

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PROCESSAMENTO DE URUCUM EM LEITO DE JORRO
ESTUDOS FLUIDODINÂMICOS

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA

CAMPINA GRANDE
SETEMBRO/1993

PROCESSAMENTO DE URUCUM EM LEITO DE JORRO
ESTUDOS FLUIDODINÂMICOS

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADORA: ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA

CAMPINA GRANDE
1993

PROCESSAMENTO DE URUCUM EM LEITO DE JORRO

ESTUDOS FLUIDODINÂMICOS

MARCELLO MAIA DE ALMEIDA



ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA

Orientadora



KEPLER BORGES FRANÇA

Componente da Banca

M^a de Fátima M. de Lima.
MARIA DE FÁTIMA MEDEIROS DE LIMA

Componente da Banca

M^a Laura de Azevedo Passos
MARIA LAURA DE AZEVEDO PASSOS

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

1993

DIGITALIZAÇÃO:

SISTEMOTECA - UFCG

DEDICATÓRIA

A Deus, porque "Teu, senhor, é o conselho e a verdadeira sabedoria, Tu és o entendimento, e minha Fortaleza". (Pv.8:14).

A meus pais, Teomirtes e Osmar.

À minha esposa HALLENNE RODRIGUES DE ALMEIDA pelo exemplo e estímulo e, à minha filha JESSICA OHANNA, pelos momentos de descontração.

AGRADECIMENTOS

A professora Odelsia L. Sánchez de Alsina, pela orientação e amizade.

A Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química na pessoa do Prof. Kepler Borges França.

Aos funcionários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maria José Bezerra Cavalcanti e Maricé P. da Silva, pelo carinho dedicado e prestimosa ajuda.

Aos amigos Guilherme, Ednalda e Oswaldo, pela colaboração nas atividades experimentais e apoio de sua amizade.

A todos os colegas que indiretamente contribuíram para elaboração deste trabalho, sem medir esforços.

Ao pessoal do NTA por colocar à disposição alguns equipamentos auxiliares.

Enfim, aos funcionários do Laboratório de Engenharia Química, pelo auxílio na construção e montagem de alguns equipamentos, de modo especial a José Marques.

ABSTRACT

Annatto (*Bixa Orellana* L) is an important agricultural product in Paraíba, Northeastern of Brazil. To process the grains, drying and mechanical extraction by attrition of a high bixine content powder, the spouted bed technique was proposed with good perspectives of industrial application. In the present work, the fluidynamic behavior of fluidized and spouted bed of annatto seeds were studied. For the spouted bed, the cone-cylindrical configuration, with and without draft tube, was utilized. From the experimental results, the maximum and minimum spouting pressure drops as well as the minimum spouting velocity were evaluated. The data obtained in the conventional spouted bed were compared with those estimated from empirical correlations. Since these equations are not generalized they should give only approximated valuer for the parameters analyzed. To a understand more about the involved mechanisms in this process, a set of experiments was developed using a mixture of particles: the annatto seeds with the powder produced by attrition in different propontions. Because of the different properties of this mixture, the system is considered a pneumatic-spouted bed, combining the two behaviors. The preliminary results showed the following trends: an increase in the minimum spouting pressure drop, a decrease of the maximum pressure drop and of a maximum in the minimum spouting velocity with the increasing powder to seeds mass relation. From the measurements of the pressure drop in the annulus, the spout diameter and the air annular velocity were calculated. The air distribution in the annulus showed good agreement with the EPSTEIN et alli (1988) model. For scaling up, three equipments were used, with column diameters of 18.0 cm, 30.0 cm and 60.0 cm, all those with the draft tube. It has been observed that the minimum spouting velocity is greatest in the column of lowest diameter. Nevertheless, the minimum spouting and maximum pressure drops depend on both the relations column to inlet orifice diameter, and input orifice to draft tube diameter.

RESUMO

O urucum (*Bixa Orellana* L) é uma cultura de importância para a Paraíba. Para o processamento das sementes, a secagem e a extração mecânica por atrição de um pó rico em bixina, tem sido proposta a técnica do leito de jorro como alternativa de perspectivas promissoras. No presente trabalho, estudou-se o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado e do leito de jorro com sementes de urucum, utilizando configuração cone-cilíndrica convencional e não-convencional. Os resultados obtidos da fluidodinâmica permitiram uma avaliação dos parâmetros de queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e da velocidade de jorro mínimo. Os dados experimentais obtidos no sistema convencional foram comparados com estimativas fornecidas por correlações empíricas encontradas na literatura. Foi verificado que no estado atual da arte, estas correlações empíricas são apenas aproximações não podendo ser generalizadas. Para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos, foram realizadas algumas experiências em leito de jorro tradicional, usando misturas de partículas, sementes de urucum com o pó obtido por atrição, em diversas proporções. Por se tratar de mistura de partículas com características completamente diferentes, o sistema foi considerado um leito de jorro-pneumático, combinando os dois comportamentos. Os resultados preliminares mostraram a seguinte tendência: aumento da queda de pressão de jorro mínimo e diminuição da queda de pressão de pressão máxima com o aumento da relação massa de pó / massa de sementes. A partir dos perfis de pressão foram obtidos o diâmetro do jorro e os perfis de velocidade do gás no anel. Comparados com os modelos de MAMURO & HATTORI (1968) modificado por EPSTEIN et alii (1988) e LEFROY & DAVIDSON (1976) mostraram uma concordância razoável com o primeiro apresentando desvios da ordem de ± 0.03 m/s. No estudo de mudança de escala foram utilizados três equipamentos com diâmetros da coluna de 18.0 cm, 30.0 cm e 60.0 cm com sistema modificado utilizando um tubo central. Verificou-se que a coluna de menor diâmetro, apresenta valores da velocidade de jorro mínimo mais elevados, enquanto que para a queda de pressão mínima de jorro e queda de pressão máxima observou-se que estes parâmetros dependem simultaneamente das relações do diâmetro da coluna / diâmetro do orifício de entrada do ar e, do diâmetro do orifício de entrada do ar / diâmetro do tubo.

NOMENCLATURA

- A_a - Área do anel (m^2)
- A_c - Área da coluna (m^2)
- A_j - Área do jorro (m^2)
- A_t - Área do tubo central (m^2)
- B - Parâmetro da equação (25)
- D_c - Diâmetro da coluna (cm)
- D_i - Diâmetro do orifício de entrada do ar (cm)
- D_j - Diâmetro do jorro (cm)
- D_v - Diâmetro da partícula de igual volume (m)
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
- H - Altura do leito (cm)
- H_{mf} - Altura do leito expandido (m)
- H_{max} - Altura máxima jorrável (m)
- H_t - Altura do tubo central (m)
- K' - Parâmetro da equação 26
- L_e - Distância entre orifício de entrada do ar e a parte inferior do tubo central (m)
- M_{po} - Massa inicial de pó (kg)
- M_s - Massa de sementes de urucum (kg)
- ΔP_{jm} - Queda de pressão mínima de jorro (Pa)

- ΔP_{\max} - Queda de pressão máxima (Pa)
- r - Posição radial genérica (m)
- R_c - Raio da coluna (m)
- U - Velocidade superficial do ar (m/s)
- U_a - Velocidade superficial do ar na região anular (m/s)
- $\langle U_a \rangle$ - Velocidade média do gás na região anular (m/s)
- U_{aH} - Velocidade superficial do ar no anel em $Z = H$ (m/s)
- $U_{aH\max}$ - Velocidade superficial do ar no anel em $Z = H_{\max}$ (m/s)
- U_{jm} - Velocidade superficial de jorro mínimo (m/s)
- U_{mf} - Velocidade superficial de mínima fluidização (m/s)
- V_j - Velocidade das partículas no jorro (m/s)
- V_{pt} - Velocidade das partículas na parede do tubo central (m/s)
- V_w - Velocidade das partículas na parede da coluna (m/s)
- W - Peso do leito (kg)
- W_g - Vazão do gás (kg/s)
- W_s - Taxa de circulação de sólidos (g/s)
- Z - Coordenada axial genérica (m)

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

- G_a - Número de Galileu, $[g \, d_p^3 \, \rho_g (\rho_s - \rho_g) \mu^2]$
- Re_{mf} - Número de Reynolds em condições de mínima fluidização, $(\rho_g U_{mf} d_v / \mu)$

SÍMBOLOS GREGOS

- γ - Ângulo de atrito
- ϵ - Porosidade do leito fixo
- ϵ_a - Porosidade da região anular
- ϵ_j - Porosidade do jorro
- ϵ_{mf} - Porosidade de mínima fluidização
- θ - Ângulo do cone
- μ - Viscosidade do ar (kg/ms)
- ρ_g - Densidade do gás (kg/m³)
- ρ_s - Densidade do sólido (kg/m³)
- ϕ - Esfericidade
- ψ - Fator de forma da equação (26)

ÍNDICE

CAPÍTULO I

Introdução.....	01
-----------------	----

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Leito Fluidizado.....	04
2.1.1 - Fenômenos de Fluidização por um Gás.....	04
2.1.2 - Velocidade e Porosidade de Mínima Fluidização.....	06
2.2 - Leito de Jorro.....	07
2.2.1 - Considerações Gerais.....	07
2.2.2 - Curvas Características.....	11
2.2.3 - Altura Máxima de Jorro Estável.....	14
2.2.4 - Mudança de Escala.....	15
2.2.5 - Circulação de Sólidos.....	17
2.2.6 - Modelos de Distribuição de Gás na Região Anular do Leito de Jorro.....	19
2.2.7 - Diâmetro do Jorro.....	23

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais.....	25
3.2 - Equipamentos.....	26
3.2.1 - Coluna A.....	27
3.2.2 - Coluna B.....	28
3.2.3 - Coluna C.....	28
3.2.4 - Equipamentos Auxiliares.....	28
3.3 - Metodologia Experimental.....	29
3.3.1 - Leito Fluidizado - Curvas Características.....	29

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O urucuzeiro (*Bixa Orellana* L) é uma cultura que representa hoje para a Paraíba a oportunidade de abrir um novo campo de expansão de atividades agrícolas, industriais e de comércio com repercussões significativas no valor da produção, na arrecadação de impostos, no emprego e na renda do Estado.

