição em leito de jorro, a carga de grãos, colocada na coluna, libera um concentrado em pó que é recolhido por um ciclone acoplado ao secador. (BARRETO et al., 1989; SILVA & ALSINA, 1991);

f) a aplicação do equipamento à granulação consiste em alimentar-se um leito constituído de partículas-semente (material granular inicial, a partir do qual se processa o crescimento) com um líquido bombeável (pasta, fundido ou

suspensão). O mecanismo de granulação que ocorre é a deposição sucessiva de finas camadas do líquido sobre as partículas quando estas passam pela zona de contato gota de líquido-partícula. Esse mecanismo de crescimento produz grânulos bastante esféricos e de estrutura uniforme, como descrito por MATHUR & EPSTEIN (1974). Geralmente, o material granulante é atomizado na base ou no topo do leito e testes posteriores são realizados para determinar a taxa de crescimento dos grânulos, (PAVARINI, 1987).

As informações atualmente disponíveis são insuficientes para prever com certa segurança o comportamento fluidodinâmico destes sistemas; as correlações disponíveis na literatura foram desenvolvidas para sistemas de partículas homogêneas em tamanho, portanto, estudos adicionais são necessários para uma melhor compreensão e preditibilidade no projeto de dessas unidades, onde frequentemente aparecem misturas de partículas com tamanhos bem diferentes.

Há quase uma década trabalha-se com leito de jorro no Laboratório de Meios Porosos e Particulados do Departamento de Engenharia Química da UFPB quando da instalação da primeira unidade, em 1988, com objetivo de realizar estudos de secagem em escala piloto. A partir dessa data, vários projetos foram desenvolvidos dentro dessa linha, como os de desidratação de polpas de frutas e processamento de urucum. Na secagem de urucum em leito de jorro se obtém concomitantemente um subproduto através do mecanismo de atrição, um concentrado em pó, com teores de bixina variando entre 10% a 25%. Foi o interesse nesse subproduto o que nos levou, num projeto anterior, a estudar o comportamento fluidodinâmico das sementes de urucum em leito de jorro, obtendo alguns resultados preliminares sobre o efeito da presença do pó sobre as variáveis características do mesmo.

No presente trabalho, damos continuidade aos estudos iniciados por ALMEIDA (1993), para o sistema binário grãos/pó de urucum, abrangendo faixas mais amplas de condições operacionais. Foram realizados estudos experimentais e estudos através de correlações para o comportamento fluidodinâmico de leito de jorro com misturas de partículas jorráveis e finos arrastados pneumáticamente, com ênfase em um sistema com

características semelhantes de tamanho, densidade e distribuição granulométrica, polipropileno e farinha de milho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente trabalho, utilizou-se uma mistura de partículas classe B (farinha de milho) e D (polipropileno) da classificação de GELDART (1973). Através dos experimentos observou-se o aparecimento de bolhas e a fluidização dos finos na parte superior do leito na região anular, como também um regime de pistonagem e segregação parcial das partículas no leito de jorro. Assim sendo, faz-se necessário um breve resumo do estado atual da arte acerca do comportamento de misturas de partículas em leitos fixo, fluidizado e de jorro.

2.1 - Classificação de Partículas

O comportamento de um leito depende sensivelmente da natureza das partículas que o constitui. GELDART (1973), sugeriu uma classificação de partículas em quatro categorias: A, B, C, e D, como mostra a Figura 2.1. O diagrama para a referida classificação, apresenta algumas modificações com relação às características para a divisão de cada zona, segundo ZENZ(1983).

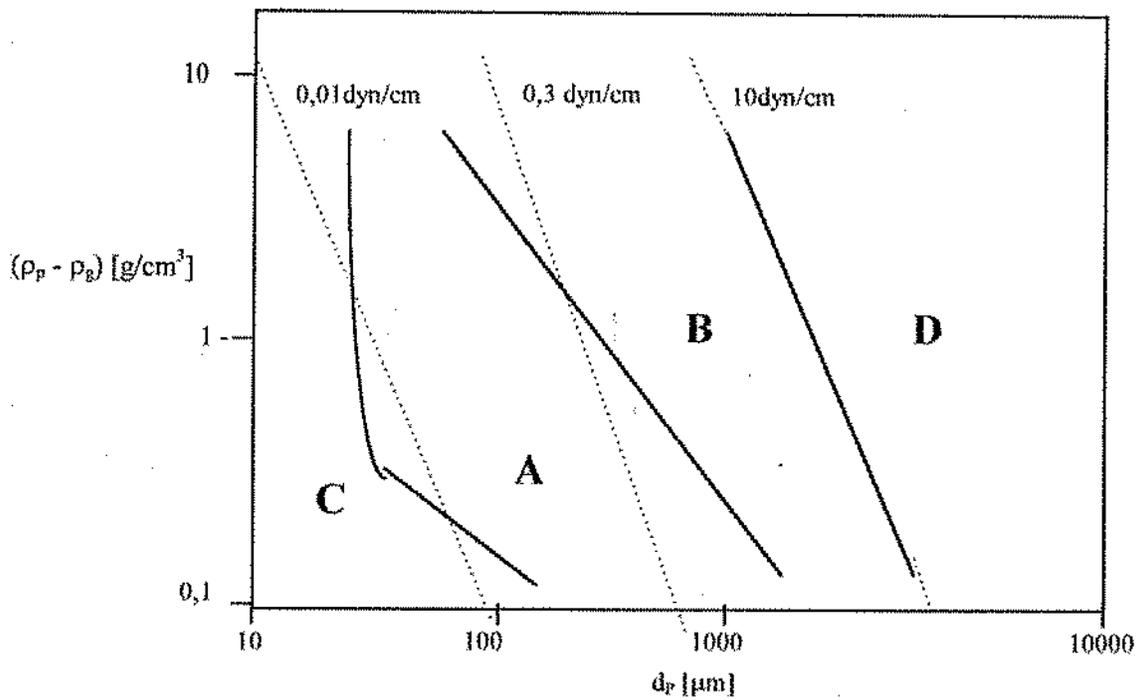


Figura 2.1 — Classificação de partículas segundo GELDART (1973).
 --- Equitensão superficial segundo ZENZ (1983).
 Fonte: ZARZA & LAGUERIE (1988).

CATEGORIA A: São as partículas, para as quais a velocidade mínima de fluidização e a velocidade de aparição das bolhas são diferentes. As características das partículas dessa categoria, são aproximadamente as seguintes.

$$\rho_p < 1,4\text{g/cm}^3 \quad \text{e} \quad 20\mu\text{m} < d_p < 100\mu\text{m}$$

CATEGORIA B : São os materiais para os quais a velocidade mínima de fluidização e velocidade mínima de aparição das bolhas se confundem. Ou seja, as bolhas se iniciam à velocidade mínima de fluidização ou ligeiramente acima. Suas características são:

$$1,4\text{g/cm}^3 < \rho_p < 4,0\text{g/cm}^3 \quad \text{e} \quad 40\mu\text{m} < d_p < 500\mu\text{m}$$

A curva do diagrama de Geldart separando as zonas A e B é dada pela equação:

$$(\rho_p - \rho_g).d_p = 225 \text{ (g/cm}^3\text{)}. \mu\text{m}$$

CATEGORIA C : Os pós do tipo C caracterizam-se por sua forte tendência à aglomeração. As partículas possuem pequenas dimensões:

$$d_p < 30\mu\text{m}$$

CATEGORIA D: A fluidização destas partículas é instável, na maioria dos casos serão adequadas para leitos de jorro. As partículas possuem tamanhos bastante elevados:

$$d_p > 600\mu\text{m}$$

A curva do diagrama separando as zonas B e D é dada pela equação:

$$(\rho_p - \rho_g).d_p^2 = 10^6(\text{g/cm}^3).(\mu\text{m})^2$$

2.2 - Estado Estacionário de uma Mistura

Vários pesquisadores, (ROWE et al., 1972; THONGLIMP et al., 1984; AVIDAN et al., 1985; BILBAO et al., 1987; TANNOUS et al., 1994), têm sugerido modelos para representar os mecanismos pelos quais sólidos de granulometria e/ou densidades diferentes se misturam e segregam em leito fluidizado. Segundo esses autores, ambos os fenômenos dependem essencialmente das características de bolhas no leito fluidizado. O transporte ascendente dos sólidos arrastados através das bolhas que se deslocam do fundo até a borda superior do leito seguido pelo movimento descendente dos mesmos e a passagem de partículas da fase emulsão para fase bolhas (ou vice-versa) são os mecanismos responsáveis pela mistura de sólidos no leito fluidizado. A segregação também está relacionada com o comportamento das bolhas. O gás que atravessa a camada de sólidos a velocidades moderadas pode arrastar as partículas menos densas ou menores mas não as partículas mais densas ou maiores. Dessa forma, com a passagem das bolhas, essas partículas circulam num movimento caótico em direção ao fundo do leito. Um

estado de equilíbrio é atingido no leito quando a velocidade de mistura equipara-se à velocidade de segregação dos sólidos. Esse equilíbrio é caracterizado por uma distribuição axial dos sólidos que depende de parâmetros como a diferença de densidade e diâmetro das partículas, a proporção relativa dos diferentes constituintes e a velocidade superficial do gás de fluidização. Diversos autores observaram que o tempo necessário para atingir-se um novo estado de equilíbrio após uma alteração de variáveis operacionais é inferior a 60 segundos.

Com o objetivo de compreender os mecanismos envolvidos na mistura e segregação de sólidos, trabalhos experimentais têm sido realizados para estudar a influência de parâmetros (tempo de fluidização, velocidade do gás, fração mássica, densidade e granulometria dos sólidos) no grau de mistura de duas populações de partículas em leito fluidizado. Tem-se observado que a qualidade da mistura é muito mais sensível à diferença das densidades dos sólidos que à diferença de granulometria, sobretudo quando a velocidade do gás de fluidização é próxima à velocidade mínima de fluidização da mistura (ROWE & NIENOW, 1976; STRIJBOS, 1972). A homogeneidade da mistura é fortemente favorecida pelo aumento da velocidade do gás de fluidização (ROWE et al., 1972).

2.3 - Dinâmica em Leito Fixo

Tratados bastante extensivos e detalhados sobre leito fixo podem ser encontrados nos textos básicos de Engenharia Química, o que, no entanto, foge aos objetivos do presente trabalho. Dessa forma, o tratamento aqui elaborado restringe-se à discussão sobre o emprego da equação de Ergun, para determinar a perda de carga em leito fixo de partículas isométricas, com base em dados de diversos pesquisadores. A equação abaixo apresenta boa concordância com a contribuição dos termos referentes aos regimes laminar e turbulento:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu_g U}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho_g U^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (1)$$

No entanto, para leitos constituídos de partículas não esféricas, faz-se necessário o conhecimento de um fator de forma dessas partículas. Após a introdução do fator de forma, ϕ , a equação (1) torna-se:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu_g U}{\phi^2 \varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho_g U^2}{\phi \varepsilon^3 d_p} \quad (2)$$

2.4 - Leito Fluidizado

Existem várias operações industriais que envolvem a interação sólido-fluido, sendo que a eficiência do contato entre as fases representa o fator preponderante na determinação do resultado final do processo, GOMIDE (1986).

A fluidização é uma das muitas técnicas modernas para se efetuar o contato sólido-fluido eficientemente. O termo "fluidizado" é usado geralmente para designar um sistema multifásico em que uma carga de partículas sólidas é suspensa por uma corrente de fluido. É denominada "fluidização" porque neste estado as duas fases do sistema sólido-fluido comportam-se de forma similar a um líquido homogêneo, MARTIN (1982).

O estudo do mecanismo de fluidização, que envolve a avaliação dos parâmetros fluidodinâmicos como a velocidade mínima de fluidização, é de essencial importância para o projeto de um equipamento em leito fluidizado ou mesmo para a avaliação de um já existente. Conhecendo-se esse mecanismo é possível se elucidar outros mais complexos como o transporte de partículas.

2.4.1 - Velocidade Mínima de Fluidização (U_{mf})

Quando uma mistura de sólidos é colocada dentro de uma coluna a uma corrente ascendente de gás, a curva de variação da perda de carga do leito em função da velocidade do gás, difere sensivelmente daquela obtida para sistema homogêneo. A curva ABCD da Figura 2.2 apresenta a evolução da perda de carga quando uma mistura de sólidos passa progressivamente de um estado de fluidização total (parte DC) a um estado totalmente fixo (parte BA). A abscissa do ponto C corresponde à velocidade U_p e a abscissa do ponto B à velocidade U_F . Dentro do domínio de velocidade intermediária, o leito pode ser composto de uma zona inferior essencialmente constituída de partículas imergíveis e de uma zona superior rica em partículas flotáveis.

A curva B'A' representa a evolução da curva de pressão no caso de um leito fixo bem misturado, estado obtido por uma defluidização rápida de um leito submetido a uma alta velocidade de fluidização. A curva B'A' é distinta da curva BA.

ROWE & NIENOW (1976) definiram a U_{mf} de uma mistura, como a abscissa do ponto de interseção, E, das linhas B'A' e DC.

Vários pesquisadores propuseram um grande número de correlações para determinar a velocidade mínima de fluidização, U_{mf} . A Tabela 1, mostra algumas correlações utilizadas no presente trabalho. Algumas dessas correlações são idênticas para leitos homogêneos, outros autores sugerem uma definição de massa específica e um tamanho médio de partículas da mistura.

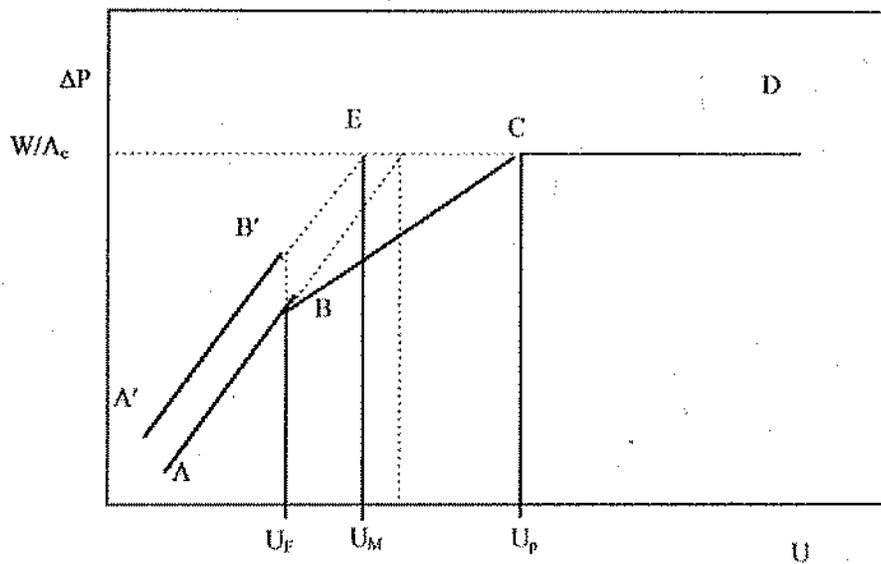


Figura 2. 2 - Perda de carga em um leito binário em função da velocidade gás.

Fonte: ZARZA & LAGUERIE (1988).

Tabela 1- Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de fluidização (U_{mf})

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO
Wen & Yu (1966)	(03)	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m d_m} \left\{ \left[(33,70)^2 + 0,0408 \cdot Ar \right]^{1/2} - 33,70 \right\}$
Bourgeois & Grenier (1968)	(04)	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m d_m} \left\{ \left[(25,46)^2 + 0,0382 \cdot Ar \right]^{1/2} - 25,46 \right\}$
Grace (1982)	(05)	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m d_m} \left\{ \left[(27,20)^2 + 0,0408 \cdot Ar \right]^{1/2} - 27,20 \right\}$
Thonglimp et al (1984)	(06)	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m d_m} \left[2,79 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{0,63} \right]^{-1} \quad \text{se } Re_{mf} > 20$
Lucas et al. (1986b)	(07)	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_m} \left\{ \left[(29,50)^2 + 0,0357 \cdot Ar \right]^{1/2} - 29,50 \right\}$

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , d_m , já que resolvermos utilizá-las neste trabalho

2.5 - Leito de Jorro

O leito de jorro convencional é uma técnica que oferece um contato eficiente entre um fluido e partículas grandes ($d_p > 1\text{mm}$, classe D, segundo a classificação de GELDART(1986)). O mesmo foi descoberto por MATHUR & GISHLER (1955) quando tentaram a secagem de trigo através de uma fluidização mal sucedida, tendo em vista o tamanho das partículas. Basicamente, o leito de jorro é constituído de uma coluna cilíndrica de base cônica, com um pequeno orifício na parte inferior do cone. Seu princípio de funcionamento consiste em adicionar as partículas à coluna e injetar o fluido pela parte inferior da mesma através do orifício de entrada na base do cone. O jato fluido quebra o leito na região central e projeta as partículas em direção ao topo da coluna, formando-se aí, uma fase dispersa, ou região de baixa concentração de sólidos ($\epsilon > 0,7$). As partículas arrastadas vão sendo desaceleradas em sua trajetória até alcançar a fonte, região localizada acima do leito, caracterizada pela mudança de direção no movimento dos sólidos. Nessa região a velocidade de arraste das partículas torna-se nula frente à aceleração da gravidade e, então, as partículas caem na região anular, de alta concentração de sólidos ($\epsilon \approx 0,5$) e iniciam seu movimento descendente de retorno ao jorro ao longo da altura do leito (SOUZA, 1993).

2.6 - Limitações do Leito de Jorro

Segundo MUJUMDAR (1989), a tecnologia do leito de jorro como proposto inicialmente, apresenta algumas limitações no tocante à sua utilização industrial. A saber:

- 1) elevada perda de carga antes de atingir o jorro;
- 2) dimensões geométricas do leito de jorro limitadas para operar com eficiência;
- 3) velocidade do fluido limitada pelas exigências de estabilidade do jorro e não pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- 4) faixa operacional limitada;

- 5) capacidade por unidade de espaço limitada (devido ao tamanho da coluna e altura máxima jorrável);
- 6) dificuldade na mudança de escala.

Apesar dessas limitações, o leito de jorro convencional tem aplicações em processos que não necessitam de unidades de grandes dimensões, como é o caso da indústria farmacêutica e química fina.

FANE et al. (1980) desenvolveram um secador de suspensões de baixo custo e concluíram que o leito de jorro é uma alternativa barata ao "spray-drying" em certas aplicações (substâncias pouco viscosas e com baixo teor de gordura) para obtenção de produtos de alta qualidade e, sendo uma técnica potencialmente melhor quando a faixa de operação não é grande (até 1000l/h).

O leito de jorro de geometria cônica é apropriado para o uso de partículas que apresentam dificuldades na geometria cilíndrica. Esta configuração é aplicada a sólidos pegajosos ou sólidos que tem uma larga distribuição granulométrica. Outras características do leito de jorro cônico, são as seguintes: as condições de operação são versáteis; não apresenta altura máxima jorrável; baixa perda de carga e sua capacidade de expansão está de acordo com as condições estáveis. O leito de jorro de geometria cônica também é utilizado para o tratamento de resíduos de madeira (serragem, produtos industriais, resíduos agroindustriais) para combustão, gaseificação ou pirólise. Também são úteis na secagem de vegetais com diferentes graus de umidade e de produtos farmacêuticos. OLAZAR et al. (1993b) e OLAZAR et al.(1994) utilizaram este tipo de geometria para analisar a hidrodinâmica da serragem misturada aos resíduos da madeira. Através de correlações para o $\Delta P_{m\acute{a}x}$ e ΔP_{jm} , concluíram que o mesmo apresenta uma baixa perda de carga.

2.7 - Dinâmica do Leito de Jorro

Para projetar um leito de jorro faz-se necessário o conhecimento prévio da altura máxima jorrável do leito ($H_{m\acute{a}x}$) e dos parâmetros

fluidodinâmicos: Perda de Carga Máxima, Perda de Carga de Jorro Mínimo, Velocidade Mínima de Jorro e a caracterização do sistema particulado.

Antes de ocorrer o movimento cíclico das partículas no leito de jorro, algumas etapas importantes são consideradas, quando ocorre a transição de leito fixo para leito de jorro. A Figura 2.3, mostra uma curva característica de perda de carga em função da velocidade superficial do ar na coluna.