A *Bixa Orellana* L é um arbusto nativo da família bixácea que vegeta em ecossistemas florestais localizados na América Tropical. É considerada uma planta permanente, de rápido crescimento, podendo atingir de 40 a 50 anos com pleno desenvolvimento vegetativo e produtivo, e alcançando uma altura de até 4 metros, sem necessitar de muita água. Têm folhas codiformes normalmente grandes, de cor verde ou verde violeta, grandes flores hermafroditas de coloração branca, rósea e lilás, com racemo formado por cápsulas das mais diferentes formas e várias sementes denominadas de urucum.

Existem diversas variedades de urucum segundo CORRIÇO (1987): a peruana do Peru, a Nova Guiné e as do Brasil, a papua, a cabeça de moleque, a fucinho de porco e a Wagner.

Devido às promissoras condições de mercado internacional de corantes naturais, existem desde 1982, segundo OLIVEIRA (1989) plantações organizadas no país. De acordo com CANTO (1989), os principais estados brasileiros produtores, são: São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná e Amazonas. O urucuzeiro foi

introduzido no brejo paraibano, mais precisamente no município de Bananeiras, pelo agricultor Luiz Bezerra em 1946, segundo MELLO & LIMA (1989).

As sementes dos urucuzeiros são cobertas por uma camada vermelha contendo a bixina, que é um corante natural, em grande concentração, e o éster monometílico de um ácido dicarboxílico denominado norbixina em menor quantidade. Devido às crescentes restrições impostas à utilização de corantes sintéticos pela Organização Mundial da Saúde, a bixina tem sido muito empregada, principalmente, nas indústrias de alimentos, cosméticos e farmacológicos, pois além de não apresentar problemas de toxidez ela também não tem ação cancerígena. Dos produtos que utilizam corantes provenientes da semente de urucum, destacam-se as da indústria têxtil (algodão e seda), a manteiga, o queijo, chocolate, cera para assoalhos, graxa para sapatos, óleo para o cabelo e os da indústria de refrigerantes. Segundo DAMASCENO (1988), a bixina e seus derivados ocupam lugar proeminente em se tratando do tom amarelo-alaranjado.

O teor de bixina na semente depende da cultura, solo, clima, tratos culturais, beneficiamento, entre outros fatores. CARVALHO (1989) mostra valores do teor de bixina em sementes de urucum menor que 1% e superior a 4%. SILVA (1991) revela em seu trabalho que o teor de bixina para diversas sementes de diferentes regiões varia consideravelmente. O teor mínimo de corantes exigido pelos importadores é de 2,5%, daí a necessidade de se produzir sementes de urucum de boa qualidade isentas de impurezas.

Para a preservação da qualidade do produto (urucum), a secagem é o processo mais utilizado, contudo em muitos casos é feita de forma natural causando uma desvalorização do produto no que se refere ao teor de bixina em virtude da sua exposição descontrolada a luz e ao calor solar, MELLO & LIMA (1989).

A utilização de secadores mecânicos, com elevadas temperaturas do ar de secagem, vem crescendo a cada ano, devido principalmente a:

- (1) não depender das condições meteorológicas;

- (2) permitir colheita antecipada;
- (3) diminuir a incidência de fungos e insetos;
- (4) possibilitar a centralização do beneficiamento dos grãos em cooperativas ou companhias estaduais de armazenamento.

Uma alternativa para viabilizar a secagem de sementes de urucum, o leito de jorro, foi proposta por BARRETO et alli (1989), SILVA (1991) e ALSINA & SILVA (1991), que mostraram que esta técnica seca eficientemente sem degradar consideravelmente a bixina presente no urucum, fornecendo ainda como subproduto através do processo de atrição, puramente mecânica, um concentrado em pó com teor de bixina de aproximadamente 10 a 20%, em secadores de leito de jorro.

Com base nestas conclusões, o presente trabalho de dissertação tem como objetivo geral estudar o comportamento fluidodinâmico de sementes de urucum em leito de jorro cone-cilíndrico, convencional e com tubo central, pois o conhecimento das variáveis fluidodinâmicas envolvidas no processo é de fundamental importância para o entendimento dos mecanismos relacionados ao processo de secagem e à produção de pó pelo processo de atrição mecânica do urucum. São realizados estudos de ampliação de escala em leito de jorro com tubo central e, também um estudo em leito fluidizado de sementes de urucum para determinação da porosidade e velocidade mínima de fluidização.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Leito Fluidizado

2.1.1 - Fenômeno de Fluidização por um Gás

O termo "leito fluidizado" é usado geralmente para designar um sistema multifásico em que uma carga de partículas sólidas é suspensa por uma corrente de gás ou líquido. É denominada "fluidização" porque neste estado as duas fases do sistema sólido/fluido comportam-se de forma similar a um líquido homogêneo, MARTIN (1982).

A fluidização pelo gás é um processo realizado para manter um contato gás e partículas sólidas. A Figura 2.1 mostra este fenômeno. O leito fluidizado consta basicamente de uma coluna vertical, tendo em sua parte inferior uma placa porosa, que sustenta o leito de partículas. Ao introduzir-se, homogeneamente, na base da coluna uma corrente de ar, observam-se diferentes fenômenos, que são relacionados a seguir:

- (1) a baixas velocidades do ar, o leito de partículas comporta-se como um leito fixo e o ar escoava através dos espaços vazios entre as partículas. Ver Figura 2.1a;
- (2) a medida que a velocidade do ar é aumentada as partículas se rearranjam oferecendo menor resistência a passagem do gás. O leito se expande subitamente. Todavia, a perda de carga equilibra-se ao peso das partículas. Ver Figura 2.1b;

- (3) acima da velocidade especificada em (2), o leito comporta-se como um fluido e denomina-se leito fluidizado. Ver Figura 2.1c;
- (4) com o contínuo aumento da velocidade do ar, nota-se a formação de algumas cavidades gasosas, denominadas bolhas. Ver Figura 2.1d;
- (5) o tamanho das bolhas cresce com o aumento da velocidade do gás e com a altura do leito. Quando o diâmetro desta é comparável ao diâmetro da coluna, o leito comporta-se como regime de pistonagem. Ver Figura 2.1e;
- (6) quando a velocidade do ar é muito alta, as partículas são arrastadas pelo gás e escapam da coluna, ocorrendo um transporte pneumático. Ver Figura 2.1f;

Nas etapas b, c, d e e a perda de carga através do leito é constante.

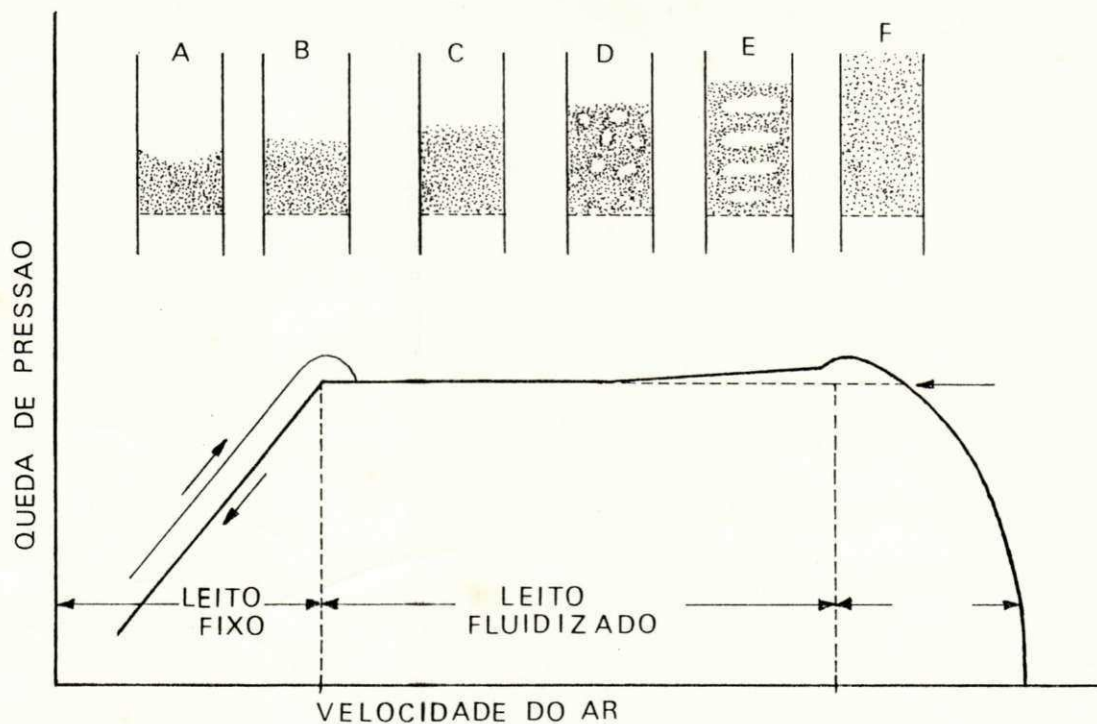


Figura 2.1. Descrição de um Fenômeno de Fluidização por um Gás
MURACHMAN, B. (1990)

O comportamento hidrodinâmico dos leitos fluidizados depende de vários fatores onde os mais importantes são essencialmente a natureza e o tamanho das partículas. Segundo a classificação de GELDART (1986), a semente de urucum está na categoria D de partículas, a qual se caracteriza por um jorro de boa qualidade.

2.1.2 - Velocidade e Porosidade de Mínima Fluidização

Um grande número de correlações são propostos para determinar a velocidade de mínima fluidização U_{mf} . A Tabela 01, mostra algumas correlações utilizadas no presente trabalho. Contudo, determinou-se experimentalmente U_{mf} pelo método clássico proposto por RICHARDSON (1971), citado por MURACHMAN (1990).