Em pequenas vazões o gás percorre o leito de partículas, sem provocar perturbações, e o sistema comporta-se como um leito fixo, onde a queda de pressão aumenta com a velocidade a partir do ponto A. Aumentando-se a velocidade forma-se próximo ao orifício de entrada do ar uma cavidade provocada pelo deslocamento das partículas próxima a esta região. À medida que a velocidade do ar cresce esta cavidade tende a se alongar, provocando a formação de um jorro interno, com o aumento da perda de carga até o ponto B em que se observa o máximo valor da queda de pressão $\Delta P_{\text{máx}}$. A partir deste ponto o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade e, conseqüentemente, a perda de carga passa a diminuir até o ponto C, onde as partículas deslocadas da região central já são suficientes para provocar um jorro incipiente próximo a superfície do leito, ocasionado por expansões e contrações alternadas no jorro interno, resultando em instabilidade e flutuações na queda de pressão, formação de bolhas, etc. Um pequeno acréscimo da velocidade além do ponto C, promove um jorro incipiente próximo à superfície do leito, de modo que a pressão cai, até o ponto D, no qual o jorro aflora através da superfície, tornando-se neste ponto a perda de carga constante, na região de jorro estável, cujo aumento da vazão do ar promove apenas a elevação da fonte.

Na redução da velocidade do ar, no processo inverso, o jorro mantém-se estável até o ponto E, o qual representa a menor vazão de gás com a qual se pode obter o jorro estável. Seguindo-se à redução da velocidade do ar, a perda de carga aumenta, chega-se ao máximo de queda de pressão em F, bem abaixo do ponto B, pois no processo inverso a queda de pressão é devido apenas a interação gás-sólido, não existindo a ação da

ruptura do leito pelo jato. Em seguida, a perda de carga volta a diminuir a medida que a velocidade decresce.

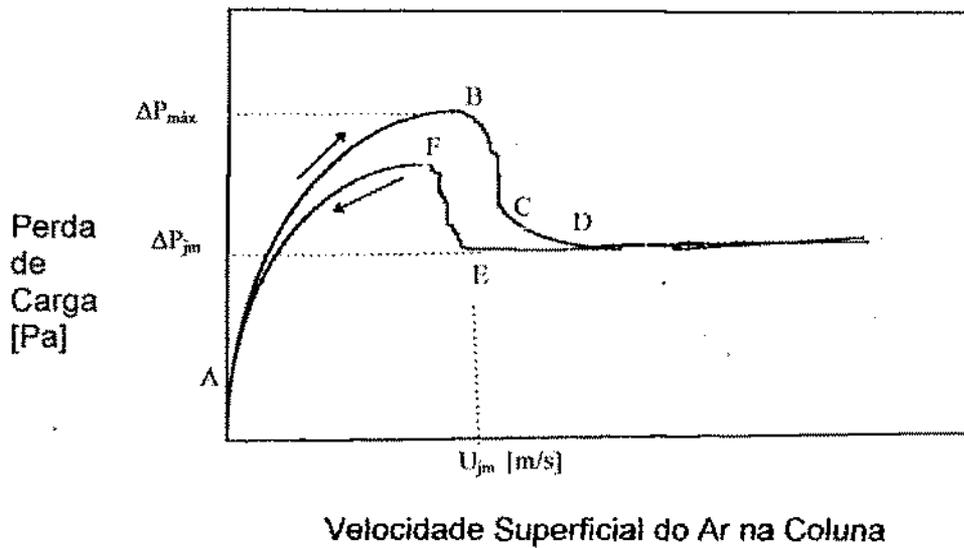


Figura 2. 3 - Curva característica genérica em leito de jorro

2.7.1 - Altura Máxima Jorrável do Leito ($H_{máx}$)

Para estimar $H_{máx}$ é necessário a identificação do mecanismo de terminação do jorro, onde $H=H_{máx}$. Qualquer equação obtida para o cálculo de $H_{máx}$ deve vir acompanhada da descrição deste mecanismo. PASSOS(1991) demonstrou que, qualquer que seja a geometria de leito, o mecanismo de terminação do jorro pode ser identificado por faixas distintas do parâmetro A. Esse parâmetro, definido, inicialmente, por MORGAN & LITTMAN (1982) para a geometria cone-cilíndrica, representa a relação entre a energia mínima necessária para formar o jorro e aquela requerida para mantê-lo ao longo do leito nas condições de mínimo jorro, em $h=1$, ou seja:

$$A = \frac{\rho_g U_t U_{mf}}{(\rho_p - \rho_g) g D_i}$$

Sendo U_{mf} obtida experimentalmente ou calculada pela equação de ERGUN (1952).

Com base nos dados e observações experimentais, MORGAN & LITTMAN (1982) concluíram que, para o leito de jorro convencional, o mecanismo de terminação do jorro é o de fluidização no topo da região anular quando $A > 0,02$ e o de pistonagem do jorro quando $A < 0,014$. Percebe-se que o mecanismo de pistonagem no jorro ocorre em leitos com baixo valor de A , uma vez que o jato de fluido na entrada do leito, em $h = 1$, não possui energia suficiente para formar o jorro.

SOUZA (1993) fez alguns relatos sobre os mecanismos de terminação do jorro encontrados na literatura, para leito de jorro convencional e, são relacionados a seguir.

De acordo com MATHUR & EPSTEIN (1974) os mecanismos de terminação de jorro, podem ser classificados como:

(i) - Fluidização do topo da região anular

A fluidização do topo da região anular tem sido considerada como mecanismo de terminação de jorro quando o leito convencional é formado de partículas grandes ($d_p > 1\text{mm}$) jorradas com ar. Neste mecanismo, o jorro termina devido a fluidização do topo da região anular. Neste ponto onde $H=H_{máx}$, a velocidade mínima de jorro torna-se igual à velocidade mínima de fluidização (LITTMAN & MORGAN, 1988).

(ii) - Pistonagem do jorro

Este mecanismo foi observado em leitos de jorro convencionais formados de partículas pequenas ($d_p < 1\text{mm}$) jorradas pelo ar. Neste mecanismo, o jorro termina quando a cavidade interna degenera-se em bolhas que se movimentam, ascendentemente, em direção à região anular. A condição mínima necessária para ocorrência de jorro estável nestes sistemas e a condição de contorno para este mecanismo de obstrução do jorro são descritas por EPSTEIN & CHANDNANI (1987), como:

$$a) D_i/d_p < 25$$

Onde d_p é o diâmetro da partícula medido através do método de projeção da partícula.

$$b) 0,55 < U_{mj}/U_{mf} < 0,70 \quad \text{para } h = H/H_{m\acute{a}x} = 1.$$

GRACE & LIM (1987) comprovaram que a condição (a) prediz a transição do regime de bolhas em leitos fluidizados. A condição (b) mostra que U_{jm} é menor que U_{mf} em $h = 1$. Isto indica que as bolhas são formadas na região próxima do bocal de entrada do fluido, antes mesmo que o topo da região anular seja fluidizado. Embora o mecanismo de pistonagem do jorro seja reportado para sistemas ar-partículas pequenas em leito de jorro, este mecanismo pode ocorrer em sistemas fluido-partículas grandes, dependendo das propriedades do fluido e da dimensão do bocal de entrada do fluido.

Pelo exposto, conclui-se que o d_p influencia o cálculo da altura máxima do leito. Esta influência pode ser observada através da análise da curva $H_{m\acute{a}x}$ vs d_p mostrada na Figura 2.4. Para um dado D_i e D_c , existe um determinado valor de diâmetro crítico (d_{pc}), no qual ocorre uma mudança no comportamento da curva $H_{m\acute{a}x}$ vs d_p , representando a transição entre os mecanismos (i) e (ii) (LITTMAN et al., 1979).

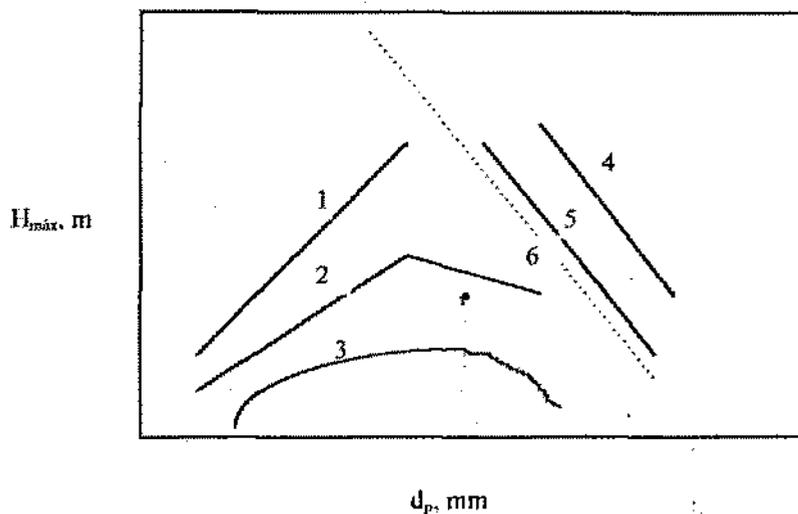


Figura 2. 4 - Efeito do diâmetro da partícula na determinação da altura máxima do leito com $D_c = 0,15m$

Curva 1 - corindo sintético, $D_i = 9,5mm$

Curva 2 - corindo sintético, $D_i = 12,7mm$

Curva 3 - esferas de vidro, $D_i = 9,5mm$

Curva 4 - poliestireno, $D_i = 9,5mm$

Curva 5 - poliestireno, $D_i = 19,0mm$

Curva 6 - trigo, $D_i = 25,4mm$.

Onde: D_i - diâmetro do orifício de entrada do ar, (cm)

D_c - diâmetro da coluna, (cm)

(Fonte: MATHUR & EPSTEIN, 1974).

Para diâmetros de partícula acima do diâmetro crítico, onde a altura máxima diminui com o aumento de d_p , o mecanismo de terminação de jorro observado é o de fluidização do topo da região anular, enquanto que para diâmetros de partícula abaixo do diâmetro crítico, este mecanismo é o de obstrução do jorro.

Tabela 2- Resumo das correlações para o cálculo da máxima altura capaz de jorrar ($H_{m\acute{a}x}$)

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO	
Malek & Lu (1965)	(08)	$\frac{H_{m\acute{a}x}}{D_c} = 0,105x \left[\frac{D_c}{d_m} \right]^{0,75} \left[\frac{D_c}{D_i} \right]^{0,40} \frac{\phi^2}{\rho_m^{1,2}}$	$H_{m\acute{a}x}$ - cm D_c - cm, ρ_m - g/cm ³
Lefroy & Davidson (1969)	(09)	$H_{m\acute{a}x} = 0,67 \frac{D_c^{\frac{4}{3}}}{D_i^{\frac{1}{3}}}$	
Grbavcic et al. (1976)	(10)	$\frac{H_{m\acute{a}x}}{D_c} = 0,347 \left[\frac{D_c}{D_i} \right]^{0,41} \left[\frac{D_c}{d_m} \right]^{0,31}$	

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , d_m , já que resolvemos utilizá-las neste trabalho.

2.7.2 - Perda de Carga Máxima ($\Delta P_{m\acute{a}x}$)

A perda de carga máxima é um parâmetro importante no projeto de unidades industriais de leito de jorro, para especificar a potência que deve ter o soprador para aflorar à superfície do leito de partículas. O referido parâmetro, pode ser observado experimentalmente através do pico no ponto B, da Figura 2.3, como mostrado anteriormente.

Vários pesquisadores tem feito estudos para prever a perda de carga máxima através de correlações. THORLEY et al. (1959) e mais recentemente GRBAVCIC et al. (1976) propuseram uma equação para o cálculo da perda de carga máxima no leito, $\Delta P_{m\acute{a}x}$, sendo a perda de carga máxima igualada ao peso do leito por unidade de área da seção transversal do mesmo. São as equações 11 e 12.

MATHUR & EPSTEIN (1974), compararam alguns resultados experimentais de $\Delta P_{m\acute{a}x}$, obtidos por MALEK & LU(1965), THORLEY et al.(1959) e LEFROY & DAVIDSON (1969), com os calculados pela equação 11, e observaram que estes são ligeiramente menores que os resultados experimentais, em especial, nos leitos com colunas de maior diâmetro.

MATHUR & EPSTEIN (1974) atribuíram esta diferença ao fato da tomada de pressão, nestes trabalhos, terem sido feitas 2,5cm acima do orifício de entrada do ar.

Tabela 3- Resumo das correlações para o cálculo da perda de carga máxima ($\Delta P_{máx}$)

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÃO
Thorley et al. (1959)	(11)	$\Delta P_{máx} = (\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)Hg$	Indicado por Becker (1961)
Grbavcic et al. (1976)	(12)	$\Delta P_{máx} = 1,2Hg(\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)$	Obtida para jorro em fase líquida.
Sampaio et al. (1984)	(13)	$\frac{\Delta P_{máx}}{Hg \rho_m} = 1 + 0,055 \left(\frac{H}{D_i} \right) - 0,0018 \left(\frac{D_i}{d_m} \right)$	$\theta = 60^\circ$ $2,5 \leq D_i < 3,8\text{cm}$
Yokokawa & Isaka (1971)	(14)	$\frac{\Delta P_{máx}}{Hg \rho_m} = \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,14[D_c - D_i]/H}$	
Ogino et al. (1993)	(15)	$\frac{\Delta P_{máx}}{Hg \rho_m} = 1,15 \left(\frac{H}{D_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}}$	

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , d_m , já que resolvemos utilizá-las neste trabalho.

2.7.3 - Perda de Carga de Jorro Mínimo (ΔP_{jm})

É a perda de carga quando do jorro constante e desenvolvido. Esse parâmetro fornece a energia utilizada durante a operação do jorro. NASCIMENTO et al. (1976), obtiveram valores da perda de carga através de leitos constituídos de partículas homogêneas e misturas de partículas submetidas a condições mínimas de jorro. Os resultados foram comparados com os já existentes na literatura, e procedeu-se à discussão das correlações obtidas por outros pesquisadores. Para leitos constituídos de milho, sorgo e

submetidas a condições mínimas de jorro. Os resultados foram comparados com os já existentes na literatura, e procedeu-se à discussão das correlações obtidas por outros pesquisadores. Para leitos constituídos de milho, sorgo e misturas de sorgo e soja com alturas variando entre 50 a 70cm, os dados foram correlacionados pela equação 18.

Tabela 4- Resumo das correlações para o cálculo da perda de carga de jorro mínimo (ΔP_{jm}).

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÃO
Malek et al. (1955)	(16)	$\Delta P_{jm} = 2Mg / 3A_c$	
Lefroy & Davidson (1969)	(17)	$\Delta P_{jm} = (\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)(2H / \pi)g$	
Nascimento et al. (1976)	(18)	$\Delta P_{jm} = 0,67(1 - \epsilon_m)H \rho_m \cdot g$	
Epstein et al. (1978)	(19)	$\frac{\Delta P_{jm}}{(\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)gH} = \frac{2}{\pi} \cdot B$	$B = \frac{1,5h + h^2 + 0,25h^3}{0,75}$ $h = H/H_{max}$

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , ϵ_m , já que resolvermos utilizá-las neste trabalho.

2.7.4 - Velocidade Mínima de Jorro (U_{jm})

MATHUR e EPSTEIN (1974), definem a velocidade de jorro mínimo, 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. Esses autores afirmam também, que 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 não tem grande efeito.

resultados experimentais, advindos da operação de um leito com diâmetro da coluna entre 7,6 e 30,5cm, usando-se ar ou água para obter o jorro.

BRUNELLO et al. (1974) estudaram a velocidade mínima de jorro para leitos de misturas de grãos de soja e sorgo contidos numa coluna com 30cm de diâmetro. A validade de algumas correlações utilizadas para leitos de partículas uniformes foi verificada com os dados experimentais obtidos e propuseram a seguinte correlação empírica, equação 23, para este caso específico.

A Tabela 5 mostra as correlações pesquisadas para a perda de carga de jorro estável, modificadas para um sistema binário, utilizado neste trabalho.

Tabela 5- Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de jorro (U_{jm})

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÃO
Mathur & Gishler (1955)	(20)	$U_{jm} = \left(\frac{d_m}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}$	
Smith & Reddy (1964)	(21)	$U_{jm} = d_m \left[\frac{g(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g D_c} \right]^{\frac{1}{2}} \left[0,64 + 26,8 \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^2 \right] \left[\frac{H}{D_c} \right]^{\left(0,5 + 1,75 \frac{D_i}{D_c}\right)}$	
Abdelrazek (1969)	(22)	$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left\{ \left(\frac{d_m}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right\}$	
Brunello et al. (1974)	(23)	$U_{jm} = 0,0143 d_m^{0,741} H^{0,592} \left[\frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}$	

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , d_m , já que resolvemos utilizá-las neste trabalho. Exceto para a equação 23.

LIMA (1992), fez um relato sobre os perfis de velocidade do gás no jorro e no anel. Os principais destaques são os seguintes:

A distribuição do gás na região do jorro e região anular pode ser determinada por dois métodos:

(1) Por medidas longitudinais dos gradientes de pressão estática próximo à parede da coluna; e

(2) Por medidas diretas da velocidade local do gás com tubo de Pitot.

O primeiro método foi utilizado por diversos autores, MATHUR & GISHLER(1955), THORLEY et al. (1959), EPSTEIN et al. (1978), GRACE & LIM (1987), MATTHEW et al. (1988), entre outros. Estes autores se basearam na relação existente entre a velocidade superficial do gás e a queda de pressão de um leito fixo empacotado livremente. Considerando que a região do anel do leito de jorro se assemelha em porosidade a este tipo de leito, determinaram o perfil vertical de pressão estática ao longo da parede da coluna em condições de jorro estável, relacionando-o diretamente com a velocidade superficial do gás no anel. A vazão volumétrica foi determinada considerando a área transversal do anel em função do nível do leito, medida em coluna semicircular nas mesmas condições operacionais. A vazão do gás no jorro foi obtida por diferença da vazão total. Todas as medidas foram efetuadas na região cilíndrica da coluna, onde supostamente a queda de pressão numa dada seção transversal é praticamente uniforme. Os dados obtidos segundo este método mostram que, em colunas grandes, uma substancial fração da vazão do gás é desviada para o anel a pequenas distâncias da entrada do gás, e que a proporção de gás no anel é maior em leitos mais rasos.

Resultados experimentais de diferentes autores comprovam que a velocidade superficial do gás no anel cresce com o nível do leito, atingindo o máximo valor na superfície deste.

BECKER (1961) estudou o perfil de velocidade em um leito, com $D_c = 15\text{cm}$ usando sementes de trigo e fazendo as medidas de velocidade do gás através de um tubo de Pitot, observando que os perfis diminuíam do centro para a parede da coluna.

MAMURO & HATTORY (1968), também estudaram o perfil de velocidade do gás em leito cone-cilíndrico, através de medidas de velocidade com tubo de Pitot. O leito tinha $D_c = 15\text{cm}$, $\theta = 60^\circ$ e as partículas usadas foram sementes de trigo. Os resultados obtidos foram semelhantes aos de BECKER (1961).

Alguns dados experimentais comprovam que a velocidade superficial do gás na região anular evolui com o nível do leito, atingindo o valor máximo na superfície deste.

THORLEY (1959), GRBAVCIC et al. (1976), REYES & MASSARANI (1991), citados por ALMEIDA (1993), consideram que quando o jorro estável é propiciado, qualquer vazão adicional do gás passa pela região do jorro. Segundo BECKER (1961) a velocidade média do gás no anel não sofre influência da velocidade superficial do ar na coluna.

No segundo método, a técnica utilizada para determinação da velocidade do gás na região anular, com o tubo de Pitot pode provocar perturbações na porosidade do leito e/ou na velocidade do ar. Contudo, como a porosidade a região do jorro é alta, este método não estaria sujeito a grandes erros. Esta técnica foi utilizada por BECKER (1961), MAMURO & HATTORI(1968) e VAN VELZEN et al. (1972).

FREITAS (1991) determinou perfis de velocidade em um leito cônico de $\theta = 60^\circ$, com partículas de vidro de 2,8mm de diâmetro e altura de leito de 15cm, através de um tubo Pitot. As medidas foram feitas acima da região anular onde a porosidade é aproximadamente igual a 1, não prejudicando assim, as medidas. Dos seus resultados, o referido autor, divide os perfis de velocidade em duas regiões: região anular, onde o perfil apresenta uma forma aproximada de uma casca esférica, e região central, onde o perfil apresenta uma forma aproximada de uma parábola ou pistão.