TABELA 01: Correlações Empíricas para Determinação da Velocidade Mínima de Fluidização (Ver no Apêndice 02 as limitações referentes a estas Correlações)

AUTOR	CORRELAÇÃO
BABU et alli (1978)	$R_{emf} = (25,25 + 0.0651 Ga)^{\frac{1}{2}} - 25,25$ (1)
SAXENA et alli (1977)	$R_{emf} = (25,28 + 0.0571 Ga)^{\frac{1}{2}} - 25,28$ (2)
ERGUN (1951, 1952a e b)	$R_{emf} = \left[\left(\frac{42,857 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi} \right)^2 + \frac{\epsilon_{mf}^3 \phi Ga}{1,75} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{42,857 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi}$ (3)

A porosidade mínima de fluidização para diversas partículas sólidas foi determinada por BOTTERIL et alli (1982a e b) e LUCAS (1986), através das medidas de perda de carga e expansão do leito realizadas à diferentes velocidades do ar. Os primeiros autores propõem traçar a curva $\epsilon = f(\ln U/U_{mf})$ e o segundo autor a curva de $\ln(\epsilon^3 / 1 - \epsilon) = f(\ln U/U_{mf})$. O valor da ϵ_{mf} é obtido por extrapolação dos resultados em $U/U_{mf} = 1$. MURACHMAN (1990) propõe a determinação da ϵ_{mf} à partir da expansão do leito, utilizando-se a seguinte equação:

$$E_{mf} = 1 - \frac{W / A_c}{H_{mf} (\rho_s - \rho_g)} \quad (4)$$

Onde,

W, é a massa do leito

A_c, é a área da seção transversal do escoamento

H_{mf}, expansão total do leito obtida utilizando uma escala graduada na parte interior da parede da coluna.

2.2 - Leito de Jorro

2.2.1 - Considerações Gerais

Com objetivo de promover o contato íntimo entre um fluido e partículas razoavelmente grandes que apresentam uma fluidização incipiente, MATHUR & GHISLER (1955) desenvolveram o leito de jorro. Esta técnica é aplicada com eficiência à secagem de grãos, pastas e suspensões, à granulação e ao recobrimento de partículas.

O leito de jorro mostrou-se muito promissor e já em 1963, implantaram-se no Canadá unidades industriais para a secagem de ervilha, lentilha e fibras de linho. Também unidades de resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização, entre outras, são citadas por MATHUR & EPSTEIN (1974).

Como descrito inicialmente, o leito de jorro consta de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica, em cuja extremidade inferior está localizado o orifício de entrada do gás. O jorro é formado pela penetração deste gás através do leito de partículas sólidas. Quando a vazão do gás é suficiente para provocar o movimento ascendente das partículas, a circulação principia, formando uma região central denominada jorro, de alta porosidade e maior velocidade, tanto das partículas quanto do gás. Nesta região as partículas sólidas são arrastadas pneumáticamente, formando no topo uma fonte de

sólidos que se espalham radialmente, descendo pelo espaço anular que envolve o jorro, em contra-corrente com o gás. Esta região é caracterizada pela baixa porosidade ($\epsilon = \epsilon_{mf}$) e pelo movimento descendente das partículas, cujo comportamento assemelha-se ao de um leito deslizante. O movimento cíclico das partículas é caracterizado pelo retorno das mesmas ao jorro na região inferior da base tronco-cônica, ocorrendo em seguida a inversão no sentido do movimento (de descendente para ascendente).

MUJUNDAR (1989) enfatizou algumas limitações na utilização do leito de jorro como proposto inicialmente por MATHUR & GHISLER (1955), que são relacionadas abaixo:

- (1) alta perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- (2) dimensões geométricas do leito de jorro limitadas para uma operação eficiente;
- (3) fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- (4) faixa operacional limitada;
- (5) capacidade por unidade de espaço físico limitada;
- (6) dificuldades na mudança de escala.

O leito de jorro convencional sofreu muitas modificações objetivando superar algumas das limitações acima relacionadas, surgindo, então, diferentes tipos, dentre os quais o leito de jorro cônico. Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), este tipo de geometria foi amplamente discutida por ROMANKOV e RASHKOVSKAYA, entre outros.

Nos últimos dez anos, pesquisadores brasileiros têm desenvolvido inúmeros trabalhos referentes ao leito de jorro cônico. PERES et alli (1988), estudaram a caracterização física das partículas de xisto em leito de jorro cônico e fizeram o levantamento dos parâmetros dinâmicos do leito para amostras de diferentes granulometria. MASSARANI et alli (1992) estudaram a produção de concentrado de urucum em leito de jorro cônico durante o processo de secagem. BARROSO (1984) estudou a secagem de soja no leito de jorro cônico com tubo central, e, verificou uma redução na transferência de calor ar-leito de cerca de 40%, em relação a configuração sem tubo interior.

Em relação à geometria, vem sendo estudado como uma solução para o problema da capacidade do leito de jorro tradicional, o leito de jorro retangular.

MUJUNDAR (1989) faz uma síntese dos vários tipos de leito de jorro quanto a geometria, ao mecanismo que promove o jorro, a entrada do ar, às modificações internas, ao leito de partículas, à área da secção transversal do leito, ao tipo de operação e as possíveis modificações no modo de promover o contato entre o fluido e as partículas.

PASSOS et alli (1989) estudaram a dinâmica do leito de jorro fluidizado bidimensional, concluindo que este pode ser uma das possíveis opções para solucionar o problema de mudança de escala do leito de jorro convencional.

A mais importante alteração interna ocorrida no leito de jorro convencional, com objetivo de superar algumas das limitações apresentadas por MUJUNDAR (1989), consiste na introdução de um tubo central, que separa as regiões do jorro e do anel evitando o contínuo curto-circuito que ocorre entre as partículas descendentes do espaço anular e o jorro. Uma separação entre o tubo e a entrada do ar possibilita o deslocamento das partículas da região anular para o jorro. ZULKE et alli (1987), no trabalho citado anteriormente mostraram que para o sistema de leito de jorro com tubo central estudado, a melhor distância entre o orifício de entrada do ar na coluna e a parte inferior do tubo central foi de 6.0 cm, apresentando melhor circulação de sólidos. De acordo com

MAEGAVA et alli (1987), o uso de maiores distâncias entre a entrada do gás e a extremidade inferior do tubo central permite obter um transporte pneumático mais denso na região do jorro aumentando a eficiência de contato gás-sólido, contudo o jorro tende a tornar-se menos estável.

MUJUNDAR (1989) cita algumas vantagens quando da utilização do tubo central, entre elas destacam-se:

- (1) pode ser aplicado para qualquer sólido que possa ser arrastado pneumaticamente, numa larga faixa de tamanho e uniformidade de partículas;
- (2) a recirculação de sólidos inicia-se a menores quedas de pressão;
- (3) altura e o diâmetro do leito podem ser alterados substancialmente;
- (4) são requeridas menores vazões do gás para uma dada circulação de sólidos; e
- (5) a taxa de recirculação de sólidos pode ser variada independentemente do diâmetro da coluna, altura do leito e tamanho da partícula, bastando variar a distância entre o orifício de entrada do gás e a extremidade inferior ao tubo central.

Algumas desvantagens quando da utilização desta configuração são relacionadas no mesmo artigo pelo autor, entre elas:

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

PALLAI & NEMETH (1972) sugeriram o uso de uma tela cilíndrica no lugar do tubo central convencional, de forma a provocar maiores trocas de gás entre o jorro e o anel, e, verificaram que a distribuição do tempo de residência é menor que a observada no leito de jorro convencional. KHOE & VAL BRAKEL (1980) e CAFLIN & FANE (1981) estudaram o leito de jorro com tubo central na secagem e desinfecção térmica de trigo, respectivamente, e observaram que o uso desta técnica limita necessariamente o fluxo de gás na região do anel. CAFLIN & FANE (1983) verificaram que o uso da tela cilíndrica não aumenta o fluxo de gás no anel, diminuindo apenas as limitações de tamanho do sólido. ZULKE et alli (1987) estudaram o leito de jorro com aeração complementar e observaram, a princípio, não haver limitações para a carga de partículas quando se utilizava o tubo central. MAEGAVA et alli (1987) realizaram estudos fluidodinâmicos em leito de jorro cônico, quadrado e tipo fenda todos com tubo central, constatando que a utilização deste exige uma menor perda de carga para que se possa obter o jorro, aliado à possibilidade de se operar o leito a menores vazões. DUTRA (1984) estudou a dinâmica do leito de jorro com tubo central e observou que o uso do mesmo ocasiona menores vazões de ar e quedas de pressões em todos os estágios do leito de jorro. GIUDICI et alli (1983) verificaram que a queda de pressão de jorro estável pela introdução de uma tela cilíndrica central, independe da altura do leito, sendo função linear da velocidade superficial. A perda de carga do jorro convencional no referido trabalho mostrou-se ser 1.5 a 3.0 vezes à perda de carga do jorro modificado.

2.2.2 - Curvas Características

Algumas etapas são ultrapassadas antes de obtermos o movimento cíclico e permanente, onde ocorre a transição do leito fixo para o leito de jorro, todas etapas são apresentadas na Figura 2.2 através da curva característica de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar na coluna.

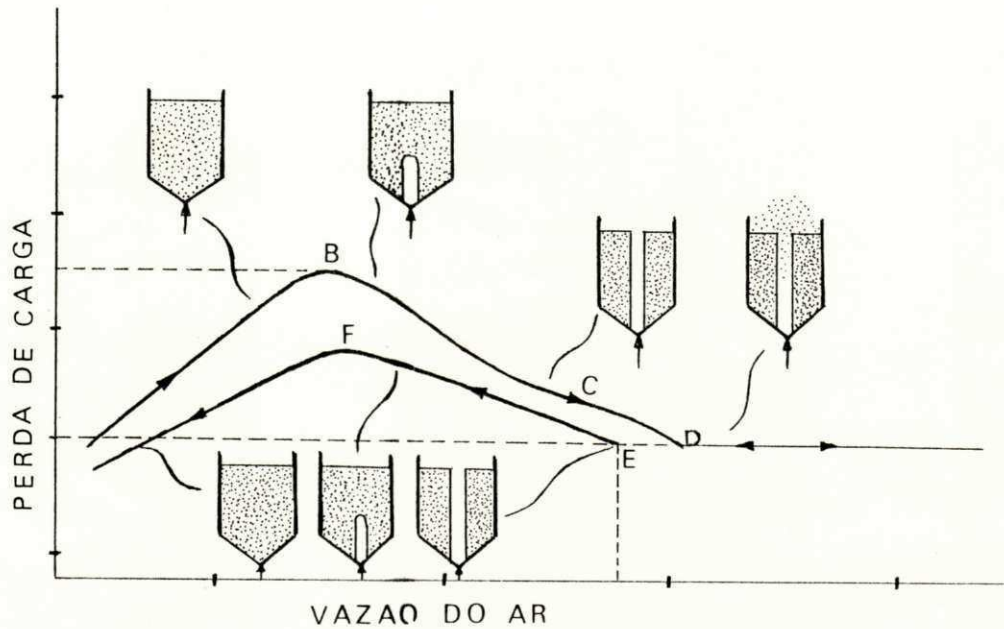


FIGURA 2.2. Curva Característica em Leito de Jorro para um Sistema Ar-Soja.
COUTINHO, P. L. A. (1983).