2.8 - Diâmetro do Jorro

Para diversas condições operacionais observa-se, através da literatura, que o jorro não apresenta uma forma bem definida, apresentando variação com o nível do leito, principalmente, próximo ao orifício de entrada do gás, onde pode ocorrer contração ou expansão brusca do diâmetro do jorro, afetando diretamente o perfil axial de velocidade do gás. No entanto, os modelos teóricos relacionados com a fluidodinâmica do leito desprezam a variação axial ocorrida neste parâmetro.

LITTMAN et al. (1988) calcularam o diâmetro do jorro a partir da distribuição de pressão no leito. Foi observado que D_j variou entre 1,5 a 3,0 vezes o diâmetro do orifício de entrada do gás, todavia, para análise teórica assumiram um valor constante do diâmetro do jorro.

LIMA (1992) determinou o diâmetro do jorro na extremidade superior do leito através dos perfis adimensionais de temperatura, e 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 as perdas de calor para o ambiente através da parede da coluna. Assim, conclui 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.

ALMEIDA (1993) observou que os perfis de pressão obtidos numa região próxima a superfície superior do cone apresentam comportamento similar independente da altura do leito ou velocidade do ar, com formação de uma descontinuidade da curva muito acentuada, que caracteriza a interface jorro-anel. O autor ainda observou que para alturas acima desta região a descontinuidade é menos acentuada, e os perfis tendem a se tornarem planos na região anular, onde o fluxo de gás pode ser considerado pistão.

Tabela 6- Resumo das correlações para o cálculo do diâmetro do jorro (cm)

AUTOR	Nº	EQUAÇÃO
Abdelrazek (1969)	(24)	$D_j = 0,319D_c \left[\frac{U_{jm}}{(gH)^{\frac{1}{2}}} \right]^{0,33}$
Lefroy e David- son (1969)	(25)	$D_j = 1,07D_c^{\frac{2}{3}} d_m^{\frac{1}{3}}$

A literatura apresenta correlações para sistemas homogêneos. No entanto, foram feitas modificações nessas correlações, introduzindo as propriedades da mistura, ρ_m , d_m , já que resolvemos utilizá-las neste trabalho.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi uma mistura de partículas de polipropileno e farinha de milho, com proporções de finos variando entre 0 e 30%. A escolha foi baseada no fato de que esse sistema, devido à semelhança de propriedades, poderia simular o comportamento do sistema binário urucum e seu pó. O fluido utilizado foi ar a temperatura ambiente. Nas tabelas 7 e 8 são apresentadas as propriedades físicas dos materiais utilizados (CAVALCANTE, 1995) e comparados com as do urucum e seu pó.

Tabela 7 - Caracterização física das partículas jorráveis

PROPRIEDADE	Sementes de Urucum	Polipropileno	TÉCNICA DE MEDIDA
d_p (cm)	0,345	0,339	esfera de igual volume(*)
ρ_a (g/cm ³)	0,715	0,614	picnometria de comparação a ar
ρ_s (g/cm ³)	1,156	1,030	picnometria líquida
ε	0,518	0,404	picnometria de comparação a ar
γ (°)	29	26	método estático
ϕ	0,64	0,62	calculado como d_i/d_c - método da projeção
Ar	$1,53 \times 10^6$	$1,29 \times 10^6$	.....

* distribuição granulométrica no Apêndice C.

Tabela 8 - Caracterização física dos finos

PROPRIEDADE	Pó de Urucum	Farinha de Milho	TÉCNICA DE MEDIDA
d_p (cm)	0,012	0,022	análise de peneiras(*)
ρ_a (g/cm ³)	0,540	0,577	picnometria de comparação a ar
ρ_s (g/cm ³)	.....	1,580	picnometria de comparação a ar
ϵ	.....	0,635	picnometria de comparação a ar
Ar	.....	$5,42 \times 10^2$	.....

*distribuição granulométrica no Apêndice C.

3.1 - Propriedades da Mistura para o Cálculo das Correlações

Determinou-se as propriedades médias da mistura, massa específica, diâmetro e porosidade do sistema, a serem utilizados nas correlações apresentadas neste trabalho, com base na propriedade de cada constituinte e suas frações ponderais através das seguintes equações:

$$\text{massa específica: } \rho_m = \rho_{pó} \cdot X_{pó} + \rho_i \cdot X_i$$

$$\text{diâmetro: } \frac{1}{d_m} = \frac{X_i}{d_i} + \frac{X_{pó}}{d_{pó}} \text{ (Sauter)}$$

No caso da porosidade, a mesma foi medida em um picnômetro de comparação a ar para cada proporção correspondente, sempre tomando o cuidado com a forma de empacotamento do leito.

$$\text{porosidade: } \epsilon_m = \frac{P_1 - P_2}{P_2}$$

A Tabela 9 apresenta as propriedades para a mistura, calculadas e medida, como mostrado anteriormente.

Tabela 9 - Caracterização física do sistema farinha de milho/polipropileno

M_{p0}/M_i	X_{p0}	X_i	$d_m(\text{cm})$	ϵ_m	$\rho_m(\text{g/cm}^3)$
0,00 ^a	0,000	1,000	0,339	0,404	1,0300
0,05	0,048	0,952	0,200	0,405	1,0564
0,10	0,091	0,909	0,147	0,409	1,0801
0,15	0,130	0,870	0,118	0,409	1,1015
0,20	0,167	0,833	0,100	0,410	1,1219
0,30	0,231	0,769	0,078	.....	1,1571

3.2- Descrição do Equipamento

A instalação utilizada é basicamente a descrita em trabalhos anteriores, ALSINA et al.(1995) e ALMEIDA (1993). O leito de jorro consta de uma coluna cônico-cilíndrica, de 17,8cm de diâmetro e 60cm de altura, com base cônica de 60°. A coluna possui seis furos igualmente espaçados, três de cada lado, para introduzir as sondas de pressão. A relação D_c/D_i é igual a 3,56. Para um leito com alturas maiores e com o ciclone acoplado à coluna, foi feito um furo 3cm abaixo da transição coluna/ciclone para não haver interferência na medida da perda de carga, tendo em vista que nesta região o fluxo de ar formará linhas de corrente.

A instalação completa do conjunto de equipamentos é mostrada na Figura 3.1 e um esquema da mesma na Figura 3.2, onde, além do leito de jorro propriamente dito, pode-se verificar os seguintes periféricos:

A) Compressor Radial para impulsionar o ar no interior da linha de alimentação do leito, tipo S100L2, com 4cv e 2920 rpm, fabricado pela Metalúrgica Abramo EBERLE S/A - Caxias do Sul Indústria Brasileira;

B) Rotâmetro para medir a vazão do ar, tipo R.2.V.C Haste, Capacidade 400m³/h, fabricado pela OMEL S/A - Indústria Brasileira;

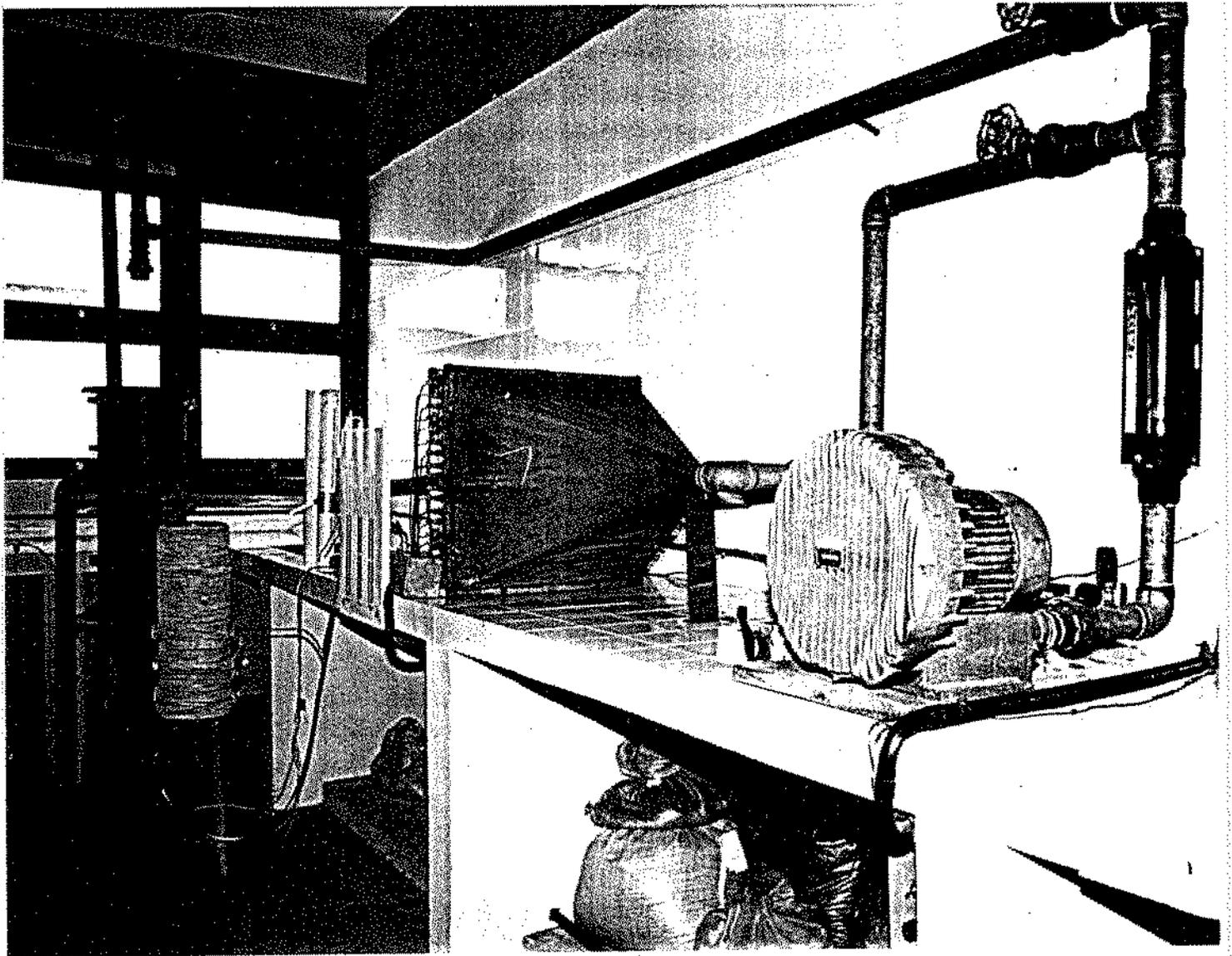


Figura 3. 1 - Equipamento experimental em leito de jorro.

C,D) Válvulas para manter o controle da vazão na linha de alimentação, tipo globo;

E) Coluna cônico-cilíndrica;

F) Manômetros Diferenciais, tipo "U". Fluido manométrico: óleo ($\rho = 0,895\text{g/cm}^3$) para fazer as medidas de pressão estática;

G) Separador sólido-fluido, tipo ciclone;

H) Recipiente para recolher o material arrastado;

I) Balança Sartorius para acompanhar a cinética do arraste dos finos durante a formação do jorro e jorro estável.

LEGENDA

A - Compressor Radial

B - Rotâmetro

C, D - Válvulas

E - Coluna

F - Manômetros

G - Ciclone

H - Recipiente

I - Balança

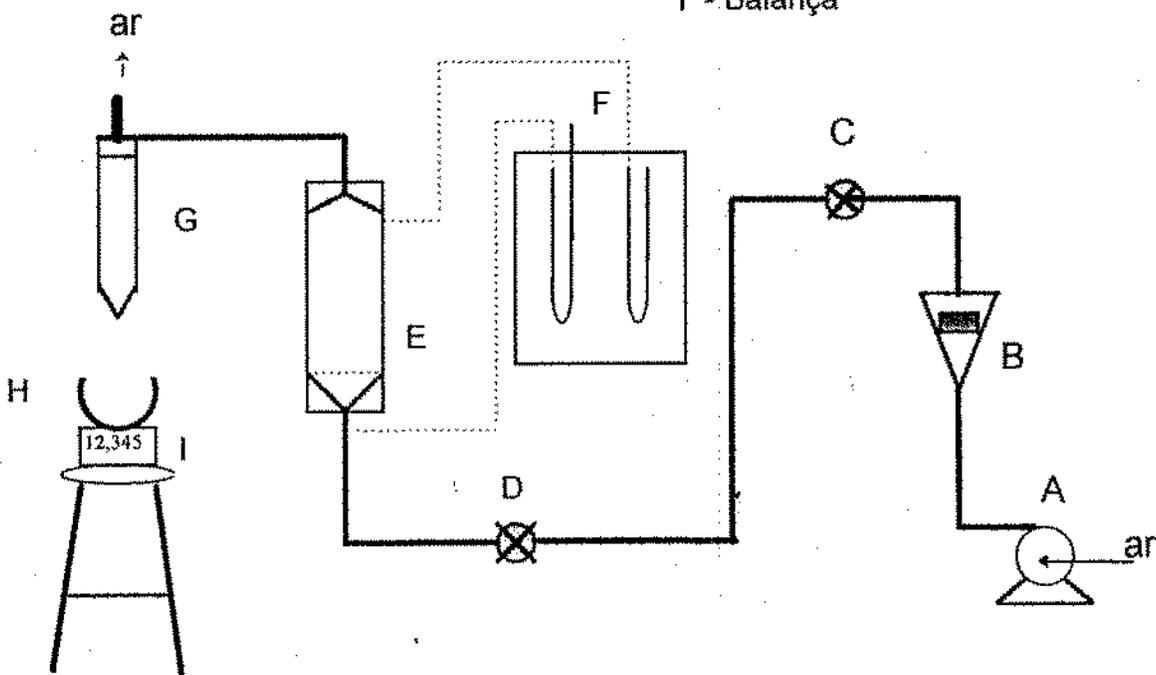


Figura 3. 2 - Diagrama esquemático dos equipamentos

3.3- Procedimento Experimental

3.3.1 - Curvas Características

Para o estudo do comportamento fluidodinâmico, adotou-se a seqüência de trabalho relacionada a seguir:

1) Pesagem do material a ser processado

Foram preparadas misturas com diferentes proporções de partículas de polipropileno e farinha de milho para simular os efeitos da presença de finos e posterior comparação com o sistema sementes de urucum e o seu pó, obtido após atrição em leito de jorro, utilizado por Almeida(1993) . Inicialmente era pesada uma quantidade determinada de polipropileno e farinha de milho segundo a razão desejada. Fazia-se a mistura dentro de um recipiente, adicionando aos poucos e homogeneizando;

2) Empacotamento do material sólido

Após a homogeneização da mistura, colocava-se na coluna, procurando empacotá-la sempre da mesma forma. Foi verificado mediante réplicas dos experimentos que a técnica de empacotamento utilizada era correta no sentido de obter boa reprodutibilidade dos resultados;

3) Acionamento do compressor radial

Abria-se convenientemente a válvula para se obter vazão adequada e através de um manômetro diferencial era medida a queda de pressão correspondente. Anotava-se então a queda de pressão no leito e continuava-se a aumentar a vazão do ar até ser observado um patamar indicando a não influência do aumento da vazão para a perda de carga. A vazão máxima observada era tal que apenas a farinha de milho(finós), pudesse ser arrastada. Nesta vazão interrompia-se o fluxo de ar na coluna desligando a chave do compressor. Constantemente as partículas arrastadas pneumaticamente eram recolhidas por um ciclone e pesadas de forma contínua numa balança digital;

4) Para fazer o processo inverso à velocidade decrescente, carregava-se a coluna novamente, obedecendo as etapas (1) e (2). Este procedimento foi utilizado para evitar que todos os finos fossem arrastados da coluna, tendo em vista que desejávamos manter o leito com as mesmas características do processo à velocidade crescente. Logo a seguir acionava-se o soprador, a vazão máxima utilizada;

5) Reduzia-se a vazão de maneira rápida e cuidadosamente para que os finos não fossem arrastados totalmente. Observava-se a estabilidade do jorro. Alcançando o menor valor da velocidade do ar na qual verificava-se jorro estável, registrava-se a velocidade de jorro mínimo. Prosseguia-se até a interrupção completa do fluxo de ar.

3.3.2 - Cinética de Separação de Finos

No levantamento dos dados para a construção das curvas características, também era verificado a cinética de separação de finos em função do tempo e da perda de carga. Sob o ciclone era colocada uma balança digital para acompanhar a pesagem dos finos arrastados. Com o aumento da vazão e conseqüente aumento da perda de carga até $\Delta P_{\text{máx}}$, observava-se que nenhum pó era arrastado, tendo em vista que neste ponto apenas havia a formação do jorro interno e uma pequena expansão do leito.

No segundo pico de perda de carga, o jorro aflorava a superfície e os finos começavam a serem arrastados num crescimento rápido até a interrupção do fluxo de ar, na qual o jorro estava totalmente desenvolvido.

Para velocidade decrescente o leito era carregado novamente e o compressor era acionado à vazão de operação. Os finos eram arrastados até a região na qual era observada a velocidade mínima de jorro. Com os valores da massa arrastada e perda de carga em função do tempo foram construídas curvas para velocidade crescente e decrescente, onde era analisada a cinética de arraste de finos.

3.3.3 - Distribuição de Pressão Radial

Para fazer a determinação do perfil radial de pressão na região do jorro e do anel, fazia-se as leituras de pressão estática utilizando-se manômetro diferencial tipo "U". As condições operacionais nas quais foram realizadas as medidas, podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição radial de pressão - Condições operacionais

	D_c/H	z/H	U (m/s)
Configuração: Convencional T = 26°C D _c = 17,8cm D _i = 5cm	0,757 H = 23,5cm	0,255-1,085	1,55
			1,77
			2,10
	1,079 H = 16,5cm	0,369-1,545	1,32
			1,55
			1,88
			2,15

As experiências foram realizadas sempre em condições de jorro estável com uma vazão de ar determinada. Uma sonda de pressão era introduzida no leito e rapidamente movimentava-se a mesma, para evitar que todo o pó fosse arrastado. Esse movimento era feito do centro do jorro, para $r = 0$, até a parede do leito com intervalos de 1cm.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os resultados obtidos neste trabalho, será apresentada uma análise em etapas diferentes, correspondentes ao comportamento do leito de polipropileno e farinha de milho. Inicialmente será mostrado o resultado do fator de forma das partículas de polipropileno, usando a equação de ERGUN modificada através de um ensaio em leito fixo, para comparar com a esfericidade obtida através do método estático. Em seguida será analisado uma curva característica experimental, com a sequência de acontecimentos durante os ensaios, dando ênfase a alteração dessa curva devido à presença dos finos no leito. Posteriormente, serão ilustrados e discutidos os parâmetros fluidodinâmicos de perda de carga máxima, perda de carga de jorro mínimo e velocidade mínima de jorro, a partir das curvas características experimentais para diversas proporções farinha de milho/polipropileno. Esses parâmetros do leito binário, obtidos experimentalmente, serão comparados com os estimados através de correlações empíricas propostas na literatura para sistemas homogêneos, modificadas para sistemas binários. Serão analisados também, a altura máxima jorrável, velocidade mínima de fluidização através de correlações. Concluindo, serão apresentados resultados dos perfis radiais de pressão para determinar o diâmetro do jorro.

4.1 - Dinâmica em Leito Fixo

Através dos resultados experimentais, de perda de carga e velocidade superficial do ar na coluna de leito fixo de partículas de polipropileno, graficou-se os dados e em seguida foram comparados com os calculados pela equação de Ergun através do ajuste do programa MARQUARDT para determinar o fator de forma da partícula. A equação para o modelo é a seguinte:

$$\frac{\Delta P}{H} = a.U + b.U^2 \quad (26)$$

onde o termo "a" da equação corresponde às perdas por atrito superficial do fluido com as partículas, e o termo "b" corresponde às perdas cinéticas provocadas pelas mudanças de direções, expansões e contrações pelo interior do leito. As condições operacionais deste trabalho foram realizadas em regime laminar, de modo que há uma predominância do termo "a" da equação, principalmente a baixas velocidades.

O Quadro 1 apresenta os valores do fator de forma das partículas de polipropileno determinados por definições diferentes. Observa-se que os dados obtidos através da equação de CURRAY (1951) estão bem próximos ao valor do fator de forma a partir da perda de carga em leito fixo, utilizando o modelo proposto por Ergun.

Quadro 1 - Fator de forma das partículas de polipropileno por diferentes definições.

VALOR	EQUAÇÃO	MÉTODO	TERMOS	
			a	b
0,63	Curray(1951)	d/d _c	.....	.....
0,62	Ergun (1952)	Ajuste da Eq. de Ergun	3296,02	2267,52

A Figura 4.0 mostra com clareza o comportamento de U vs $\Delta P/H$ em relação à curva teórica do modelo proposto por Ergun, onde verifica-se um bom ajuste para os dados experimentais.

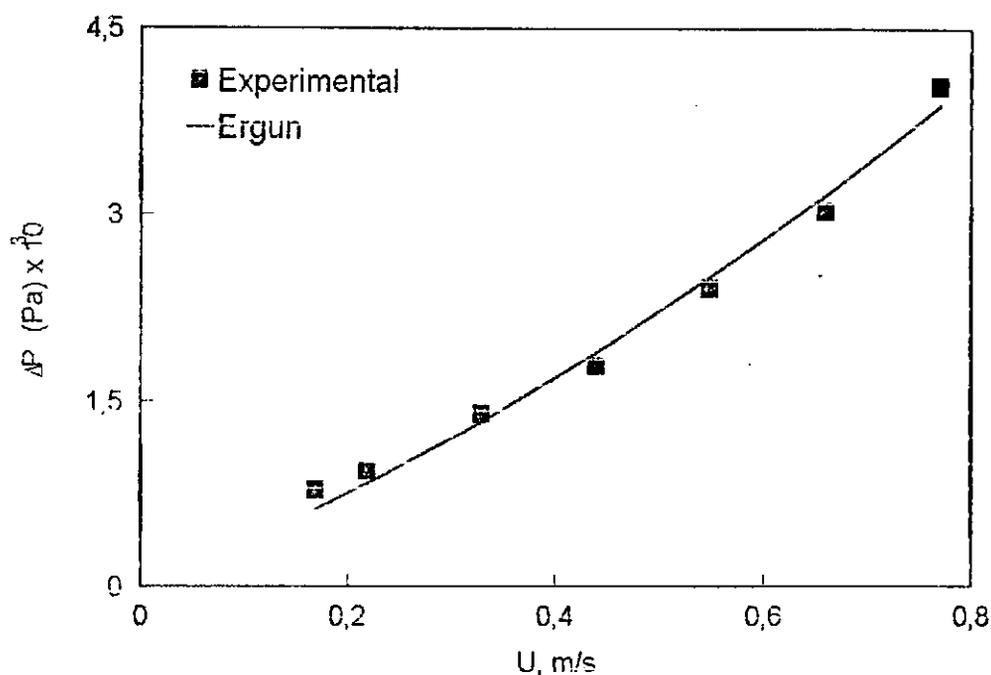


Figura 4.0 - Perda de carga em leito fixo em função da velocidade do ar na coluna.

4.2 - Comportamento Fenomenológico de Leito de Jorro com Mistura de Partículas

Através de observações visuais pôde-se acompanhar a sequência de acontecimentos durante o desenvolvimento de uma curva característica em leito de jorro com partículas de características diferentes. A Figura 4.1 mostra com detalhes os fenômenos ocorridos para a altura do leito de 16,5cm e uma proporção de 10% de finos.

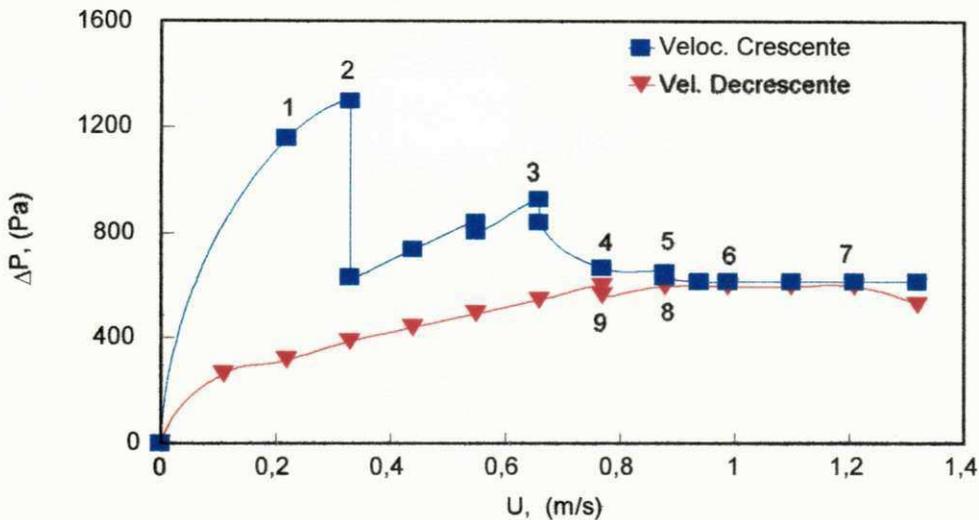


Figura 4. 1 - Comportamento de uma curva característica experimental em leito de jorro - $M_{po}/M_i = 0,10$

1. formação de caminhos preferenciais (pequenas cavidades em pontos localizados sem pó com diâmetro em torno de 1,5cm);
2. a maioria dos finos são depositados na superfície do leito formando uma rede de cavidades (semelhante a uma colméia);
3. inicia-se o arraste de partículas finíssimas, "poeira", e grande parte dos finos fluidizam na superfície:
4. região de instabilidade, formação de bolhas e os finos continuam fluidizando na superfície;
5. regime de pistonagem - há a interrupção do jorro periodicamente intercalada com a formação de cavidades em vários pontos;
6. jorro desenvolvido, mas irregular e os finos remanescentes fluidizam na região do anel;
7. jorro totalmente desenvolvido - continua o arraste de finos;
8. surgem bolhas periodicamente;
9. no centro há uma tendência a formar bolhas (pequena expansão), coincidindo com o colapso do jorro.

4.4 - Efeito da Presença de Finos nos Parâmetros Fluidodinâmicos

Serão apresentados resultados de $\Delta P_{\text{máx}}$, ΔP_{jm} e U_{jm} em leito de jorro constituído por uma mistura de polipropileno e farinha de milho para uma mesma altura do leito, 16,5cm, nas Figuras 4.9 a 4.11(Tabelas 12, 13, 16, 17, 19 e 20). Será feita uma comparação com os resultados encontrados por ALMEIDA (1993), em um leito de partículas de urucum de 13cm, para os referidos parâmetros. Na Figura 4.9 observa-se que o $\Delta P_{\text{máx}}$ diminui com o aumento de $M_{\text{pó}}/M_i$ e ambas as curvas praticamente se sobrepõem, sendo que para farinha de milho/polipropileno a curva inicia seu decréscimo a partir da proporção 0,05.

Para a queda de pressão de jorro estável, ocorre um comportamento inverso, ΔP_{jm} aumenta com o aumento da proporção massa de pó/massa de polipropileno. As curvas apresentam o mesmo comportamento, no entanto, para a curva farinha de milho/polipropileno, o aumento começa em torno da proporção 0,05. Esses efeitos podem ser atribuídos a uma possível alteração na porosidade do leito, provocada pela presença do pó. À medida que a velocidade do ar aumenta, os finos tendem a se acumular na região do anel, aumentando assim a porosidade na região do jorro, favorecendo a formação do jorro interno na cavidade, bem como a ruptura do leito e o afloramento a menores velocidades e com menores perdas de carga. Após o afloramento do jorro, o arraste de parte dos finos acompanhado do acúmulo dos mesmos com fluidização na parte superior do anel, provocaria uma diminuição da porosidade nessa região do leito, tendo como consequência um aumento da perda de carga de jorro estável com o aumento da proporção de finos. Observando ainda as Figuras 4.9 e 4.10 percebe-se que a partir da proporção 0,15 praticamente não há variação desses parâmetros. Verificou-se também uma simetria nas duas curvas, como se uma fosse a imagem da outra, através de um espelho. Resultado análogo também foi mostrado por ALMEIDA (1993).

Quanto a U_{jm} , não houve variação com o aumento da razão, permanecendo constante para todos os experimentos, como pode ser

observado na Figura 4.11. Já a curva para pó/urucum apresenta um deslocamento em torno de 100% com relação à curva do sistema farinha de milho/polipropileno, bem como uma evolução gradativa da U_{jm} , passando por um máximo, com o aumento da proporção de finos. Em seguida, para o valor próximo a 0,15 tende a diminuir. Todavia, a determinação de U_{jm} a partir das curvas características é sujeita a incerteza devido as dificuldades em observar a região na qual ocorre o colapso do jorro, como pode ser visto na Figura 4.12, obtida a velocidades decrescentes, onde a curva não apresenta um pico bem definido ocorrendo instabilidades nessa região.

Sabemos que a U_{jm} é afetada diretamente pela altura do leito de partículas. No caso de um leito de jorro formada por partículas homogêneas, este parâmetro é diretamente proporcional a altura do mesmo elevada a 1/2. O estudo de mistura de partículas em leito de jorro proposto neste trabalho, apresenta partículas com massas específicas aproximadamente iguais, contudo o tamanho destas é bem diferente, pois segundo a classificação de GELDART, umas são jorráveis e outras se prestam a uma boa fluidização. Analisando a altura do leito formada pela mistura de partículas, observamos que esta é predominantemente formada pelas partículas de maior diâmetro, ou seja, a quantidade de finos presente na mistura não afeta significativamente a geometria do leito. Assim sendo, isto poderia justificar a independência da U_{jm} com as frações ponderais de finos utilizadas no sistema farinha de milho/polipropileno, uma mistura sintética, sem a produção de finos, como é o caso do urucum e seu pó obtido por atrição. Em outra análise, esta independência poderia ser justificada através da razão de finos arrastados na operação inversa, ou seja, independente da quantidade inicial da massa de finos, a proporção de massa de finos em relação a massa total na U_{jm} é praticamente a mesma.

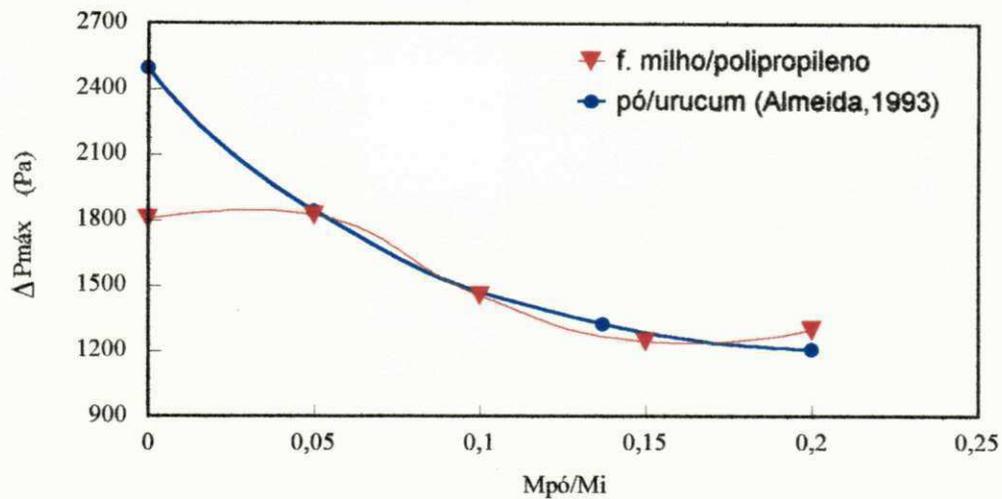


Figura 4. 9 - Perda de carga máxima em função de $M_{pó}/M_i$ em função de $M_{pó}/M_i$

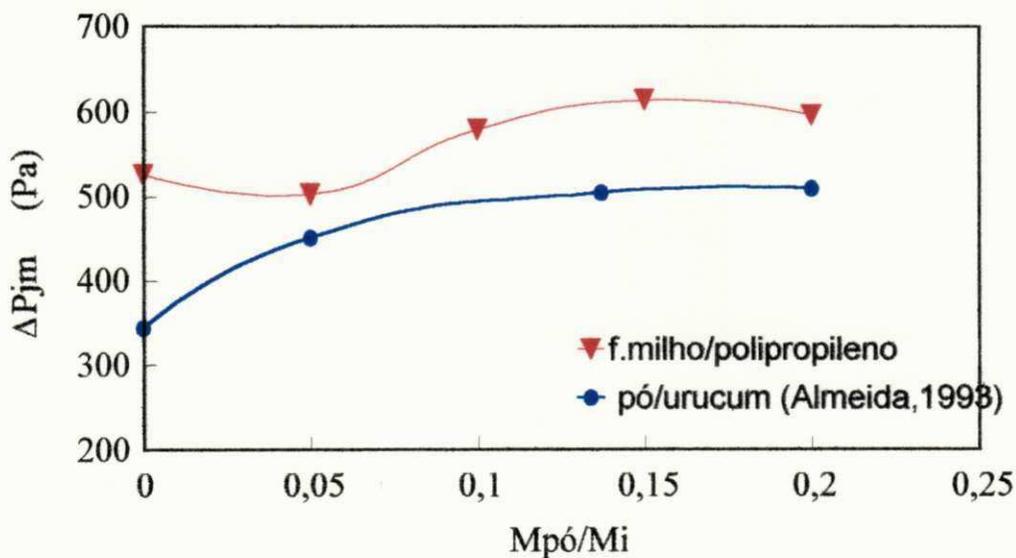


Figura 4. 10 - Perda de carga de jorro mínimo em função de $M_{pó}/M_i$

Apesar do sistema utilizado neste trabalho ter características semelhantes ao de Almeida (1993), é importante lembrar que os mesmos possuem número de Arquimedes, escoabilidade e forma diferentes e foi usada uma mistura sintética para evitar geração de pó, como no caso da atrição das sementes de urucum.

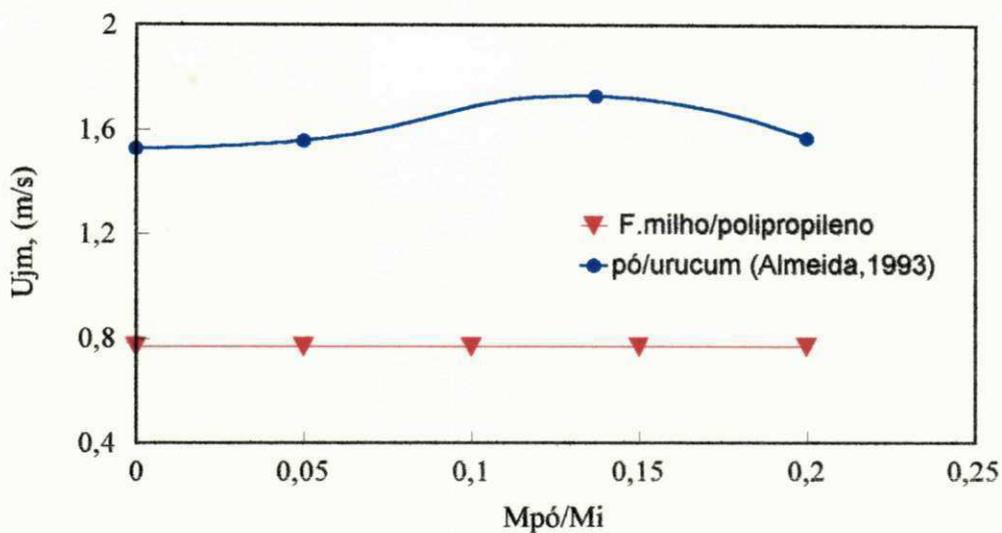


Figura 4. 11 - Velocidade mínima de jorro em função de M_{po}/M_i em função de M_{po}/M_i

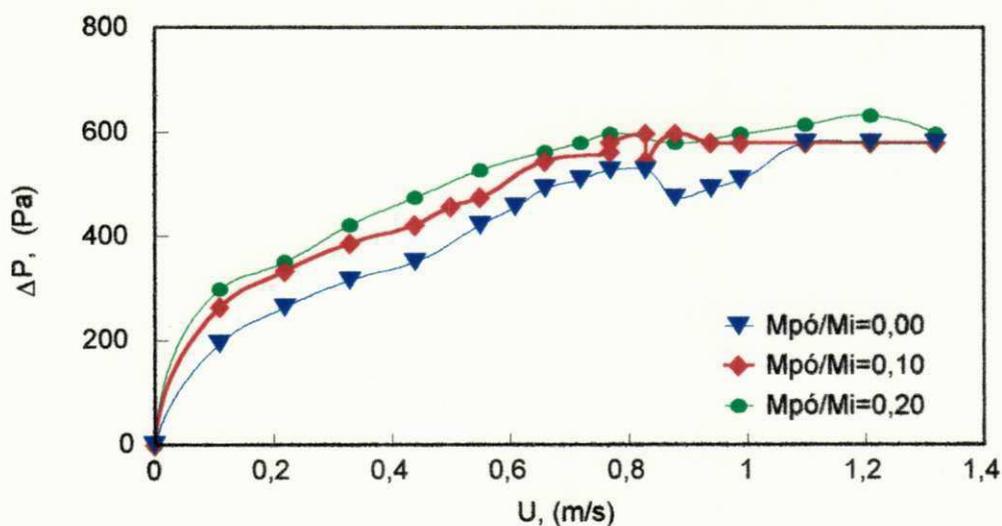


Figura 4. 12 - Perda de carga em leito de jorro (vel. decrescente)

4.5 - Cinética de Arraste de Finos

Como discutido anteriormente, a curva característica apresenta dois picos distintos para velocidade crescente, onde o segundo pico coincide com o afloramento do jorro e o início do arraste dos finos. Esse

comportamento pode ser comprovado através das Figuras 4.13 a 4.16 (Tabelas 13, 16, 17 e 19) com base na cinética de arraste e perda de carga relativa em função do tempo. Observa-se que a partir do segundo pico, a curva correspondente à massa arrastada de finos tem um aumento rápido e que a massa remanescente na coluna foi em torno de 40 a 50% do total colocado para todos os ensaios nas diversas razões finos/grossos utilizadas. Para velocidades decrescentes também foi analisada a cinética de arraste dos finos. Nas Figuras 4.17 a 4.20 (Tabelas 13, 16, 17 e 19) foi verificado que a massa é arrastada até a região na qual ocorre a velocidade mínima de jorro e que o tempo de arraste aumenta com o aumento da proporção. Ainda foi observado que a quantidade de massa remanescente na coluna ficava em torno de 40 a 50%. Comportamento idêntico foi verificado para os ensaios a velocidade crescente.