Em pequenas vazões, o gás percola através do leito de partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Aumentando-se a velocidade, forma-se próximo ao orifício de entrada do ar uma cavidade provocada pelo deslocamento das partículas próximas 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 ΔP_{max} . 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 e, no caso de leitos mais profundos, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno. Um pequeno acréscimo da velocidade além do ponto C, promove um jorro incipiente próximo a superfície do leito, de modo que a pressão cai, até o ponto D, no qual o jorro aflora através da superfície, tomando-se neste ponto a perda de carga constante 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. Prosseguindo-se a 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 à medida que a velocidade decresce.

A partir da determinação experimental das curvas características em leito de jorro, são relacionados os estudos fluidodinâmicos de perda de carga máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade mínima de jorro. Contudo, necessário se faz uma previsão destes parâmetros fluidodinâmicos pois é de grande importância quando se projeta o equipamento, principalmente no que se refere ao dimensionamento do soprador.

A literatura pesquisada dispõe de diversas correlações no que concerne ao leito de jorro convencional, na sua maioria empíricas, que embora muitas vezes possam apresentar resultados contraditórios e estejam limitadas à faixas operacionais restritas, fornecem previsão das variáveis fluidodinâmicas, possibilitando assim uma estimativa razoável dos parâmetros do projeto.

O uso do tubo central acrescenta novas variáveis à geometria do equipamento: o diâmetro do tubo, a distância do tubo a base e o comprimento do tubo. Segundo DUTRA (1984), a introdução do tubo central modifica os valores dos parâmetros fluidodinâmicos e, nos trabalhos consultados, existe apenas uma correlação que procura descrever este novo comportamento.

Na Tabela 02, são apresentadas as correlações utilizadas no presente trabalho.

TABELA 02: Resumo das Correlações para o Cálculo da Velocidade Mínima de Jorro, Queda de Pressão de Jorro Mínimo e Queda de Pressão Máxima. (Ver no Apêndice 02, as limitações referentes a estas Correlações)

AUTOR	GEOMETRIA	CORRELAÇÃO
GISHLER (1955)	Cone-Cilíndrica	$U_{jm} = \left(\frac{dp}{Dc}\right) \left(\frac{Di}{Dc}\right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$
SMITH E REDDY (1964)	Cone-Cilíndrica	$U_{jm} = dp \left[\frac{g(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g Dc}\right]^{\frac{1}{2}} \left[0,64 + 26,8 \left(\frac{Di}{Dc}\right)^2\right] \left[\frac{H}{Dc}\right]^{(0,5 + 1,76 \frac{Di}{Dc})} \quad (6)$
ABDELRAZEK (1969)	Cone-Cilíndrica	$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left\{ \left(\frac{dp}{Dc}\right) \left(\frac{Di}{Dc}\right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}\right]^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right\} \quad (7)$
MALEK et alli (1955)	Cone-Cilíndrica	$\Delta P_{jm} = 2 Mg / 3 Ac \quad (8)$
LEFROY e DAVIDSON(1969)	Cone-Cilíndrica	$\Delta P_{jm} = (\rho_s - \rho_g) (1 - \epsilon) (2 H/\pi)g \quad (9)$
NASCIMENTO (1976)	Cone-Cilíndrica	$\Delta P_{jm} = 0,67 (1 - \epsilon mf) H \rho_s g \quad (10)$
THORLEY et alli (1959)	Cone-Cilíndrica	$\Delta P_{max} = (\rho_s - \rho_g) (1 - \epsilon) Hg \quad (11)$
GRBAVCIC (1976)	Cone-Cilíndrica	$\Delta P_{max} = 1,2 Hg (\rho_s - \rho_g) (1 - \epsilon) \quad (12)$

2.2.3 - Altura Máxima de Jorro Estável

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

THORLEY et alli (1978), MANURUNG (1978) e REDDY et alli (1981), citados por COUTINHO (1983), obtiveram valores aproximados para H_{max} a partir do cálculo de U_{jm} , admitindo que em $H = H_{max}$ este valor se aproxima da velocidade de mínima fluidização.

Os modelos de fluidização de partículas sólidas por um jato de ar são de fundamental importância, pois a partir da Emf e U_{mf} podemos através de correlações empíricas prever a altura máxima do leito capaz de jorrar. A Tabela 03, apresenta algumas correlações empíricas para determinação de H_{max} .

TABELA 03: Resumo das Correlações para o Cálculo da Altura Máxima do Leito capaz de Jorrar. (Ver no Apêndice 02 as limitações referentes a estas Correlações)

AUTOR	CORRELAÇÃO
LEFROY e DAVIDSON (1968)	$H_{max} = 0,67 D_c^{1/3} / D_i^{1/3}$ (13)
GRBAVCIC et alli (1976)	$\frac{H_{max}}{D_c} = 0,347 \left(\frac{D_c}{D_i}\right)^{0,41} \left(\frac{D_c}{dp}\right)^{0,31}$ (14)
THORLEY et alli (1959)	$U_{mf} = \left(\frac{dp}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3} \left[\frac{2g H_{max} (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/2}$ (15)

Estas expressões são ainda insuficientes para uma avaliação acurada da altura máxima jorrável, isto devido talvez à própria dificuldade na obtenção experimental desta variável. Além deste fato, não há qualquer referência a respeito da determinação de H_{max} em colunas de diâmetro elevado, o que diminui a confiabilidade da estimativa para colunas industriais, segundo COUTINHO (1983).

2.2.4 - Mudança de Escala

O estudo de ampliação de escala é muito complexo tendo em vista que a literatura especializada apresenta correlações empíricas que descrevem apenas o comportamento fluidodinâmico de uma determinada geometria. RÉ & FREIRE (1986), em estudos sobre secagem de sangue animal em leito de jorro, verificaram que uma análise preliminar de mudança de escala apresentou dificuldades no processo, para uma ampliação 4.6 vezes, então estes sugeriram que o projeto de secadores em leito de jorro

deveria incluir escalas intermediárias entre bancada e industrial. Segundo PASSOS et ali (1989), o leito de jorro fluidizado vem ganhando espaço na secagem de materiais granulados, sendo uma das possíveis opções para solucionar o problema de ampliação de escala do leito de jorro convencional.

Um problema para ampliação de escala em leito de jorro é o processo de atrição mecânica. Em geral, a atrição entre as partículas sólidas é menor em uma escala maior, porém, para estudo de mudanças de escala deve-se fazer uso de escalas intermediárias, de acordo com MATHUR & EPSTEIN (1974).

MATHUR & EPSTEIN (1974) mostram alguns resultados que concernem a observação do processo de atrição de partículas analisado por diversos pesquisadores e, também, a redução do leito de sólidos durante o jorro, realizado por HAJI-ZAINALI et ali (1970), para diferentes diâmetros do orifício de entrada do ar, ângulo do cone, altura do leito e velocidade do gás. O autor cita, também, que não existem correlações para ampliação de escala com relação à diminuição do tamanho da partícula, porém alguns fatores envolvidos são apresentados qualitativamente.

Segundo BARRETO et ali (1989), a simples manipulação das cachopas maduras do urucuzeiro evidencia o desprendimento da bixina existente na superfície das sementes. Trata-se da remoção parcial, por atrito e por impacto, da ordem de 0.1mm, o que dificulta ainda mais o estudo de mudança de escala.

NEMETH & PALLAI (1983), em estudos sobre a ampliação de escala de secadores de leito de jorro, mostram dois problemas relacionados nesse processo: determinar a faixa de aplicabilidade das correlações usadas para o dimensionamento do secador; e estabelecer meios para minimizar as dificuldades encontradas na ampliação de escala, que incluem a queda de pressão máxima estabelecida no leito, a distribuição desigual do tempo de residência das partículas e, ainda, o fato de que a vazão de ar é determinada pela manutenção do movimento característico do leito de jorro e, não pelas condições de equilíbrio da secagem.

2.2.5 - Circulação de Sólidos

THORLEY et alli (1955), obtiveram resultados de circulação de sólidos a partir de medidas de velocidade das partículas na parede plana de uma coluna semicircular transparente, traçando suas linhas de trajetória. Observaram que esta velocidade seria uma boa aproximação da velocidade média das partículas no anel, ou um indicador da vazão de sólidos que descem nesta região em contra-corrente com o gás. Desta forma:

$$W_s = V_w A_a \rho_s (1 - \epsilon_a) \quad (16)$$

Em estado estacionário,

$$W_s = V_j A_j \rho_s (1 - \epsilon_j) \quad (17)$$

Sendo assim, através de medidas da velocidade das partículas ao longo da seção cilíndrica da coluna circular completa, obtém-se a vazão de sólidos que atravessa um dado plano horizontal da porção cilíndrica do leito. Na região cônica, as linhas de trajetória das partículas são desviadas pela inclinação do cone e a velocidade das partículas na parede da coluna deixa de ser um indicador representativo da taxa de circulação de sólidos.

CHATTERJEE (1970) determinou a taxa de circulação de sólidos de acordo com o modelo de mistura das partículas coloridas usadas como traçador. Os dados obtidos mediante este modelo, para leitos de areia, carvão e mostarda, foram similares em ordem de magnitude aos encontrados por THORLEY et alli (1955) para o trigo.

BERRUTI et alli (1989) mediram a taxa de circulação de sólidos em leitos de jorro e leito de jorro fluidizado com tubo central, utilizando uma célula de medidas tipo "peneira" colocada sobre a região anular. A vazão de sólidos foi determinada pesando-se a massa de partículas coletadas na célula em um tempo pré-estabelecido. Seus resultados mostram que a circulação de sólidos aumenta com a velocidade do ar, atingindo um

valor máximo numa determinada velocidade do gás, passando então a decrescer. LIMA (1992) e LIMA et alli (1992), fazendo uso da mesma técnica para determinação da taxa de circulação de sólidos, observaram o mesmo comportamento de W_s em relação a velocidade do gás e também verificaram que para uma dada vazão de ar, o aumento da carga de inerte não implica numa melhor performance do secador, pois a circulação de sólidos permanece praticamente constante.