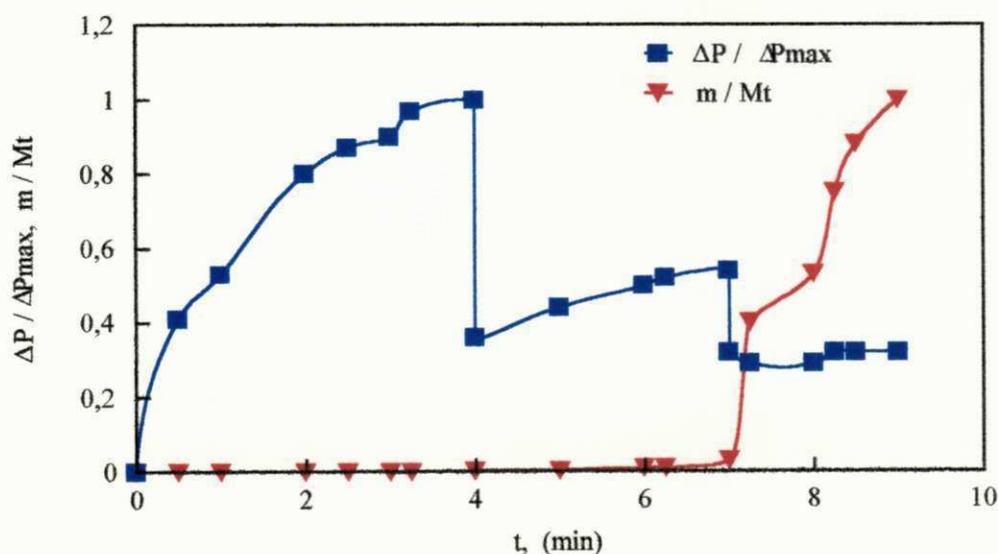


Figura 4. 13 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{po}/M_i = 0,05$ (vel. crescente)

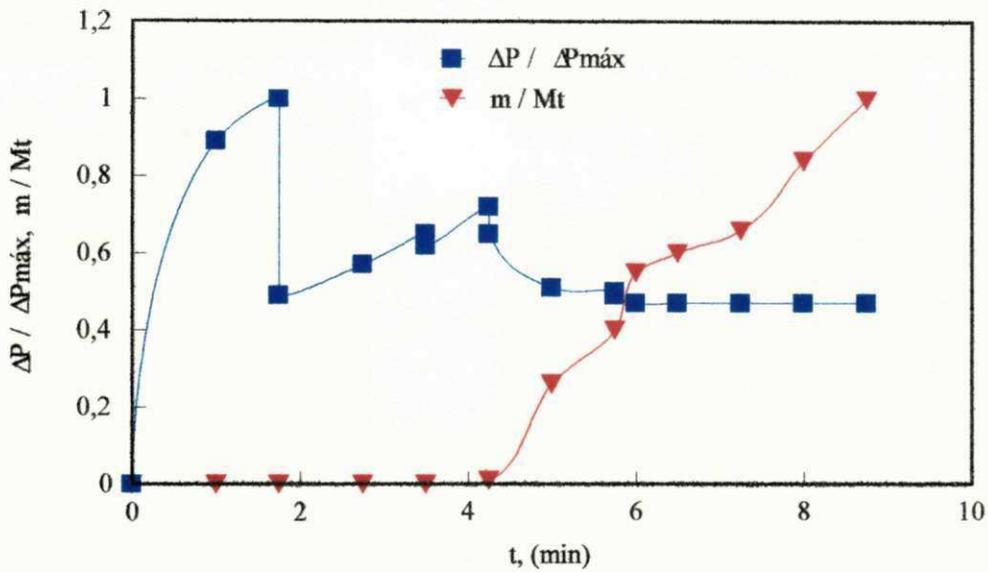


Figura 4. 14 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{\text{pó}}/M_i = 0,10$ (vel. crescente)

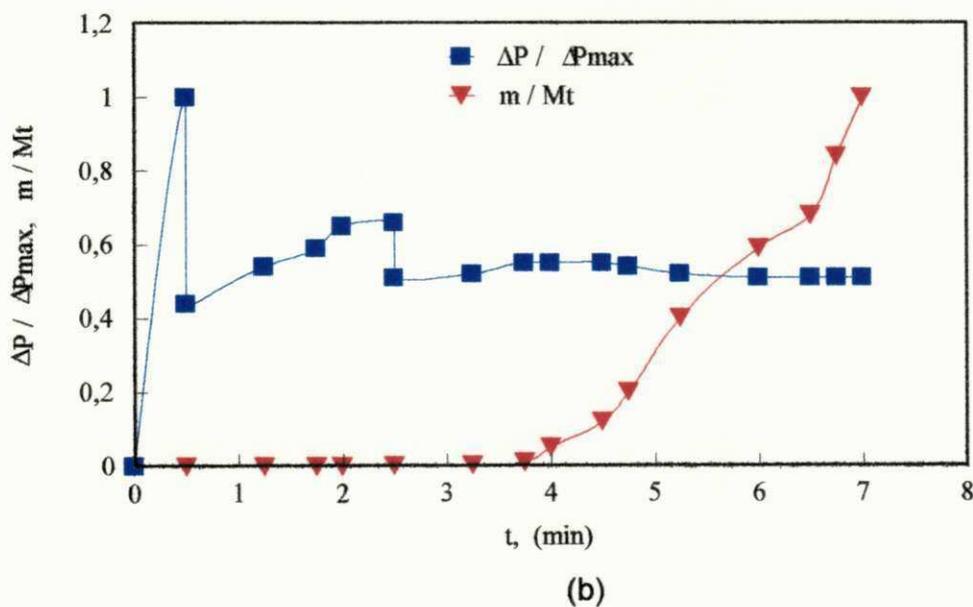


Figura 4. 15 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{\text{pó}}/M_i = 0,15$ (vel. crescente)

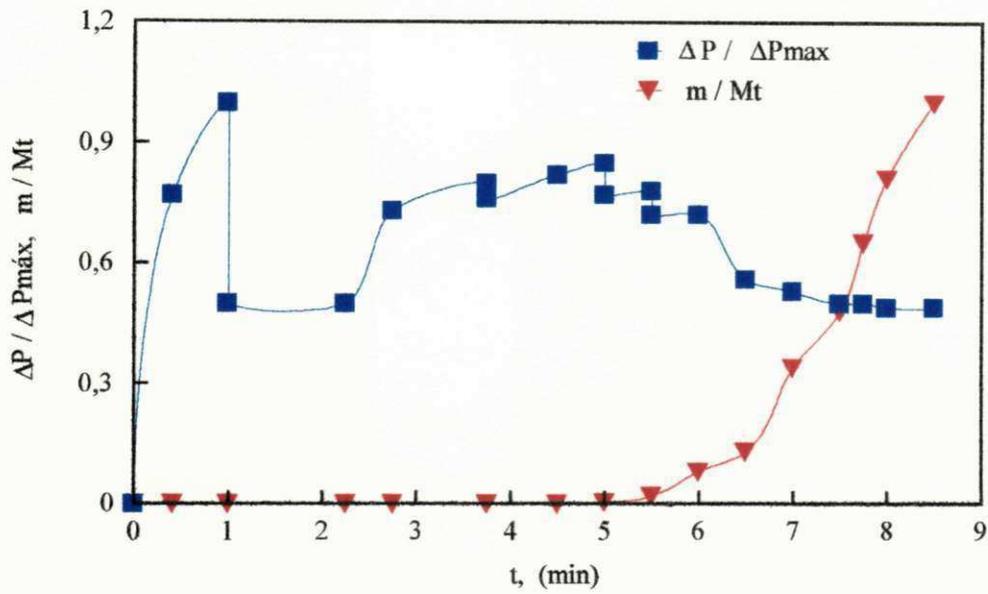


Figura 4. 16 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{p0}/M_i = 0,20$ (vel. crescente)

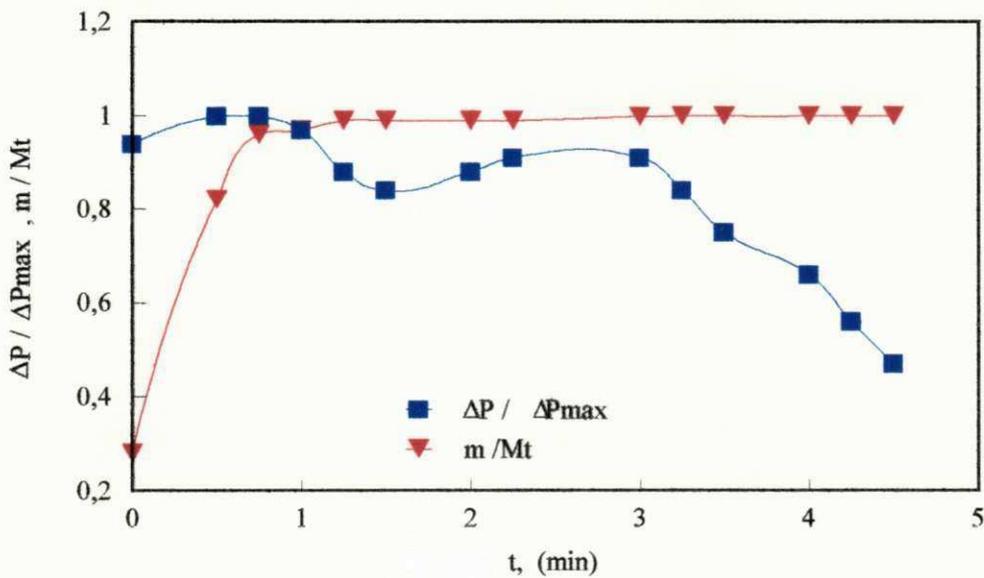


Figura 4. 17 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{p0}/M_i = 0,05$ (vel. decrescente)

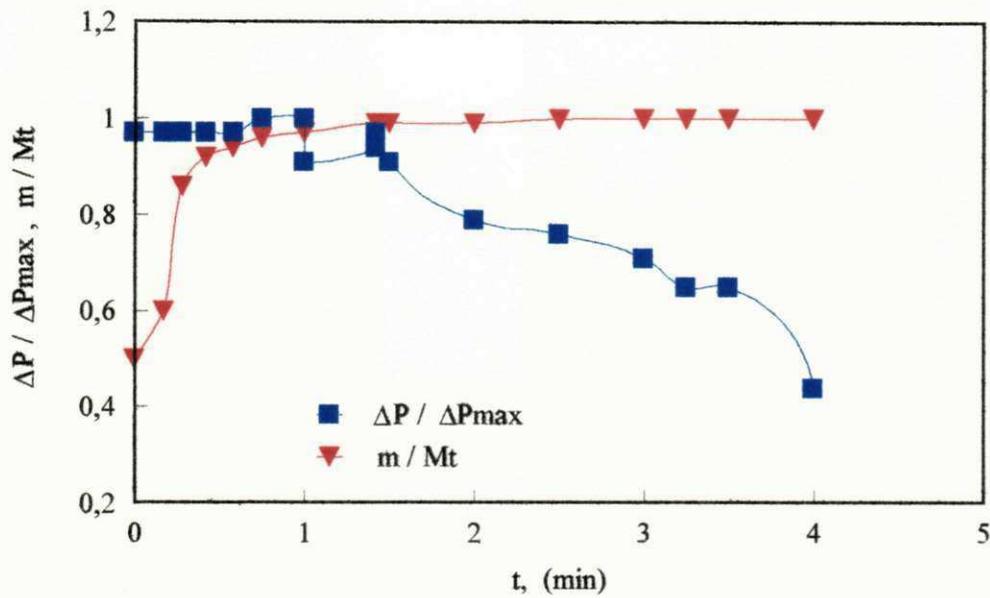


Figura 4. 18 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i= 0,10$ (vel. decrescente)

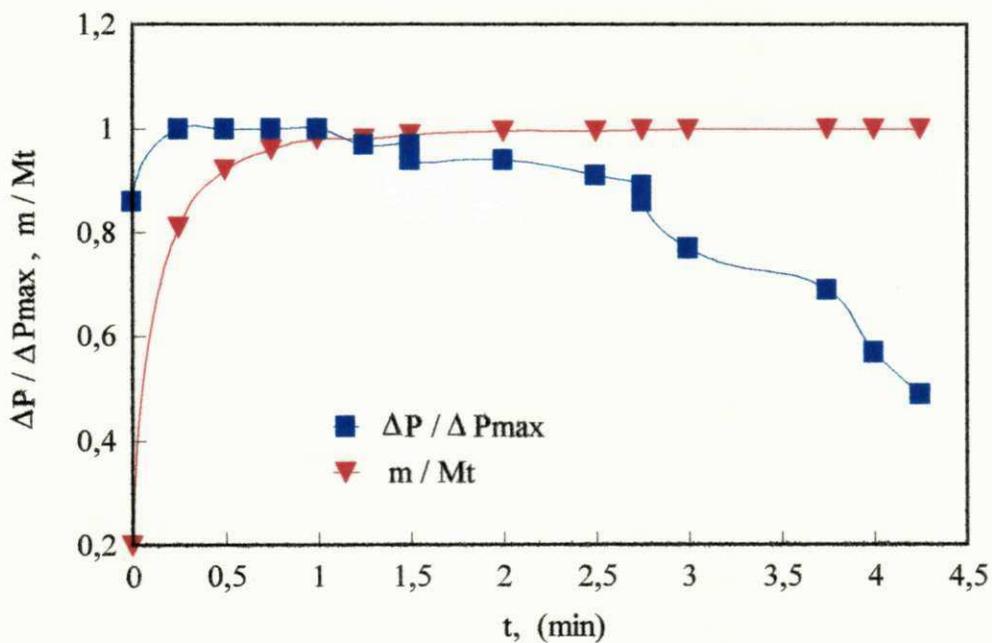


Figura 4. 19 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i= 0,15$ (vel. decrescente)

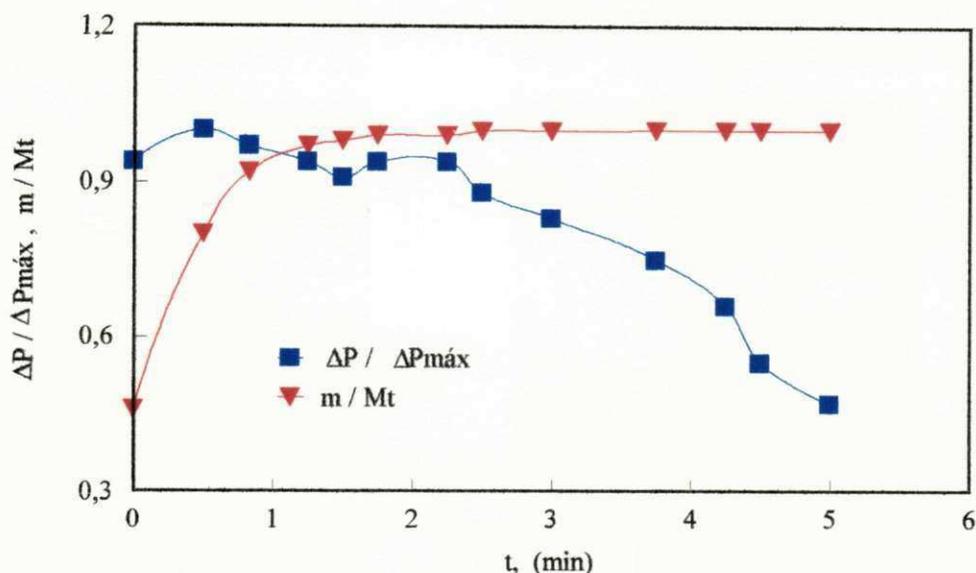


Figura 4. 20 - Efeito do pó arrastado relacionado com a perda de carga em função do tempo - $M_{pó}/M_i = 0,20$ (vel. decrescente)

4.6 - Comparação dos Resultados Experimentais com as Correlações Propostas.

Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 (Tabelas 21, 22 e 23), ilustramos uma análise comparativa dos dados experimentais $\Delta P_{máx}$, ΔP_{jm} e U_{mj} respectivamente, obtidos nos sistema de jorro convencional de mistura de partículas, com os estimados através das correlações empíricas apresentadas no Capítulo II. No cálculo foram utilizadas propriedades médias da mistura, numa tentativa de ensaiar uma extensão dessas correlações, desenvolvidas para jorro constituído de partículas isométricas, para o caso de misturas de partículas com tamanhos bem diferentes. Como se observa na Figura 4.23, os desvios no caso de U_{mj} são consideráveis, especialmente devido ao peso do tamanho médio da mistura sobre os valores estimados pelas correlações. Já as correlações para ΔP de jorro estável são mais satisfatórias, especialmente a de Malek et al., predizendo também corretamente o aumento de ΔP_{jm} com o aumento da proporção de finos.

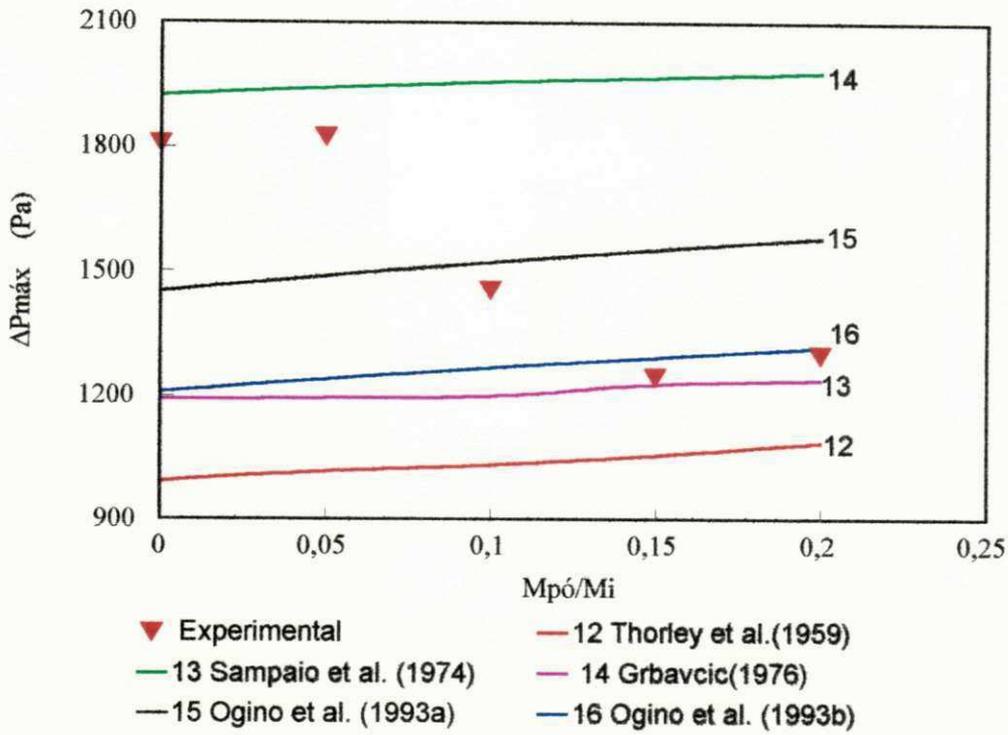


Figura 4. 21 - Perda de carga máxima experimental e estimada por correlações. em função de M_{p0}/M_i .

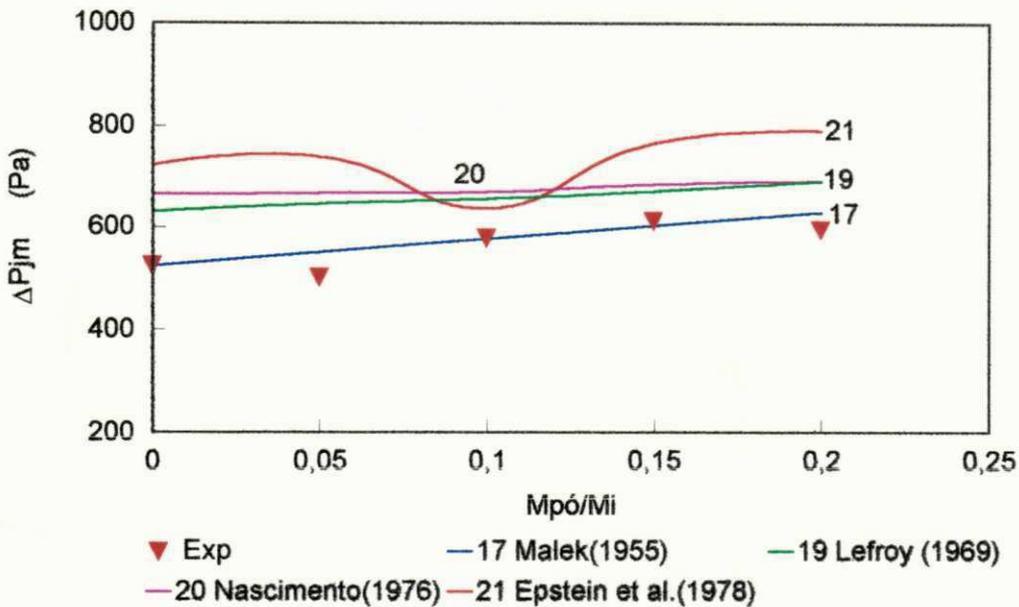


Figura 4. 22 - Perda de carga de jorro mínimo experimental e estimada por correlações. em função de M_{p0}/M_i .

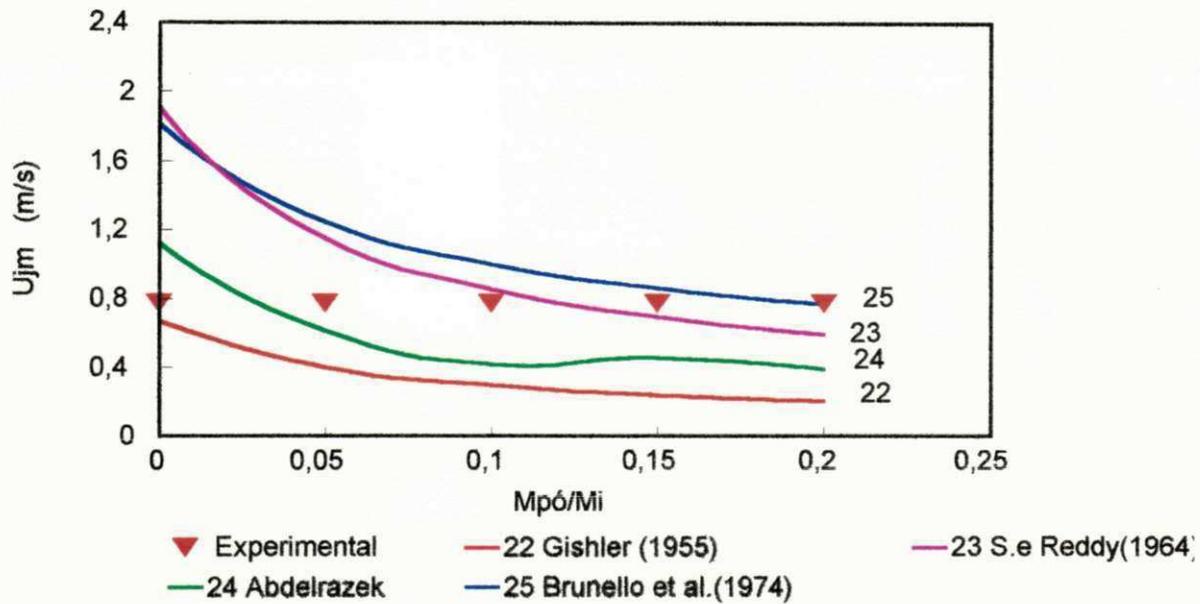


Figura 4. 23 - Velocidade mínima de jorro experimental e estimada por correlações. em função de $M_{pó}/M_i$.

Observa-se na Figura 4.21, que os dados experimentais de $\Delta P_{máx}$ e estimados por correlações empíricas, apresentam um efeito inverso com o aumento da proporção de finos, e também com desvios consideráveis em relação aos valores experimentais.

As correlações apresentadas neste trabalho, são aplicáveis a sistemas homogêneos. Todavia, essas correlações foram modificadas para o sistema de mistura de partículas, utilizando-se os valores médios das propriedades que caracterizam este sistema, como, porosidade, massa específica e diâmetro, levando em conta a fração ponderal de cada constituinte. Apesar disso, os desvios entre as predições dos diversos autores são da mesma ordem de grandeza que os desvios entre os valores experimentais e os preditos por correlações. Nota-se que os nossos pontos experimentais encontram-se entre os extremos da faixa definida pelas correlações.

4.7 - Distribuição de Pressão Radial

4.7.1 - Diâmetro do Jorro

Além dos parâmetros fluidodinâmicos observados: altura máxima jorrável, perda de carga máxima, velocidade mínima de jorro e perda de carga de jorro mínimo, foi feito um levantamento dos perfis radiais de pressão para determinar o diâmetro do jorro.

Com os dados obtidos para leitos constituídos apenas de polipropileno e com 10 e 30% de farinha de milho, com a velocidade do ar variando de 1,32 a 2,15m/s, foram construídas curvas de perda de carga em função da razão r/R e observou-se que todas elas apresentaram um comportamento semelhante, nas quais era observada uma descontinuidade na interface jorro-anel. Para tomadas de pressão próximas ao distribuidor de ar essa descontinuidade foi mais acentuada. Estima-se que o diâmetro do jorro está localizado no ponto inicial dessa descontinuidade, como podemos ver nas Figuras 4.24 e 4.25. Nas Figuras 4.26 e 4.27, com tomadas de pressão próximas à superfície do leito ou ligeiramente acima dela, os perfis são bem planos apresentando um mínimo entre as curvas em r/R próximo a 0,45 que corresponde a um diâmetro médio do jorro em torno de 5cm. Fica evidenciado que o diâmetro do jorro independe da velocidade e que esta observação também foi verificada através das correlações apresentadas no Capítulo II.

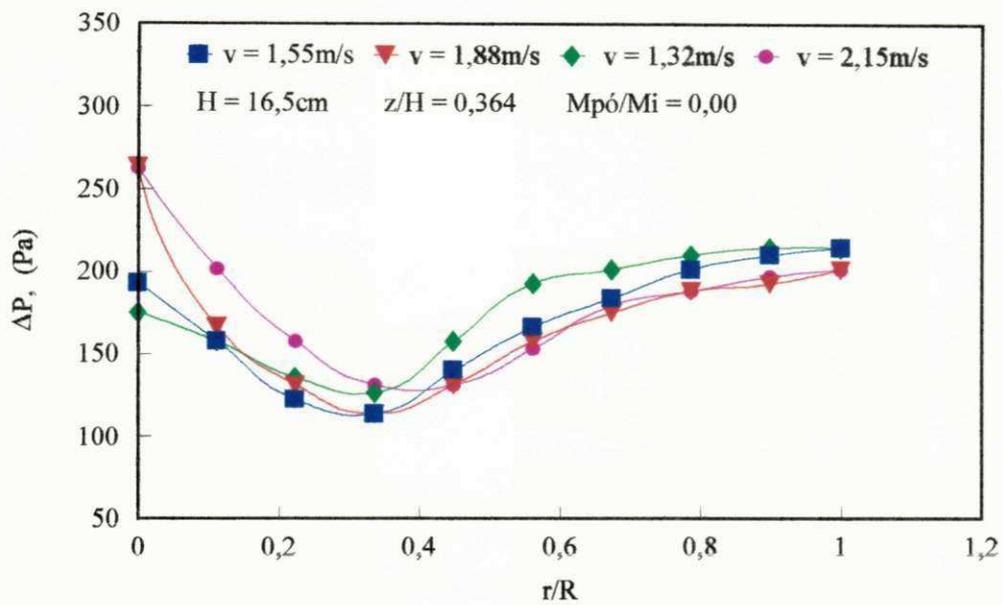


Figura 4. 24 - Distribuição radial de pressão

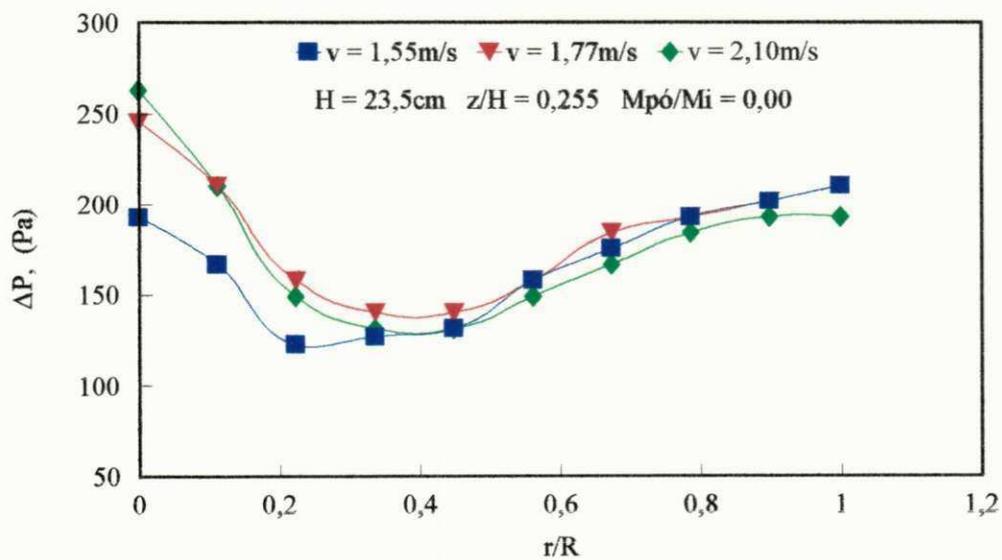


Figura 4. 25 - Distribuição radial de pressão.

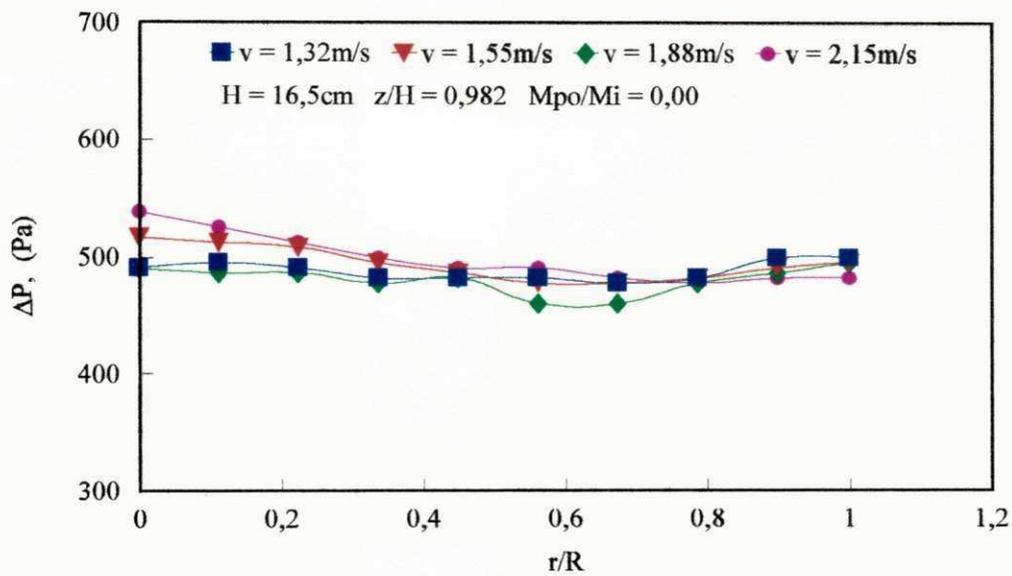


Figura 4. 26 - Distribuição radial de pressão

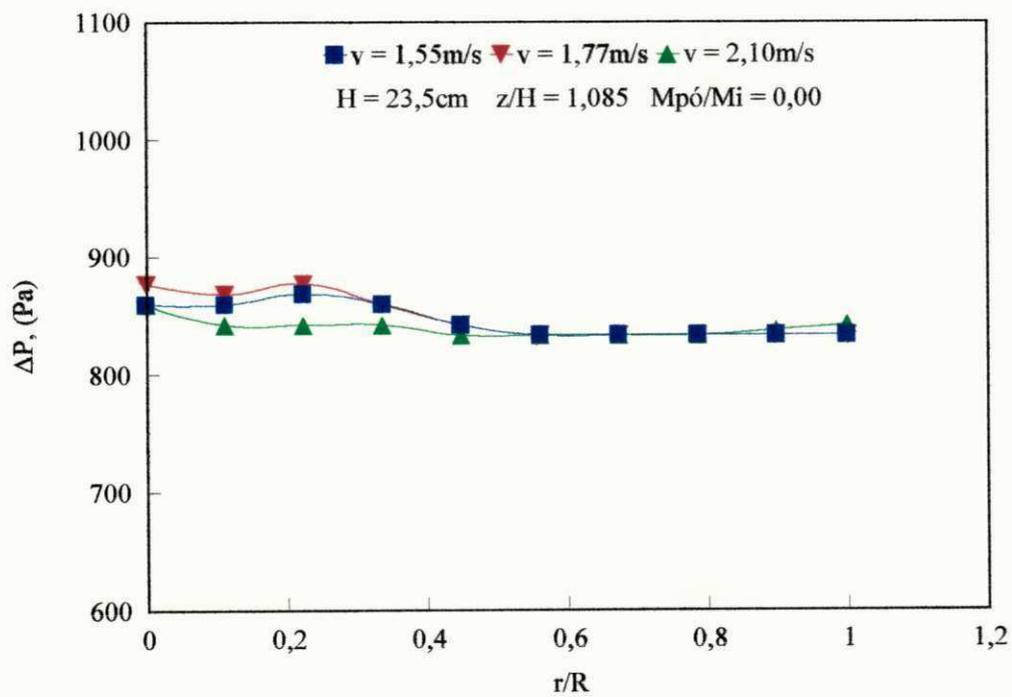


Figura 4. 27 - Distribuição radial de pressão

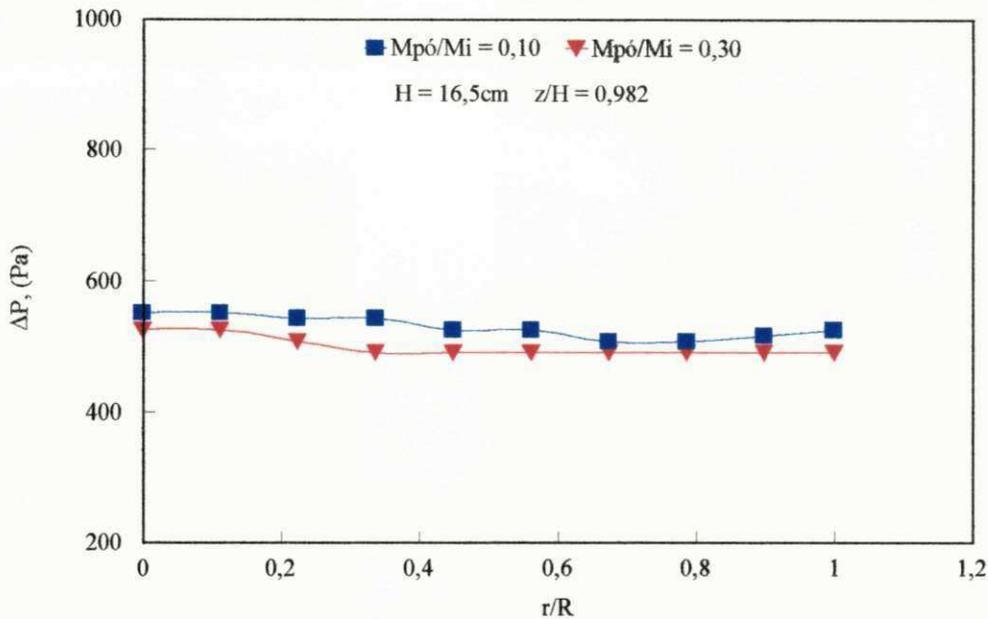


Figura 4. 28 - Distribuição radial de pressão para uma mistura de proporções 0,10 e 0,30. $U = 1,32\text{m/s}$

A presença dos finos não altera o comportamento geral das curvas. Os perfis são planos e apresentam um pequeno aumento na perda de carga isto pode ser verificado na Figura 4.28.

As correlações utilizadas para o cálculo do diâmetro do jorro, apresentam, na Tabela 11, valores próximos aos determinados experimentalmente como observado nas curvas dos perfis de pressão radial, nas posições próximas ao distribuidor. Na região do topo do anel, devido à forma plana dos perfis de pressão, o método não é adequado para determinar o diâmetro do jorro. Deve-se notar também, que as correlações utilizadas apresentam o valor médio para o diâmetro do jorro.

Tabela 11 - Diâmetro do jorro determinado por correlações (cm)

$M_{p\acute{o}}/M_i \rightarrow$		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
Abdelrazek (1969)	(26)	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81
Lefroy e Davidson (1969)	(27)	5,09	4,27	3,85	3,58	3,39	3,12

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, podemos concluir que:

1. A presença dos finos modifica os parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro;
2. As curvas características apresentam dois picos distintos: o primeiro, que coincide com $\Delta P_{\text{máx}}$ e formação do jorro interno e o segundo, onde acontece o afloramento do jorro e o início do arraste de finos;
3. Com relação aos parâmetros fluidodinâmicos, o $\Delta P_{\text{máx}}$ diminui com o aumento da proporção M_{po}/M_i . Efeito inverso, apresenta o ΔP_{jm} , aumentando com o aumento dessa proporção;
4. Quanto a U_{jm} não houve variação com o aumento da proporção, com um valor observado em torno de 0,80m/s;
5. Com o estudo através de correlações, calculadas com propriedades médias da mistura, observou-se que para U_{jm} , os desvios são consideráveis, especialmente devido ao peso do tamanho médio da mistura sobre os valores estimados;
6. As correlações para o ΔP_{jm} ajustam bem os valores experimentais, apresentando menores desvios entre eles. Nota-se que a correlação de MALEK é a que melhor ajusta os dados.

7. Para o diâmetro do jorro, as curvas apresentam perfis planos para medidas acima do leito e uma descontinuidade na interface jorro-anel nas medidas próximas ao distribuidor de ar. Como esperado, o diâmetro do jorro apresenta valor médio em torno de 5cm e não é influenciado pela velocidade do ar.;
8. Com os poucos dados disponíveis observou-se que o diâmetro do jorro não é muito influenciado pela presença de finos.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES

Para dar prosseguimento ao presente trabalho, algumas sugestões são consideradas importantes. São elas:

1. Modelar a cinética de arraste de finos em leito de jorro com mistura de partículas;
2. Estudar os mecanismos de atrição, que acontece em alguns processos, como no caso do urucum em leito de jorro;
3. Desenvolver uma célula apropriada para a medida de circulação de sólidos, envolvendo tanto partículas grossas como finas;
4. Ensaiar outros modelos aplicados às propriedades de mistura. Caso não haja êxito, desenvolver correlações próprias para misturas;
5. Envolver faixas mais amplas de variáveis operacionais: diversas alturas do leito e partículas com diferentes faixas para o número de Arquimedes;
6. Estudar a formação de bolhas, fluidização no topo da região anular e pistonagem, utilizando técnicas de visualização;
7. Determinar a velocidade média do gás na região anular, a partir dos valores de U_{mf} e $H_{máx}$.

BIBLIOGRAFIA

- ABDELRAZEK, I.D. (1969), "An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds". Citado por MATHUR, K.B. & EPSTEIN, N., Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.
- ALMEIDA, M.M., Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1993, 90p.
- ALSINA, O.L.S., LIMA, M.F..M. & ALMEIDA, M.M., "Propriedades fluidodinâmicas da polpa de umbu", Anais do XVI ENEMP, vol 2, pp.592-601, Petrópolis, 1988.
- ALSINA, O.L.S., SILVA, O.S & CAVALCANTE, J. A., "Fluidodinâmica em leito de jorro de mistura de partículas na tecnologia de alimentos", I Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1995 (no prelo).
- AVIDAN, A. & VERUSHALMI, J., "Solids mixing in an expanded top fluid bed", AIChE Journal, 31(5):835-41, 1985.
- BARRETO, D.W., JAEGER, L.M. & MASSARANI, G., "Produção de concentrado de bixina em leito de jorro III", Anais do XVII ENEMP, vol 1, pp.175-83, São Carlos, 1989.
- BECKER, H.A., "An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. Chem. Eng. Science, vol 13, pp. 245-62, 1961.
- BILBAO, R. LEZAUN, J. & ABANADES, J.C., Fluidization velocities of sand/straw binary mixtures, Powder Technology, 30(39):1-6, 1987.

- BOURGEOIS, P. & GRENIER, P., "The ratio of terminal velocity to minimum fluidizing velocity for spherical particles", Canadian Journal of Chemical Engineering, vol 46, pp.325-8, 1968.
- BRUNELLO, G., NINA, G.D., NUNES, F.C.S. & NASCIMENTO, C.A.O., "Minimum air requiremet for spouting mixed particles", Canadian Journal of Chemical Engineering, vol 52, pp.170-3, 1974.
- CAVALCANTE, J. A., Comportamento fluidodinâmico em leitos de jorro constituídos de mistura de partículas. Relatório de Iniciação Científica, UFPB, Campina Grande, 1995.
- EPSTEIN, N. & CHANDNANI, P.P., "Gas spouting characteristics of fine particles". Chem. Eng. Science, vol 42, pp.2977-81, 1987.
- EPSTEIN, N., LIM, C.J. & MATHUR, K.B., "Data and models for flow distribution and pressure drop in spouted beds". Canadian Journal of Chemical Engineering, 56(8):436-47, 1978.
- FANE, A. G., STEVENSON, T.R., LLOYD, C.J. & DUNN, M., "The spouted dryer - an alternative to spray drying", Chemecca 80, 8th Chemical Engineering Conf., Australia, pp.278-82, 1980.
- FREITAS, L.A.P. (1991), Transferência de calor entre parede e leito de jorro cônico. Dissertação de Mestrado, PPG-EQ, UFSCar, 95p. Citado por RODRIGUES, C.C., Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes, dissertação de Mestrado, PPG-EQ, UFSCar, 1993, 116p.
- GELDART, D., "Type of gas fluidization", Powder Technology, vol 7, pp.285-92, 1973.
- GELDART, D., Gas fluidization tecnologia, ed. John Wiley & Sons, 1986.
- GOMIDE, R., Operações com sistemas sólidos granulares, vol 1, São Paulo, 1986.