HADZISMAJLOVIC et alli (1992), determinaram a taxa de circulação de sólidos, seguindo visualmente as partículas na parede da coluna e determinando o tempo gasto para percorrer uma determinada distância.

Na Tabela 04, estão relacionadas equações empíricas obtidas a partir de dados experimentais de autores que utilizaram a técnica proposta por THORLEY et alli (1955).

TABELA 04 - Taxa de Circulação de Sólidos

AUTOR	CORRELAÇÃO
THORLEY et alli (1955)	$W_s = K \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,25} \left(\frac{U_c}{U_{jm}} \right)^{1,29} \frac{H}{D_c}$ $K=0,563; D_c=0,61m$ $K=0,068; D_c=0,15m$ (18)
CHATTERJEE (1970)	$W_s = 0.24 \left(\frac{U_c}{U_{jm}} \right) \frac{dp^{0.2}}{\rho_s^{0.17}}$ (19)

GRBAVCIC et alli (1987), estudaram a hidrodinâmica através de um leito de jorro fluidizado com tubo central e determinaram a taxa de circulação de sólidos a partir da equação, abaixo:

$$W_s = (1 - \epsilon_t) \rho_s A_t V_{pt} \quad (20)$$

Onde, a fração de sólidos no topo do tubo central, $(1 - \epsilon_t)$ foi determinada utilizando medidas do valor de $(dp/dz)_t$.

$$(-dp/dz)_t = (1 - \epsilon_t) (\rho_s - \rho_g)g. \quad (21)$$

2.2.6 - Modelos de Distribuição de Gás na Região Anular do Leito de Jorro

GISHLER (1955), EPSTEIN et alli (1978), MATTHEW et alli (1988), entre outros, a partir de medidas longitudinais dos gradientes de pressão estática próximo a parede da coluna e, considerando que o anel do leito de jorro assemelha-se em porosidade a um leito fixo expandido, determinaram o perfil axial 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. As medidas efetuaram-se na região cilíndrica da coluna, onde supõe-se que a queda de pressão é praticamente uniforme, perfil plano. Os resultados mostraram que, em escalas maiores, uma substancial fração da velocidade do gás é desviada para o anel e a sua proporção é maior em leitos mais rasos.

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

THORLEY (1959), GRBAVCIC et alli (1976), REYES & MASSARANI (1991) consideram que quando o jorro estável é propiciado, qualquer vazão adicional de 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.

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 na região do jorro é alta, este método não estaria sujeito a graves erros. Esta técnica foi utilizada por BECKER (1961), MAMURO & HATTORI (1968) e VAN VELZEN et alli (1972).

LIMA (1992) fez alguns relatos de modelos de perfis de pressão encontrados na literatura, para leito de jorro convencional e, são relacionados a seguir.

MAMURO & HATTORI (1968), baseados em análises do balanço de forças que atuam num elemento diferencial dz do anel, e assumindo que o fluxo de gás é governado pela lei de Darcy, determinaram o perfil longitudinal de velocidade do ar no anel, nas condições de altura máxima do leito jorrável ($H = H_{max}$) e, obtiveram o seguinte perfil:

$$\frac{U_a}{U_{mf}} = 1 - \left[1 - \frac{Z}{H_{max}} \right]^3 \quad (22)$$

MAMURO & HATTORI, utilizaram as seguintes condições de contorno:

(1) $Z = 0, U_a = 0$

(2) $Z = H_{max}, U_a = U_{afmax} = U_{mf}$

(3) $Z = H_{max}, -dp/dz = (-dp/dz)_{H_{max}} = (-dp/dz)_{mf} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \epsilon_a)g$

Os autores comprovaram a validade do modelo comparando suas previsões com dados experimentais obtidos de acordo com a utilização do tubo de Pitot.

Segundo EPSTEIN et alli (1978) diversos modelos de distribuição do gás no leito de jorro são encontrados na literatura especializada e se referem aos perfis axiais de velocidade do gás no anel. Os citados autores determinaram por extrapolação U_a em função da posição Z . Para $H = H_{max}$ obtiveram, $U_{aH_{max}} < U_{mf}$, aproximadamente $\pm 10\%$ abaixo. A equação de MAMURO & HATTORI (1968) modificado por EPSTEIN et alli (1978), torna-se, então:

$$\frac{U_a}{U_{afmax}} = 1 - \left(1 - \frac{Z}{H_{max}} \right)^3 \quad (23)$$

A partir de gradientes axiais de pressão GRBAVCIC et alli (1976) determinaram perfis longitudinais da velocidade do gás no anel e, observaram que U_a independe da posição Z para uma mesma carga de partículas sólidas. Baseado nesta observação, os autores propuseram para $Z = H$ a equação seguinte:

$$\frac{U_{aH}}{U_{mf}} = 1 - \left[1 - \frac{H}{H_{max}} \right]^3 \quad (23a)$$

EPSTEIN & LEVINE (1978) modificaram a equação proposta, inicialmente, por MAMURO & HATTORI (1968) e obtiveram a seguinte equação:

$$\frac{U_a}{U_{mf}} = \left[\text{sen} \frac{\pi \cdot Z}{2 \cdot H_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

LEFROY & DAVIDSON (1969) desenvolveram uma equação generalizada para qualquer altura do leito descrita abaixo:

$$U_a = B \cdot U_{mf} \text{sen} (\pi Z / 2H) \quad (25)$$

Onde:

$$B = \frac{1 + K' (D_c / H_{max})}{1 + K' (D_c / H)} \quad e$$

$$K' = [0,81(\text{tg}\psi)^{1,5} / \psi^{-2}] \left(D_c \cdot dp / D_i^2 \right)^{0,78} \quad (26)$$

Em $H = H_{max}$, $U_{mf} = U_{aH_{max}}$ e $B = 1$, logo, a equação torna-se:

$$\frac{U_a}{U_{mf}} = \text{sen} \left[\frac{\pi \cdot Z}{2 H_{max}} \right] \quad (27)$$

PICCININI et alii (1979) obtiveram a seguinte relação para o perfil axial de velocidade na região anular:

$$\frac{U_a}{U_{mf}} = 0,88 \left[1 - \left(1 - \frac{Z}{H_{max}} \right)^3 \right] \quad (28)$$

Os modelos relacionados acima referem-se ao leito de jorro convencional.

Em estudo hidrodinâmico de leito de jorro com tubo central, MATTHEW et alli (1988) propuseram uma expressão para o perfil axial de velocidade para partículas pequenas, num leito cilíndrico, com base plana (ver Equação 29). Os autores utilizaram líquido para promover o jorro.

$$U_z^* = \frac{-\Delta P_s}{H U_{mf} f_1} \left\{ \sum_{n=1}^N Y_n \alpha_n \times \left[I_0 \frac{(\lambda_n R^*) K_1(\lambda_n) + K_0(\lambda_n)}{I_0(\lambda_n)} (\lambda_n R^*) I_1(\lambda_n) \right] \times \text{sen}(\alpha_n Z_{a^*}) \right\} \quad (29)$$

Onde:

U_z^* = é a velocidade axial do ar adimensional, U_z / U_{mf}

ΔP_s = queda de pressão através do leito, Pa

H = altura do leito, mm.

U_{mf} = velocidade de mínima fluidização, mm/s.

$f_1 = \frac{150(1-\epsilon)^2 \mu g}{\epsilon^3 d_p^2}$

$\alpha_n = \lambda_n H / R_c$

R^* = distância radial adimensional, r / R_c

λ_n = constante de separação

A equação acima está baseada nas seguintes condições de contorno:

(1) $P^*(R^*, 1) = 0$ para $R_s/R_c \leq R^* \leq 1$

(2) $\frac{\partial P^*}{\partial R^*}(R^*, 0) = 0$ para $R_s/R_c \leq R^* \leq 1$

(3) $\frac{\partial P^*}{\partial R^*}(1, Z_{a^*}) = 0$ para $0 \leq Z_{a^*} \leq 1$

(4) $P^*(R_s/R_c, Z_{a^*}) = \frac{\Delta P_I}{\Delta P_s} \left[1 - \frac{Z_{a^*}}{L_a} \frac{(\Delta P_s / \Delta P_{mf}) Z_{a^*}}{(\Delta P_s / \Delta P_{mf}) Z_a} \right] + \frac{\Delta P_{II}}{\Delta P_s}$ para $0 \leq Z_{a^*} \leq L_a$

Onde:

P^* = pressão adimensional, $P/\Delta P_s$.

Z_a^* = distância axial adimensional, Z/H

ΔP_s = queda de pressão entre a entrada do ar e a entrada do tubo central, Pa

ΔP_{II} = queda de pressão através do tubo central, Pa

ΔP_{mf} = pressão de mínima fluidização, Pa

L_a = espaçamento adimensional do tubo central, ℓ/H

ℓ = distância do tubo central para a entrada de ar, mm.

2.2.7 - Diâmetro do Jorro

Através de diversas condições operacionais observa-se, na literatura, que o jorro não apresenta uma forma bem definida e que esta varia com o nível do leito, principalmente, próximo ao orifício de entrada do gás, onde pode ocorrer contração ou expansão repentina do jorro, afetando diretamente o perfil axial de velocidade do gás. Entretanto, os modelos teóricos relacionados com a fluidodinâmica do leito desprezam a variação axial ocorrida no diâmetro do jorro (D_j).

LITTMAN et alli (1988), obtiveram o diâmetro do jorro a partir da distribuição radial de pressão. Estes autores observaram que D_j variava entre 1.5 a 3.0 vezes o diâmetro de orifício de entrada do gás, porém, para análise teórica assumiram um valor constante do diâmetro do jorro.

LIMA (1992) determinou o diâmetro do jorro na extremidade superior do leito, utilizando perfis adimensionais de temperatura. O raio do jorro foi considerado como a medida que limita a queda de temperatura entre o centro e a região de temperatura uniforme. O autor observou que o diâmetro do jorro cresce com o aumento da vazão do ar e diminui com a altura do leito.

A Tabela 05, apresenta algumas correlações empíricas encontradas na literatura e que se referem a valores médios do diâmetro do jorro.