- GRACE, J.R. & LIM, C.J., "Permanent jet formation in beds of particulate solids". Can. J. Chem. Eng., vol 65, pp.160-2, 1987.
- GRACE, J.R. (1982), "Fluidized bed hydrodynamics", dans "Handbook of multiphase systems", éditeur chef Gad Hetsroni McGraw-Hill Book Company. Citado ZARZA, F. & LAGUERIE, C., La fluidisation: Melange et segregation de particules, CAHIER de l'AFSIA, N° 4, Englos, França, 1988.
- GRBAVCIC, A.B., VUKOVIC, D.U. & ZDANSKI, F.K. (1976), "Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds". Citados por ALMEIDA, M.M., Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1993.
- KACHAN, G. C. & CHIAPPETTA, E., "Desidratação de pasta de tomate em um secador de leito de jorro", 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, vol 2, pp.510-23, São Paulo, 1988.
- LEFROY, G.A. & DAVIDSON, J.F. (1969)," The mechanics of spouted beds". Citados por ALMEIDA, M.M., Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1993, 90p.
- LIMA, M.F.M. & ALSINA, O.L.S., "Dehydration of umbu pulp in spouted bed. Thermal studies", Congresso Europeo de Fluidización, Anais V, Las Palmas de Gran Canaria, pp.299-308, 1994.
- LIMA, M.F.M., Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos e térmicos. Dissertação de Mestrado, CPGEQ - UFPB, Campina Grande, 1992, 131p.
- LISBÔA, A. C. L., "Leito de Jorro: Um método adequado para processamento de finos de materiais carbonosos", 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, vol 2, pp.470-9, São Paulo, 1988.

- LISBÔA, A.C.L., GAIÃO, U. & SOUZA, E.J.J., "Desenvolvimento de uma unidade piloto para pirólise de finos de xisto em leito de jorro", 8^o COBEQ, vol 2, pp.712-25, São Paulo, 1988.
- LITTMAN, H., & MORGAN III, M.H. (1988), "The measurement, prediction and correlation of the minimum spouting velocity, pressure drop, maximum spoutable bed height and spout diameter in spouted beds of coarse particles". *Transport Process in Fluidized Beds*, ed. L. K. Doraswamy and A. S. Mujumdar, Elsevier, Amsterdam, pp.287-315,. Citados por OLIVEIRA, I. M. & PASSOS, M. L. A., Modelagem da dinâmica do leito de jorro cônico. *Anais do XXI ENEMP*, v.1, p149-65, Ouro Preto, 1993.
- LITTMAN, H., MORGAN III, M.H., VUKOVIC, D.V., ZDANSKI, F.K. & GRBAVCIC, Z.B., "Prediction of the Maximum Spoutable Height and the Average Spout to Inlet Tube Diameter Ratio in Spouted Beds of Spherical Particles", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol 57, pp.68-87, 1979.
- LUCAS, A., ARNALDOS, J., CASAL, J. & PUIGJANER, L., "High Temperature Incipient Fluidization in Mono and Polydisperse Systems", *Chem. Eng. Communications*, vol. 41, pp.121-32, 1986.
- MALEK, M.A. & LU, B.C.Y., (1965), "Pressure drop and spoutable bed height in spouted bed", *Ind. Eng. Process Des. Devel.* vol 4, pp.123-8. Citados por SOUZA, C. C., Programa simulador para o dimensionamento ótimo de unidades de leito de jorro na secagem de grãos, *Dissertação de Mestrado*, UFMG, Belo Horizonte, 1993, 154p.
- MALEK, M.A., MADONNA, L.A. & LU, B.C.Y. (1955), "Estimation of spout diameter in a spouted bed". Citados por ALMEIDA, M.M., *Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos*. *Dissertação de Mestrado*, UFPB, Campina Grande, 1993.
- MAMURO, T. & HATTORI, H. (1968), "Flow pattern of fluid in spouted beds", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N., *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974.

- MARTIN, H., "Heat and mass transfer in fluidized beds", *Inst. Chem. Eng.*, vol 22, pp.30-43, 1982.
- MASSARANI, G., PASSOS, M.L.A. & BARRETO, D.W. , "Production of annato concentrates in spouted beds". *Can. J. Chem. Eng.*, vol 70, pp.954-9, 1992.
- MATHUR , K.B & GISHLER, P.E. (1955), "A technique of contacting gases with coarse solid particles", citados por MATHUR, K. B. E., EPSTEIN, N., *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974.
- MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N., *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974.
- MATTHEW, M.C., MORGAN III, M.H. & LITTMAN, H., "Study of the hydrodynamics within a draft tube spouted bed system ", *Can. J. Chem. Eng.*, vol 66, pp.908-18, 1988.
- MORGAN, M.H. & LITTMAN,H., "Predicting the maximum spoutable height in spouted beds of irregularly shaped particles", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 21, pp.23-6,1982.
- MUJUMDAR, A. S., "Spouted beds: Principles and recent developments", *Anais do XVII ENEMP*, vol 1, pp.03-13, São Carlos, 1989.
- NASCIMENTO, C.A.O., DELLA NINA, G. & BRUNELLO, G., "Perda de carga em leito de jorro constituído por mistura de partículas". 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1976.
- OGINO, F., ZHANG, L. & MAHASHI, Y., "Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed", *International Chemical Engineering*, 33(2):265-72, 1993.
- OLAZAR, M., SAN JOSÉ, M.J., AGUAYO, A.T., ARANDES, J.M. & BILBAO, J., "Pressure drop in conical spouted beds", *Chem. Eng. J.*, vol 51, pp.53-60, 1993b.

- OLAZAR, M., SAN JOSÉ, M.J., LLAMOSAS, R. & BILBAO, J., "Hydrodynamics of sawdust and mixtures of wood residues in conical spouted beds", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 33, pp.993-1000, 1994.
- OLIVEIRA, I. M., PASSOS, M. L. A., "Modelagem da dinâmica do leito de jorro cônico". *Anais do XXI ENEMP*, vol 1, pp.149-65, Ouro Preto, 1993.
- PALLAI, I. & NÉMETH, J. (1969), "Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram.", *Inst. Congr. Chem. Eng. (CHISA)*, 3rd, Prague, 1969. Citados por RODRIGUES, C.C., *Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes*, dissertação de Mestrado, PPG-EQ, UFSCar, 1993, 116p.
- PASSOS, M.L.A. (1991), *Flow characteristics at two-dimensional spouted and spout - fluidized beds of particles*. Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada. Citado por SOUZA, C. C., *Programa simulador para o dimensionamento ótimo de unidades de leito de jorro na secagem de grãos*, Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 1993, 154p.
- PAVARINI, P.J., *Granulação de rocha fosfática em leito de jorro*. Dissertação de Mestrado, PGEQ-UFSCar, São Carlos, 1987, 118p.
- RÉ, M. I. & FREIRE, J. T., *Secagem de extratos farmacológicos*, *Anais do XV ENEMP*, vol 2, pp.399-406, Uberlândia, 1987.
- REYES, A. E. & MASSARANI, G., "Secado de pastas en lecho de chorro", *Anais do XIX ENEMP*, vol 1, Campinas, 1991.
- RODRIGUES, C.C., *Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes*, dissertação de Mestrado, PPG-EQ, UFSCar, 1993, 116p.
- ROWE, P.N. & NIENOW, A.W., "Particle mixing and segregation in a gas fluidized bed: a review", *Powder Technology*, vol 15, pp.141-7, 1976.

- ROWE, P.N., NIENOW, A.W. & AGBIM, A.J., "The mechanism by which particles segregate in fluidized beds. Binary systems of near-spherical particles", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol 50, pp.310-23, 1972.
- SAMPAIO, L., LOPES, M., HERNANDEZ, P. & LIVIO, T., "Apreciações relativas à dinâmica do leito de jorro cônico convencional e modificado", *Anais do XII ENEMP*, vol 1, pp.218-35, 1984.
- SANTANA, C. C., ROCHA, S. C. S., CREMASCO, M. A. & ATAÍDE, C. H., "Recobrimento de comprimentos em leito de jorro: Estudos preliminares", *Anais do XVI ENEMP*, pp. ,1988.
- SILVA, G.F. & ALSINA, O.L.S., "Secagem de urucum em leito de jorro: Estudo das variáveis operacionais". *Anais do XIX ENEMP*. vol 1, pp.389-99, Campinas, 1991.
- SMITH, J.W., REDDY, K.V.S. & FLEMING, R.J. (1964), "Maximum spoutable bed depths of mixed particles-size beds", Citados por ALMEIDA, M.M., *Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos*. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1993.
- SOUZA, C. C., Programa simulador para o dimensionamento ótimo de unidades de leito de jorro na secagem de grãos, *Dissertação de Mestrado*, UFMG, Belo Horizonte, 1993, 154p.
- STRIJBOS, S., "Motion and distribution of large particles suspended in a fluidized bed", *Powder Technology*, vol 6, pp.337-42, 1972.
- TANNOUS, K., HEMATI, M. & LAGUERIE, C., "Identification des regimes de fluidización de grosses particules", VII Jornada de Fluidización y sistemas fluido-particula, Las Palmas de Gran Canaria, pp.33-42, Espanha , 1994.
- THONGLIMP, V., HIGUILY, N. & LAGUERIE, C., "Vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches de mélanges de particules solides fluidisées par un gaz", *Powder Technology*, 30(39):223-39,1984.

- THORLEY, B., SAUNBY, J.B., MATHUR, K.B. & OSBERG, G.L. (1959), "An analysis of air and solid flow in spouted wheat bed". Citados por ALMEIDA, M.M., Processamento de urucum em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1993.
- VAN VELZEN, D., FLAMM, R. & LANGENKAMP, H.(1972), "Gás flows in spouting beds", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N., Spouted beds. New York, Academic Press, 1974.
- YOKOKAWA, A. & ISAKA, M., (1971), Hitashi zosen giho, 32(1):47. Citados por OGINO, F., ZHANG, L. & MAHASHI, Y., "Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed", International Chemical Engineering, 33(2):265-72, 1993.
- WEN, C. H. & YU, Y.H., "Generalized method for predicting the minimum fluidization velocity", AIChE Journal, vol 12, pp.610, 1966.
- ZARZA, F. & LAGUERIE, C., "La fluidisation: Melange et segregation de particules", CAHIER de l'AFSIA, N° 4, Englos, França, 1988.
- ZENZ, F.A., "Particulate Solids. The Third Fluid Phase in Chemical Engineering", Chem. Eng., 90(24):61-7, 1983.

APÊNDICE A

DADOS EXPERIMENTAIS DE PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR E VALORES CALCULADOS POR CORRELAÇÕES PARA OS PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS EM LEITO DE JORRO.

Tabela 12 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente	Velocidade Decrescente
	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
0,00	0,00	0,00
0,11	315,95	193,08
0,22	579,24	263,29
0,33	877,64	315,95
0,44	1140,93	351,06
0,50	1369,12	....
0,55	1553,42	421,27
0,61	1667,52	456,37
0,66	1755,28	491,48
0,72	1807,94	509,03
0,72	614,35	....
0,77	649,45	526,58
0,83	....	526,58
0,88	491,48	473,93
0,94	491,48	491,48
0,99	473,93	509,03
1,10	473,93	579,24
1,21	561,69	579,24
1,32	561,69	579,24
1,43	702,11	....

Tabela 13 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,05$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,00	5,00
0,11	754,77	0,00	0,50	....	....	....
0,22	965,40	0,00	1,00	263,29	71,86	4,50
0,33	1456,88	0,00	2,00	315,95	71,86	4,25
0,39	1579,75	0,00	2,50	....	....	....
0,44	1649,96	0,00	3,00	368,61	71,86	4,00
0,50	1772,83	0,00	3,25	....	....	....
0,55	1825,49	0,00	4,00	421,27	71,86	3,50
0,55	649,45	0,20	4,00	....	....	....
0,66	807,43	0,33	5,00	473,93	71,70	3,25
0,72	912,25	0,50	6,00	509,03	71,70	3,00
0,77	947,85	0,58	6,50	503,03	71,70	2,25
0,83	982,96	1,00	7,00	491,48	71,70	2,00
0,83	579,24	2,00	7,00	....	....	....
0,88	526,58	32,00	7,50	473,93	71,28	1,50
0,94	....	....	....	491,48	71,00	1,25
0,99	526,58	42,00	8,00	544,14	70,00	1,00
1,10	579,24	60,00	8,25	561,69	69,00	0,75
1,21	579,24	70,00	8,50	561,69	59,00	0,50
1,32	579,24	80,00	9,00	526,58	20,00	0,00

Tabela 14 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{ps}/M_i = 0,10$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,00	4,50
0,11	....	....	....	263,29	100,94	4,00
0,22	1246,25	0,00	1,00	333,50	100,94	3,50
0,33	1439,33	0,00	1,50	386,16	100,94	3,25
0,44	1456,88	0,00	....	421,27	100,94	3,00
0,44	667,01	0,00	2,00	....	....	....
0,50	737,22	0,50	4,00	456,37	....	2,50
0,55	824,98	0,57	4,50	473,93	100,80	2,00
0,61	860,09	....	5,00	....	....	....
0,61	614,35	1,50	5,00	....	....	....
0,66	614,35	6,30	5,50	544,14	100,75	1,50
0,77	614,35	....	6,00	561,69	....	1,25
0,77	649,45	18,00	6,00	579,24	100,00	1,25
0,83	....	....	....	596,80	....	1,00
0,83	....	....	....	544,14	98,00	1,00
0,88	631,90	....	6,50	596,80	97,00	0,75
0,88	596,80	38,00	6,50	....	....	....
0,94	....	....	....	579,24	95,00	0,50
0,99	596,80	50,00	7,00	579,24	93,00	0,42
1,10	596,80	58,00	7,25	579,24	87,00	0,25
1,21	596,80	70,00	7,50	579,24	64,00	0,17
1,32	596,80	97,68	8,00	579,24	50,00	0,00

Tabela 15 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{ps}/M_t = 0,10$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	108,00	4,50
0,11	....	....	....	263,29	108,00	4,00
0,22	1158,48	0,00	1,00	315,95	108,00	3,75
0,33	1298,91	0,00	1,75	386,16	108,00	3,50
0,33	631,90	0,00	....	....	....	....
0,44	737,22	0,00	2,75	438,82	108,00	2,75
0,55	842,53	0,00	3,50	491,48	107,66	2,50
0,55	807,43	0,32	3,50	....	....	....
0,66	930,30	....	4,25	544,14	107,00	2,25
0,66	842,53	0,85	4,25	....	....	....
0,77	667,01	25,00	5,00	596,80	....	2,00
0,77	....	....	....	561,69	106,00	2,00
0,88	649,45	....	5,75	596,80	104,00	1,50
0,88	631,90	38,00	5,75	....	....	....
0,94	614,35	52,00	6,00	....	....	....
0,99	614,35	57,00	6,50	596,80	102,00	1,25
1,10	614,35	63,00	7,25	596,80	90,00	1,00
1,21	614,35	80,00	7,50	596,80	76,00	0,75
1,32	614,35	95,00	8,75	526,58	21,00	0,50

Tabela 16 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,10$) - sem ciclone

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente	Velocidade Decrescente
	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
0,00	0,00	0,00
0,11	....	245,74
0,22	1193,59	315,95
0,28	1404,22	....
0,33	1544,64	351,06
0,41	1562,20	....
0,41	667,00	....
0,44	702,11	386,16
0,50	807,43	456,37
0,55	912,75	....
0,61	982,96	....
0,66	1000,51	561,69
0,66	807,43	....
0,66	842,53	....
0,72	895,19	....
0,72	667,01	....
0,77	614,35	561,69
0,77	737,22	....
0,83	579,24	579,24
0,83	772,32	649,45
0,88	614,35	526,58
0,94	614,35	....
0,99	614,35	526,58
1,10	614,35	579,24
1,21	596,80	596,80
1,32	596,80	596,80

Tabela 17 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,15$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,00	4,25
0,11	....	....	....	298,40	152,64	4,25
0,22	1246,25	0,00	0,50	351,06	152,00	4,00
0,22	544,14	0,00	0,50	....	....	....
0,33	667,01	0,00	1,25	421,27	152,00	3,75
0,39	737,22	0,00	1,75	....	....	....
0,44	807,43	0,00	2,00	456,37	152,50	3,00
0,50	824,48	0,00	2,50	....	....	....
0,50	631,90	0,14	2,50	....	....	....
0,55	631,90	0,40	3,25	544,14	....	2,75
0,55	....	....	....	526,59	152,50	2,75
0,61	684,56	1,80	3,75	561,69	152,00	2,50
0,66	684,56	7,00	4,00	579,24	152,00	2,00
0,72	684,56	15,00	4,50	596,80	....	1,50
0,72	....	....	....	578,24	151,00	1,50
0,77	667,01	25,00	4,75	596,80	150,00	1,25
0,88	649,45	51,00	5,25	614,35	149,00	1,00
0,99	631,90	75,00	6,00	614,35	147,00	0,75
1,10	631,90	87,00	6,50	614,35	141,00	0,50
1,21	631,90	108,00	6,75	614,35	123,00	0,25
1,32	631,90	128,00	7,00	526,58	26,00	0,00

Tabela 18 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,20$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	195,50	5,00
0,11	1018,06	0,00	0,41	298,40	195,19	5,00
0,22	1316,46	0,00	1,00	351,06	195,19	4,50
0,22	667,01	0,00	1,00	....	....	....
0,33	667,01	0,00	2,25	421,27	195,19	4,25
0,39	965,40	0,00	2,75	....	....	....
0,44	1053,16	0,00	3,75	473,92	195,19	3,75
0,44	1000,50	0,00	3,75	....	....	....
0,50	1088,27	0,15	4,50	....	....	....
0,55	1123,37	....	5,00	526,58	195,13	3,00
0,55	1018,06	0,56	5,00	....	....	....
0,61	1035,61	....	5,50	....	....	....
0,61	947,85	3,26	5,50	....	....	....
0,66	947,85	13,00	6,00	561,68	195,13	2,50
0,72	....	....	....	579,24	195,00	2,25
0,77	737,21	21,00	6,50	596,79	194,00	1,75
0,88	702,11	55,00	7,00	579,24	193,00	1,50
0,99	667,00	78,00	7,50	596,79	191,00	1,25
1,10		104,00	7,75	614,35	180,00	0,83
1,21	649,45	131,00	8,00	631,90	158,00	0,50
1,32	649,45	160,00	8,50	596,79	90,00	0,00

Tabela 19 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,20$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	208,00	5,50
0,11	1070,72	0,00	0,75	298,40	208,00	5,50
0,22	1298,91	0,00	2,00	351,06	207,90	5,25
0,22	719,66	0,00	2,00	....	....	....
0,33	912,75	0,00	2,75	421,27	207,75	4,75
0,39	982,96	0,00	3,25	....	....	....
0,44	1053,16	0,00	3,50	456,37	207,50	4,25
0,50	1088,27	0,00	4,00	....	....	....
0,50	789,88	0,20	4,00	....	....	....
0,55	860,09	1,58	4,50	544,14	207,00	3,75
0,61	877,64	....	5,00	....	....	....
0,61	719,66	10,20	5,00	....	....	....
0,66	719,66	....	5,75	596,80	206,00	3,00
0,66	702,11	18,36	5,75	614,35	206,00	3,00
0,77	719,66	....	6,50	596,80	204,00	2,50
0,77	702,11	45,00	6,50	579,24	204,00	2,50
0,83	....	....	....	596,80	199,00	1,75
0,88	667,01	....	7,00	579,24	198,00	1,42
0,88	684,56	68,00	7,00	....	....	....
0,99	684,56	....	7,75	596,80	194,00	1,00
0,99	649,45	92,00	7,75	....	....	....
1,10	649,45	120,00	8,00	614,35	186,00	0,67
1,21	649,45	150,00	8,25	614,35	168,00	0,33
1,32	649,45	180,00	8,50	596,79	67,00	0,00

Tabela 20 - Perda de carga em leito de jorro em função da velocidade superficial do ar na coluna à velocidade crescente e decrescente ($M_{p0}/M_i = 0,30$)

Velocidade (m/s)	Velocidade Crescente			Velocidade Decrescente		
	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)	ΔP (Pa)	massa (g)	tempo (min)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	235,00	5,00
0,11	1369,12	0,00	1,00	315,95	235,00	5,00
0,16	1527,09	0,00	1,75	....	....	....
0,22	1579,75	0,00	3,00	386,16	235,00	4,50
0,22	772,32	0,00	3,00	....	....	....
0,27	965,40	0,00	3,75	....	....	....
0,33	1035,62	0,00	4,33	456,37	233,00	4,00
0,44	1158,48	0,00	5,50	544,14	231,00	3,50
0,50	1176,04	0,00	6,50	....	....	....
0,50	807,43	1,91	6,50	....	....	....
0,55	877,64	10,94	7,00	596,80	230,00	3,25
0,66	772,32	24,00	8,00	667,01	226,00	2,50
0,77	789,88	42,00	8,75	667,01	224,00	2,00
0,88	789,88	71,00	9,25	649,45	221,00	1,50
0,99	754,77	115,00	9,75	649,45	209,00	1,00
1,10	719,66	150,00	10,25	667,01	195,00	0,50
1,21	702,11	181,00	10,50	702,11	180,00	0,25
1,32	684,56	230,00	10,75	737,22	95,00	0,00
1,43	702,11	261,28	11,00	....	....	....