TABELA 05: Diâmetro do Jorro. (Ver no Apêndice 02 as limitações referentes a estas Correlações)

AUTOR	CORRELAÇÃO
ABDELRAZEK (1969)	$D_j = 0,319 D_c \left[\frac{U_{jm}}{(gH)^{\frac{1}{2}}} \right]^{0,33} \quad (30)$
MALEK et alli (1963)	$D_j = [0,115 \log(D_c) - 0,031] \left(\frac{W_g}{Ac} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (31)$
LEFROY & DAVIDSON (1969)	$D_j = 1,07 D_c^{\frac{2}{3}} d_p^{\frac{1}{3}} \quad (32)$
MIKHAILLK (1977)	$D_j = 10[0,115 \log(D_c) - 0,031] \left(\frac{W_g}{Ac \rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais

O material utilizado, sementes de urucum, para análise em leito fluidizado, leito de jorro e leito de jorro com tubo central foi proveniente do Sudeste cedido pela, então, Empresa São Braz. A umidade natural dos grãos variou de 13 à 18% em base seca. Também foi utilizado o pó obtido por atrição mecânica em leito de jorro, para realização de algumas experiências com mistura de partículas de características diferentes.

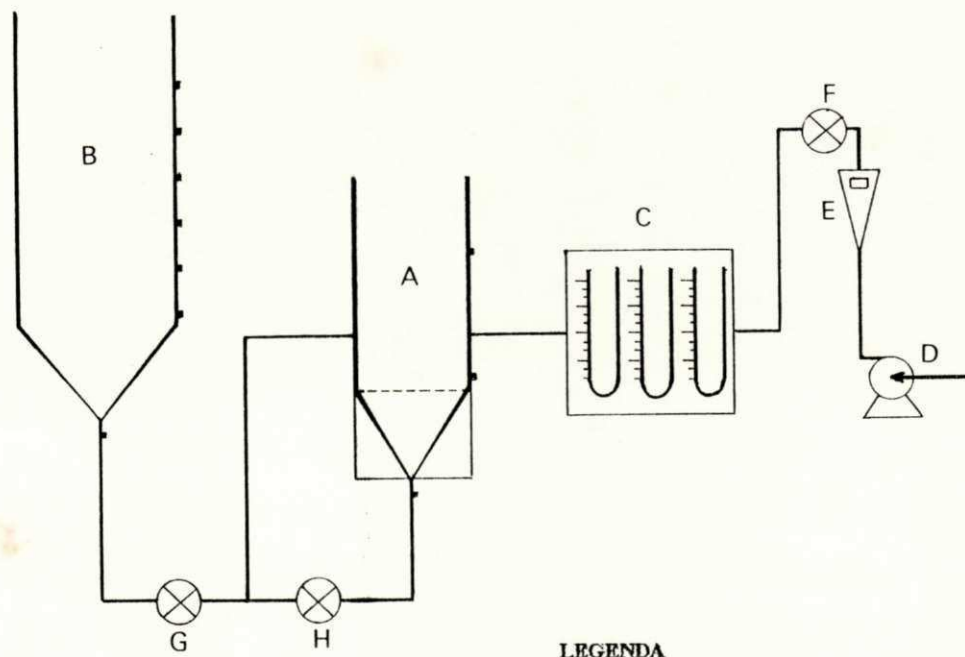
A caracterização das sementes de urucum, determinadas por técnicas usuais, encontra-se na Tabela 06, e foi obtida por SILVA (1993). A caracterização do pó é apresentada na Tabela 02 (Ver Apêndice 02).

TABELA 06: Caracterização das Sementes de Urucum

PROPRIEDADE	VALOR OBSERVADO	MÉTODO UTILIZADO
d_v	$3,414 \times 10^{-3} \text{ m}$	pelo volume do líquido deslocado
ρ_s	$1.263,56 \text{ kg/m}^3$	picnometria líquida
ϕ_1	0.815	leito fixo (Equação de Ergun), usado no presente trabalho
ϕ_2	0.694	Wen et Yu (1966)
ϕ_3	0.704	Curray (1951)
ϵ	0.396	medidas diretas a partir da definição

3.2 - Equipamentos

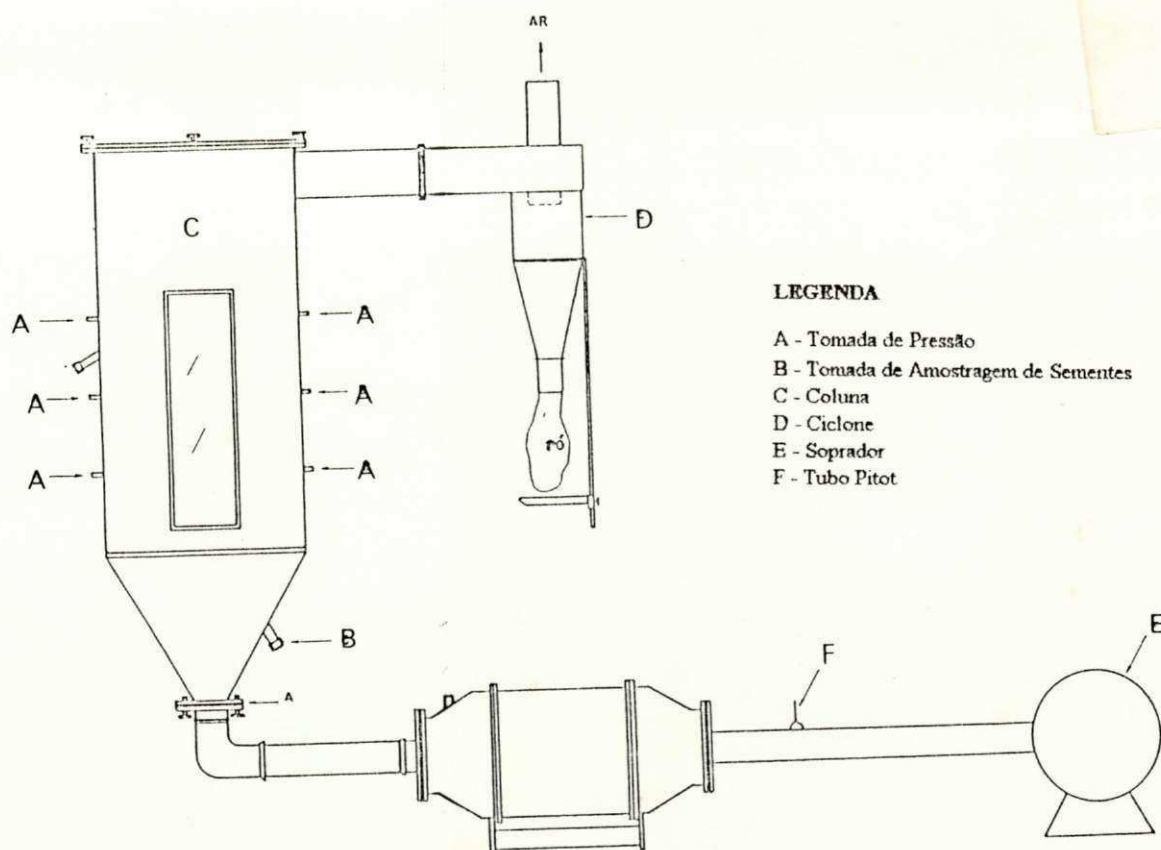
Nas experiências realizadas para obtenção dos dados em leito fluidizado e leito de jorro, foi utilizado um conjunto de equipamentos apresentado na Figura 3.1, que consiste basicamente de: um compressor radial (D) para impulsionar o ar; um rotâmetro (E) para medir a vazão do ar; colunas de enchimento (A, B) que são analisados com leito fluidizado e/ou leito de jorro; um manômetro diferencial em forma de U (C) que nos permite acompanhar a perda de carga no leito em função da variação de velocidade do gás. Também foi utilizada uma coluna (C), mostrada na Figura 3.2.



LEGENDA

- A - Coluna
- B - Coluna
- C - Manômetros Diferenciais
- D - Compressor Radial
- E - Rotâmetro
- F - Válvula Controladora da Velocidade do Gás
- G, H - Válvulas

FIGURA 3.1. Esquema de Aparelhagem



LEGENDA

- A - Tomada de Pressão
- B - Tomada de Amostragem de Sementes
- C - Coluna
- D - Ciclone
- E - Soprador
- F - Tubo Pitot

FIGURA 3.2. Sistema para Leito de Jorro.

3.2.1 - Coluna A

A coluna (A) utilizada como leito fluidizado, leito de jorro convencional e leito de jorro com tubo central consiste de uma coluna cilíndrica de, aproximadamente, 18 cm de diâmetro e 60 cm de altura com um distribuidor tronco-cônico de ar, com base de 60°. A coluna é isolada com uma camada de amianto de espessura de 1.5 cm, e sobre esta, uma camada de poliuretano de 1.0 cm de espessura. Possui seis furos, sendo três de cada lado espaçados igualmente e, onde são feitas as leituras de pressão estática. A relação D_c/D_i é igual a 3.6.

Quando realizavam-se experiências em leito fluidizado colocava-se na parte cônica esferas de vidro para uma melhor distribuição do ar na coluna e, acima destas uma tela de arame.

3.2.2 - Coluna B

A coluna (B) foi utilizada nas experiências em leito de jorro com tubo central. Consiste de uma câmara cilíndrica de 30 cm de diâmetro e 80cm de altura, com um distribuidor tronco-cônico do gás, com base de 60°. A coluna é isolada com uma camada de lã de rocha de espessura de 2.5 cm, possui dez furos, cinco de cada lado igualmente espaçados, onde são feitas as leituras de pressão estática através de manômetros diferenciais em forma de U. A relação D_c/D_i é igual a 6.0.

3.2.3 - Coluna C

A câmara de secagem do leito de jorro é apresentada na Figura 3.2. Consiste de uma base cônica de aço inoxidável com ângulo interno de 60° acoplado a uma coluna cilíndrica de inox de 60 cm de diâmetro e 100 cm de altura. A razão diâmetro da coluna (D_c/D_i) é de 8.3. O tubo central tem 120 cm de comprimento e 7.2 de diâmetro. A coluna cilíndrica possui dois visores em acrílico por onde se pode fazer o controle visual do desenvolvimento do jorro.

3.2.4 - Equipamentos Auxiliares

1. **Compressor radial**, tipo exportação, dotado de motor assíncrono trifásico, tipo S100 L2, com 4 CV e 2920 RPM, fabricado pela Metalúrgica Abramo EBERLE S/A - Caxias do Sul. Ind. Brasileira.

2. **Rotâmetro**, tipo R-2-V.C Haste, capacidade de 400 m³/h, fabricado pela OMEL S/A - Ind. Brasileira.

3. **Manômetros diferenciais tipo "U"**, contendo óleo ($\rho = 0,895 \text{ g/cm}^3$), para medidas de pressão estática.

4. **Cronômetro**, marca Gallenkamp, referência TKM 340 Y.

5. **Célula de Medidas de Circulação de Sólidos**; confeccionada em tela metálica, apresentando a forma de uma coroa circular com 29,5cm de diâmetro e, diâmetro interno de 5,0cm.

6. **Balança Sartorius**, tipo Sartorius GMBH Gottingen, capacidade 1000g, com precisão de leitura 0.1g, fabricada pela Sartorius, Alemanha Federal.

7. **Anemômetro de molinete**, leitura em m/min, nº 6/114650, fabricado pela VEB Anemometerban Dresden, Alemanha Federal.

3.3 - Metodologia Experimental

3.3.1 - Leito Fluidizado - Curvas Características

No estudo do comportamento fluidodinâmico desta técnica utilizamos a coluna A, descrita na seção 3.2.1. Adotou-se a sequência de trabalho relacionada abaixo nas condições operacionais apresentadas na Tabela 01 (Apêndice 1). Os ensaios foram realizados à 38°C.

(1) Pesagem do material a ser processado.

(2) Empacotamento do material sólido.

(3) Acionamento do compressor, aumentando-se gradativamente a vazão do gás e registrando-se a perda de carga correspondente. Este procedimento realizava-se até a abertura total da válvula controladora da velocidade do ar.

- (4) Fazia-se também, através de uma escala graduada na parede interna da coluna, a medida da expansão do leito, para determinação da porosidade de mínima fluidização.
- (5) Reduzia-se a vazão do ar cuidadosamente até a interrupção completa do fluxo de gás na coluna, anotando-se para cada decréscimo da velocidade a queda de pressão correspondente.

3.3.2 - *Velocidade e Porosidade Mínima de Fluidização*

A velocidade de mínima fluidização foi determinada a partir do método clássico proposto por RICHARDSON (1971), utilizando as condições operacionais da Tabela 01 (Apêndice 1). Para cada ensaio, traçou-se a evolução da perda de carga em função da velocidade do gás. A velocidade de mínima fluidização corresponde a intersecção do patamar horizontal relativo a perda de carga em que o leito está totalmente fluidizado, com a parte linear crescente da curva estável para o leito fixo à velocidade decrescente.

A medida de porosidade de mínima fluidização é muito delicada e pode variar significativamente de acordo com a técnica empregada e o método de extrapolação dos resultados.

No presente trabalho foram utilizados os seguintes métodos:

- (1) O método proposto por BOTTERIL et alli (1982a e b), a partir das expansões do leito observadas em escala graduada na parte interna da parede da coluna. Esta técnica propõe traçar a curva de $\varepsilon = f(\ln U/U_{mf})$ e, a ε_{mf} é obtida da interpolação dos resultados em $U/U_{mf} = 1$.
- (2) A partir da expansão do leito, utilizando a Equação (4), citada na secção 2.1.2, quando a condição de mínima fluidização realmente é verificada.

3.3.3 - Leito de Jorro Convencional - Curvas Características

Os estudos realizados neste tipo de configuração foram desenvolvidos na coluna A, descrita no item 3.2.1. As condições operacionais encontram-se na Tabela 02 (Apêndice 1). Os ensaios foram realizados à 40°C.

Executadas as etapas (1) e (2) do item anterior, procedia-se da seguinte forma:

- (1) acionamento do compressor, aumentando-se gradativamente a velocidade do ar e anotando-se através de manômetros diferenciais a queda de pressão correspondente. Anotava-se, então, a queda de pressão máxima no leito, continuava-se a aumentar a vazão do gás até a abertura total da válvula controladora da velocidade do ar.
- (2) reduzia-se a vazão do gás cuidadosamente. Era observado a estabilidade do jorro;
- (3) alcançado o menor valor da velocidade do gás em que ainda verificava-se um jorro estável, registrava-se a velocidade de jorro mínimo, prosseguindo a experiência até interrupção completa do fluxo de gás;
- (4) para este tipo de configuração determinou-se também a altura máxima jorrável, através de diversos ensaios realizados, para diferentes massas do leito de partículas até observar-se um jorro estável, ou seja, sem formação de uma fluidização na região anular ou formação de "slug".

Em leito de jorro convencional, também, foram realizadas experiências para avaliar os parâmetros fluidodinâmicos ΔP_{jm} , ΔP_{max} e U_{jm} , utilizando-se sementes de urucum e uma quantidade de pó obtida pelo processo de atrição extraído das sementes. Para estes ensaios, inicialmente, era pesada uma certa quantidade de sementes. Fazia-se a mistura dentro de uma bacia adicionando aos poucos os produtos. Em seguida efetuavam-se as etapas (1), (2), (3) e (4) citadas anteriormente.

3.3.4 - Leito de Jorro com Tubo Central - Curvas Características

Nas análises realizadas do comportamento fluidodinâmico desta configuração utilizou-se as colunas (A), (B) e (C), apresentadas no item 3.2.1 e 3.2.2. Os ensaios foram realizados à 40°C.

Os tubos centrais são de PVC, com diferentes diâmetros e mesma relação D_c/H_t . As condições operacionais usadas estão na Tabela 03 (Apêndice 1).

Nas medidas realizadas com esta geometria, adotou-se uma sequência de trabalho na qual se fixava: altura do leito, um diâmetro para o tubo central e a distância de separação entre a parte inferior do tubo e a entrada de ar.

O procedimento usado é descrito no item 3.3.1, fazendo uso das etapas (1) e (2). Como, também, da metodologia apresentada no item 3.3.3, etapas (1) a (4).

O esquema para o leito de jorro cone-cilíndrico com tubo central pode ser visto na Figura 3.3.

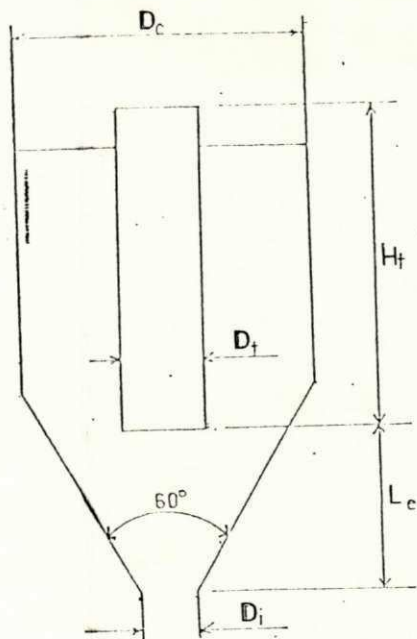


FIGURA 3.3. Leito de Jorro Modificado.

3.3.5 - Circulação de Sólidos

As medidas de circulação de sólidos foram efetuadas na coluna B, para uma relação D_c/D_t igual a 6.0. Foram efetuadas as seguintes etapas para as medidas de W_s :

- (1) estabilização do sistema ar-urucum nas condições operacionais pré-estabelecidas;
- (2) colocava-se cuidadosamente sobre a superfície do leito, a célula de medidas, sem que fosse alterado o seu comportamento;
- (3) acionava-se o compressor, nas condições de velocidade do ar fixada, mantendo-o em funcionamento por um intervalo de tempo, de forma que fosse suficiente para se atingir o equilíbrio fluidodinâmico, porém pequeno para que a ausência de recirculação de sólidos não provocasse alterações substanciais do jorro. O tempo estimado foi de aproximadamente 4 a 5s.
- (4) desligava-se o soprador, e registrava-se o tempo e a massa de partículas recolhida na célula, determinando-se desta maneira a taxa de circulação de sólidos no jorro;
- (5) para cada condição operacional foram realizados no mínimo três determinações de W_s , observando-se o valor médio. Na Tabela 04 (Apêndice 1) são apresentadas as condições operacionais. Os desvios relativos apresentados nestas experiências foram da ordem de $\pm 2,48$ g/s e $\pm 5,14$ g/s, respectivamente para leitos de 17 kg e 21 kg.

3.3.6 - Determinação da Distribuição Radial de Pressão e Diâmetro de Jorro

As leituras de pressão estática foram realizadas utilizando-se manômetros diferenciais tipo "U". As condições operacionais em que foram efetuadas as medidas, são mostradas na Tabela 05 (Apêndice 1).

Realizaram-se as experiências sempre em condição de jorro estável na vazão de ar desejada. Os resultados obtidos foram usados para determinação do diâmetro do jorro e, velocidade do ar na região anular.

A partir dos dados obtidos graficou-se as curvas, observando-se através destas um comportamento similar, ou seja, uma descontinuidade apresentada sempre na interface jorro-anel. O diâmetro do jorro é localizado no ponto inicial de descontinuidade da curva.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Introdução

A análise dos resultados obtidos no presente trabalho será apresentada em etapas diferentes, correspondentes às variáveis fluidodinâmicas do leito de sementes de urucum. Inicialmente serão exibidos e investigados os parâmetros fluidodinâmicos determinados em ensaios em leito fluidizado, tais como: a velocidade de mínima fluidização obtida a partir das curvas características e a porosidade de mínima fluidização. Posteriormente, serão ilustrados e discutidos os parâmetros fluidodinâmicos de queda de pressão mínima de jorro, queda de pressão máxima e velocidade de jorro mínimo, determinados pelo método clássico em leito de jorro convencional e leito de jorro modificado. Os resultados experimentais, no sistema tradicional, dos parâmetros acima citados serão comparados com os estimados através de correlações empíricas propostas na literatura. Serão observadas, também, o efeito da altura do leito e do diâmetro do tubo central em ΔP_{jm} , ΔP_{max} e U_{jm} o que nos dará uma idéia significativa na utilização da configuração modificada. Em seguida, serão apresentadas e analisadas as medidas experimentais de H_{max} , da taxa de circulação de sólidos, da distribuição da queda de pressão radial para verificação do diâmetro do jorro e da distribuição de gás no anel. Concluindo, serão apresentados resultados preliminares do leito de jorro-pneumático utilizando-se mistura de partículas com características completamente distintas, como também um estudo de ampliação de escala em leito de jorro com tubo central. Os desvios padrão referentes aos resultados experimentais obtidos em relação aos encontrados, através das correlações utilizadas no presente trabalho são apresentadas no Apêndice 02, Tabela 03.