Tabela 21 - Perda de carga máxima (ΔP_{\max}) determinada por correlações e experimentalmente, (Pa)

CORRELAÇÃO	$M_{p0}/M_l \rightarrow$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
Thorley et al. (1959)	(11)	992,55	1016,31	1032,12	1056,16	1086,60	1100,20
Grbavcic et al. (1976)	(12)	1191,06	1219,57	1238,55	1267,39	1303,93	1320,24
Sampaio et al. (1984)	(13)	1925,55	1943,35	1958,49	1970,56	1982,03	1996,77
Yokokawa & Isaka (1971)	(14)	1452,44	1489,67	1523,02	1553,27	1581,93	1631,67
Ogino et al. (1993)	(15)	1208,94	1239,92	1267,68	1292,86	1316,74	1365,83
Experimental		1807,94	1825,49	1456,82	1246,25	1298,91	1579,75

Tabela 22 - Perda de carga de jorro mínimo (ΔP_{jm}) determinada por correlações e experimentalmente, (Pa)

CORRELAÇÃO	$M_{p0}/M_l \rightarrow$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
Malek et al. (1955)	(16)	525,63	551,91	578,19	604,47	630,75	683,31
Mamuro & Hattori (1968)	(17)	1376,04	1408,98	1431,47	1459,32	1506,43	1505,37
Lefroy & Davidson (1969)	(18)	631,88	647,00	657,07	672,37	691,75	702,79
Nascimento (1976)	(19)	665,75	667,86	670,43	685,66	692,10	740,37
Epstein et al. (1978)	(20)	722,69	739,99	637,63	766,43	791,17	803,79
Experimental		526,58	503,03	579,24	614,35	596,80	667,01

Tabela 24 - Velocidade mínima de Fluidização (U_{mf}) determinada por correlações, (m/s)

CORRELAÇÃO	$M_{p0}/M_f \rightarrow$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20
Wen e Yu (1966)	(03)	0,95	1,60	2,18	2,72	3,21
Bourgeois et Grenier (1968)	(04)	0,94	1,60	2,18	2,71	3,20
Grace (1982)	(05)	0,97	1,65	2,24	2,79	3,30
Thonglimp et coll. (1984)	(06)	0,94	1,60	2,17	2,71	3,19
Lucas et coll. (1986b)	(07)	0,89	1,51	2,06	2,57	3,03

Tabela 25 - Altura máxima jorrável ($H_{m\acute{a}x}$) determinada por correlações, (cm)

CORRELAÇÃO	$M_{p0}/M_f \rightarrow$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20
Malek e Lu (1965)	(08)	22,48	33,20	41,29	47,58	53,92
Lefroy e Davidson (1968)	(09)	18,21	18,21	18,21	18,21	18,21
Grbavcic et al. (1976)	(10)	35,49	41,80	45,96	49,22	51,82

Tabela 26 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

	H=16,5m		U=1,55m/s
	Z/H=0,364	Z/H=0,982	Z/H=1,545
r/R	ΔP	ΔP	ΔP
0	193,08	517,81	588,02
0,112	157,98	513,42	588,02
0,224	122,87	509,03	583,63
0,337	114,05	495,87	579,24
0,449	140,42	487,09	579,24
0,562	166,75	478,31	579,24
0,674	184,30	478,31	579,24
0,787	201,86	482,70	579,24
0,899	210,63	491,48	579,24
1	215,02	495,87	579,24

Tabela 27 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

	H=16,5m		U=1,88m/s
	Z/H=0,364	Z/H=0,982	Z/H=1,545
r/R	ΔP	ΔP	ΔP
0	236,96	491,48	579,24
0,112	166,75	487,09	579,24
0,224	131,65	487,09	570,47
0,337	114,09	478,31	570,47
0,449	131,65	482,70	570,47
0,562	157,98	460,76	566,08
0,674	175,53	460,76	566,08
0,787	188,69	478,31	566,08
0,899	193,08	487,09	566,08
1	201,86	495,87	561,69

Tabela 28 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

r/R	H=16,5m		U=1,32m/s
	Z/H=0,364	Z/H=0,982	Z/H=1,545
	ΔP	ΔP	ΔP
0	175,53	491,48	561,69
0,112	157,98	495,87	561,69
0,224	136,03	491,48	561,69
0,337	127,03	482,70	561,69
0,449	157,98	482,70	561,69
0,562	193,08	482,70	561,69
0,674	201,86	478,31	557,30
0,787	210,63	482,70	557,30
0,899	215,02	500,25	557,30
1	215,02	500,25	557,30

Tabela 29 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

r/R	H=16,5m		U=2,15m/s
	Z/H=0,364	Z/H=0,982	Z/H=1,545
	ΔP	ΔP	ΔP
0	263,29	539,75	561,69
0,112	201,86	526,58	561,69
0,224	157,98	513,42	561,69
0,337	131,65	500,25	561,69
0,449	131,65	491,48	570,47
0,562	153,59	491,48	570,47
0,674	179,92	482,70	570,47
0,787	188,69	478,31	570,47
0,899	197,47	482,70	570,47
1	201,86	482,70	570,47

Tabela 30 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

r/R	H=23,5m		U=1,55m/s
	Z/H=0,255	Z/H=0,689	Z/H=1,085
	ΔP	ΔP	ΔP
0	193,08	473,93	860,09
0,112	166,75	491,48	860,09
0,224	122,87	482,70	868,86
0,337	127,26	473,93	860,09
0,449	131,65	469,54	842,53
0,562	157,98	473,93	833,76
0,674	175,53	473,93	833,76
0,787	193,08	482,70	833,76
0,899	201,86	491,48	833,76
1	210,63	500,25	833,76

Tabela 31 - Perfil radial de pressão ($M_{p0}/M_i = 0,00$)

r/R	H=23,5m		U=1,77m/s
	Z/H=0,255	Z/H=0,689	Z/H=1,085
	ΔP	ΔP	ΔP
0	245,74	526,58	877,64
0,112	210,63	513,42	868,86
0,224	157,98	513,42	877,64
0,337	140,42	491,48	860,09
0,449	140,42	473,93	842,53
0,562	157,98	469,54	833,76
0,674	184,30	473,93	833,76
0,787	193,08	491,48	833,76
0,899	201,86	491,48	833,76
1	210,63	500,25	833,76

Tabela 32 - Perfil radial de pressão ($M_{po}/M_i = 0,00$)

H=23,5m U=2,10m/s			
	Z/H=0,255	Z/H=0,689	Z/H=1,085
r/R	ΔP	ΔP	ΔP
0	263,29	526,58	860,09
0,112	210,63	500,25	842,53
0,224	149,20	482,70	842,53
0,337	131,65	473,93	842,53
0,449	131,65	456,37	833,76
0,562	149,20	456,37	833,76
0,674	166,75	456,37	833,76
0,787	184,30	465,15	833,76
0,899	193,08	473,93	838,15
1	193,08	491,48	842,53

Tabela 33 - Perfil radial de pressão

H=16,5cm U = 1,32m/s		
	$M_{po}/M_i = 0,10$	$M_{po}/M_i = 0,30$
r/R	ΔP	ΔP
0	552,91	526,58
0,112	552,91	526,58
0,224	544,14	509,03
0,337	544,14	491,48
0,449	526,58	491,48
0,562	526,58	491,48
0,674	509,03	491,48
0,787	509,03	491,48
0,899	517,81	491,48
1	526,58	491,48

APÊNDICE B

FIGURAS DA PERDA DE CARGA EM LEITO DE JORRO CONSTITUÍDO POR MISTURA DE PARTÍCULAS NO PRESENTE TRABALHO E COMPARADOS AOS DADOS DE ALMEIDA (1993).

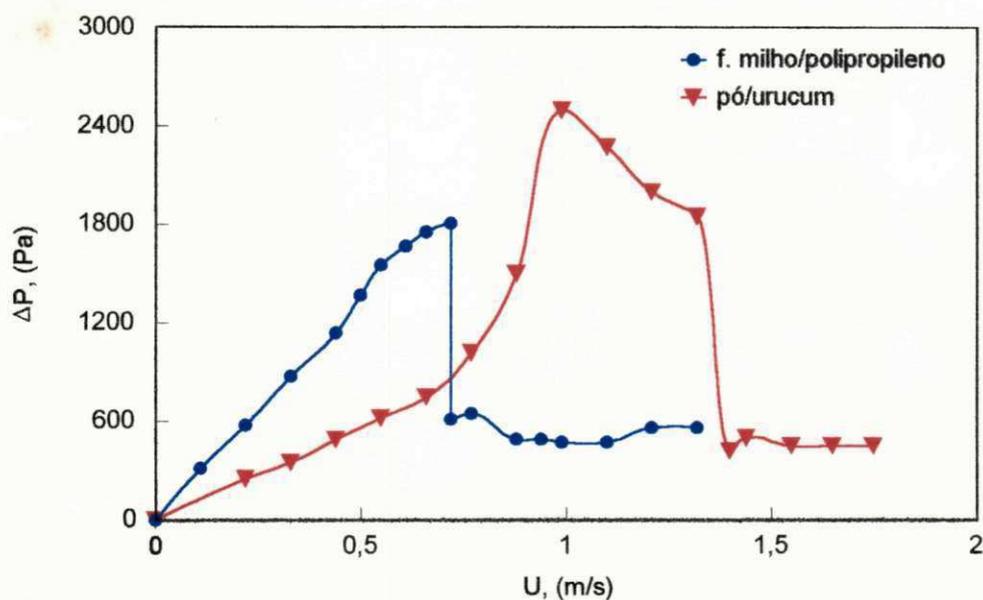


Figura B. 1 - Perda de carga em leito de jorro - $M_{p0}/M_i = 0,00$ (* Almeida, 1993)

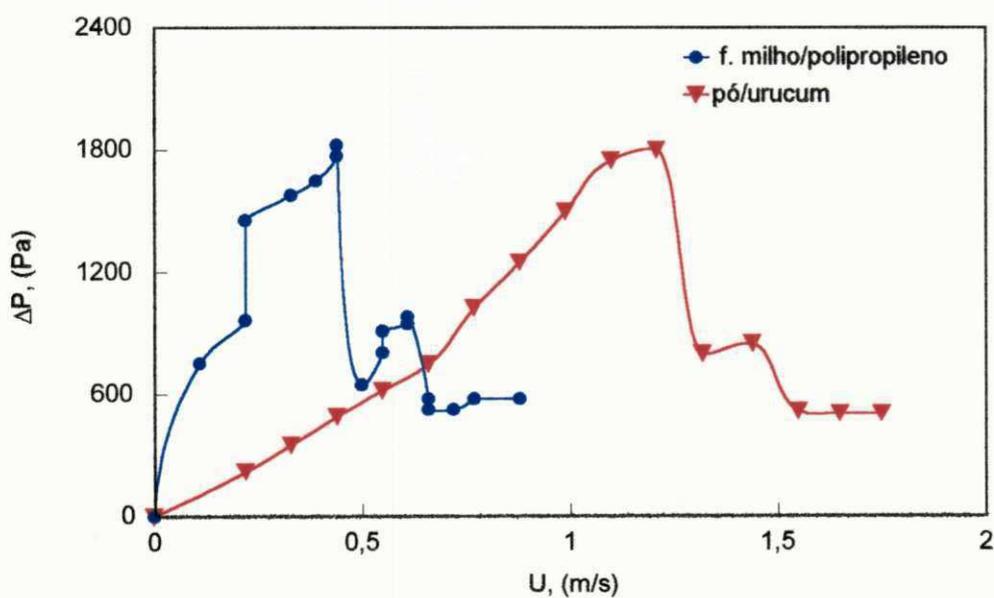


Figura B. 2 - Perda de carga em leito de jorro - $M_{p0}/M_i = 0,05$ (* Almeida, 1993)

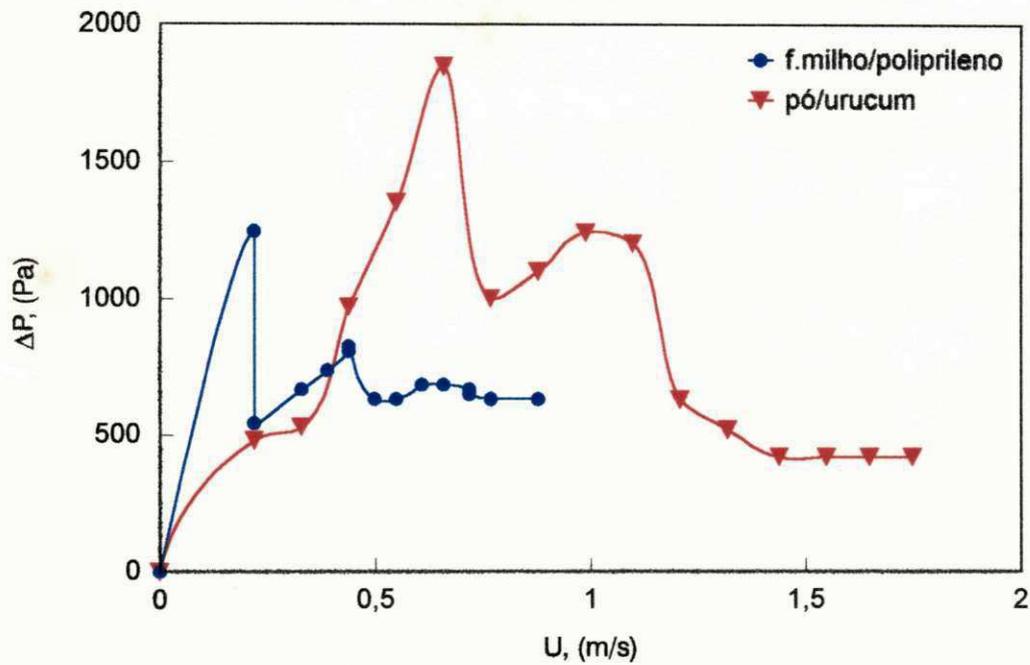


Figura B. 3 - Perda de carga em leito de jorro - $M_{p0}/M_i = 0,15$ (* Almeida, 1993)

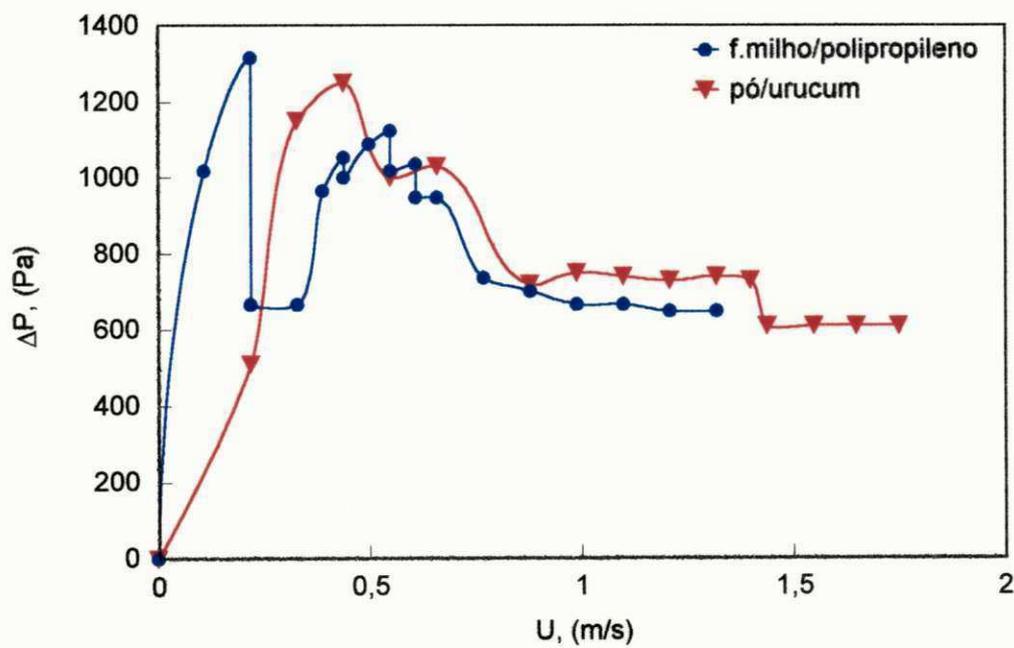


Figura B. 4 - Perda de carga em leito de jorro - $M_{p0}/M_i = 0,20$ (* Almeida, 1993)

APÊNDICE C

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS ARRASTÁVEIS

O diâmetro médio das partículas foi determinado através da mediana da curva acumulativa da respectiva distribuição.

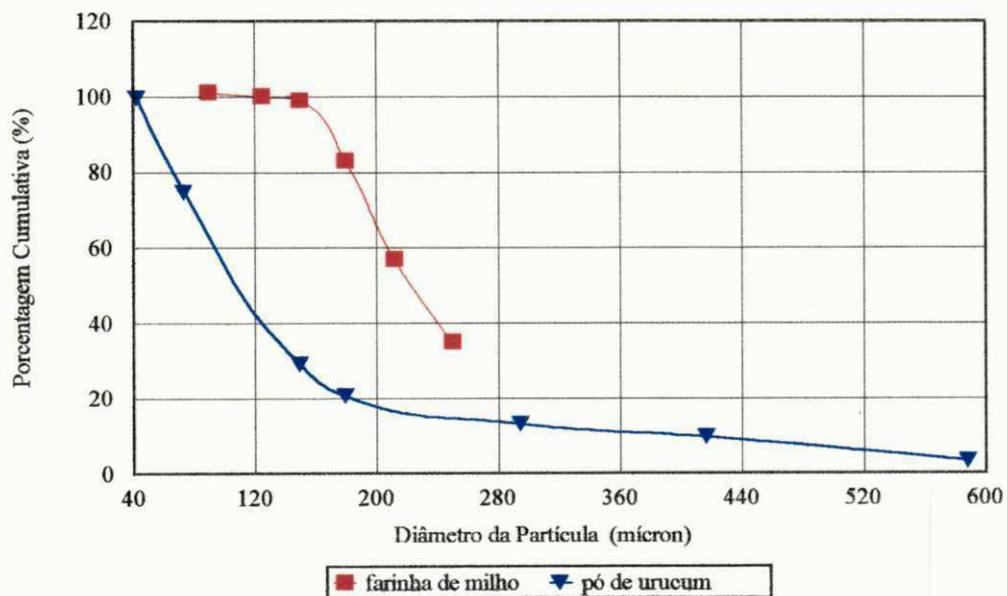


Figura C. 1 - Distribuição granulométrica das partículas arrastáveis por análise de peneiras

Tabela 34 - Dados da distribuição granulométrica das partículas arrastáveis por análise de peneiras

d_p (μm)	FARINHA DE MILHO massa acumulada (%)	URUCUM massa acumulada (%)
589		3,40
417		6,33
295		7,42
250	34,90	
212	21,90	
180	26,10	8,50
150	16,00	45,68
125	1,10	
74		24,96
43		0,26