4.2 - Leito Fluidizado

4.2.1 - Velocidade e Porosidade de Mínima Fluidização

As curvas características de queda de pressão para leito fluidizado determinadas pelo método clássico à velocidade decrescente, são ilustradas na Figura 4.1. Observamos que as medidas experimentais da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), correspondente a intersecção do patamar horizontal relativo a perda de carga em que o leito está completamente fluidizado, com a parte linear crescente da curva estável para leito fixo, apresentam uma boa reprodutibilidade com desvios de ± 0.02 m/s, sendo independente da altura do leito e geometria, confirmando assim fatos bem conhecidos. A Tabela 07, mostra a comparação do valor experimental com os estimados através de correlações empíricas. Observamos que os valores obtidos através das correlações subestimam o valor experimental.

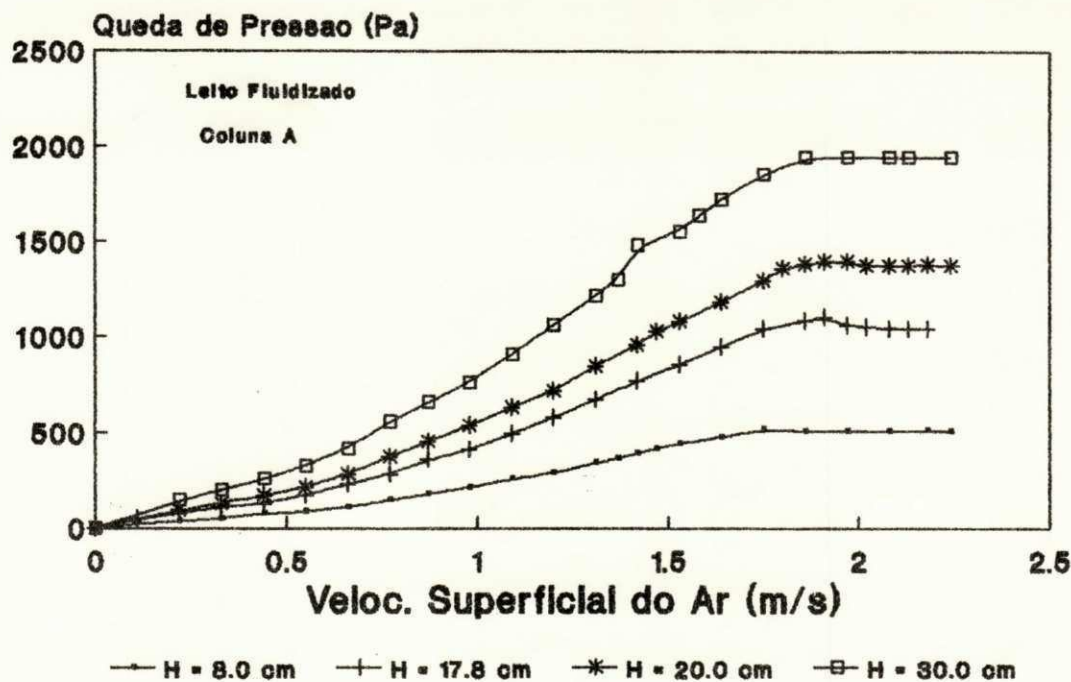


FIGURA 4.1. Curva Característica em Leito Fluidizado.

TABELA 07: Comparação de U_{mf} experimental com os estimados através de correlações

H (cm)	EXPERIMENTAL U_{mf} (m/s)	CORRELAÇÕES, U_{mf} (m/s)		
		(1)	(2)	(3)
8.0	1.76			
17.8	1.76			
20.0	1.80	1.495	1.358	1.211
30.0	1.76			
VALOR MÉDIO	1.77 ± 0.02			

A partir dos métodos propostos por BOTTERIL et alli (1982a e b) e MURACHMAN (1990), determinamos a porosidade de mínima fluidização. A Figura 4.2, representa a técnica utilizada por BOTTERIL (1982 a e b), a qual foi detalhada no Capítulo III e no qual ϵ_{mf} corresponde ao valor quando a relação U/U_{mf} é igual 1.0. Observamos na Tabela 08, que os desvios apresentados utilizando os dois métodos são relativamente pequenos, e que os resultados da ϵ_{mf} se aproximam consideravelmente do valor obtido por MASSARANI et alli (1992). No tratamento matemático dos nossos dados, foi utilizado o valor de ϵ_{mf} , determinado pelo método proposto por MURACHMAN (1990).

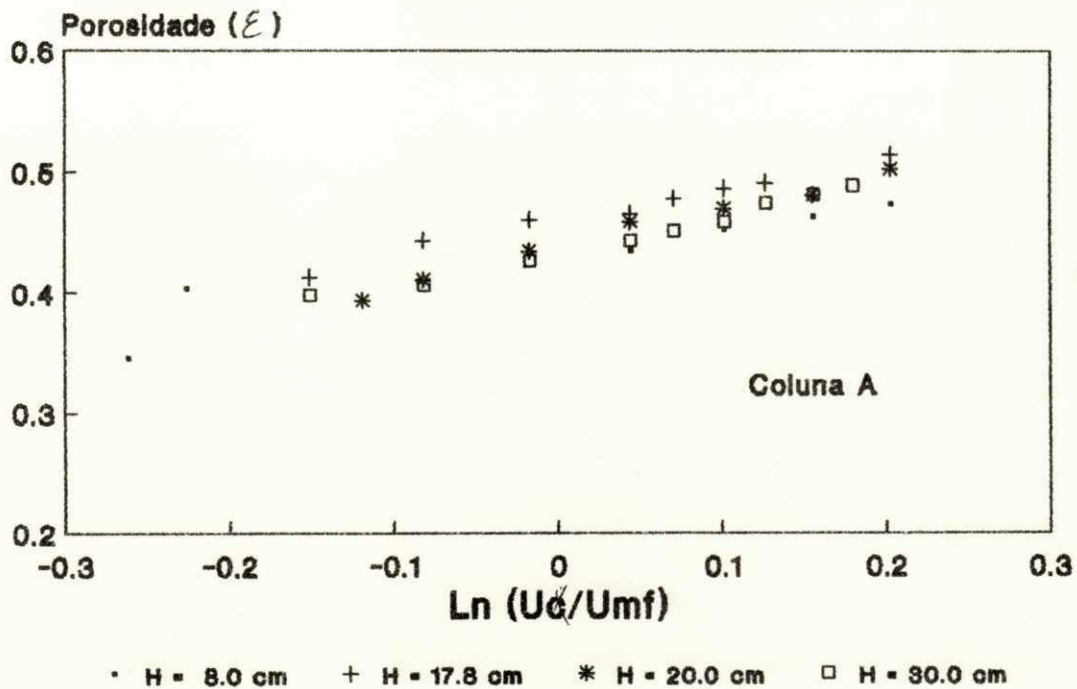


FIGURA 4.2. Determinação da Porosidade de Mínima Fluidização.
Método de BOTTERIL (1982a e b)

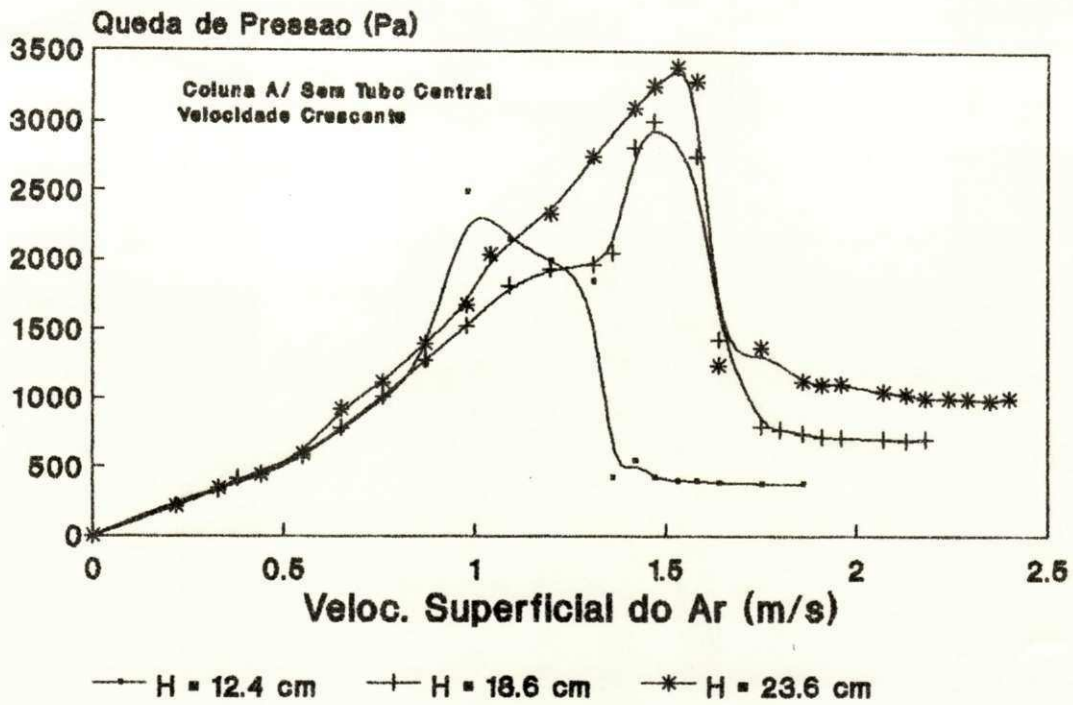
TABELA 08: Comparação entre os resultados experimentais para a ϵ_{mf}
com o determinado por MASSARANI et alli (1992)

H (cm)	EXPERIMENTAL		ϵ_{mf} MASSARANI et alli (1992)
	BOTTERIL et alli (1982a e b)	MURACHMAN (1990)	
8.0	0.443	0.451	0.450 ± 0.014
17.8	0.457	0.465	
20.0	0.443	0.458	
30.0	0.430	0.481	
VALOR MÉDIO	0.443 ± 0.011	0.464 ± 0.013	

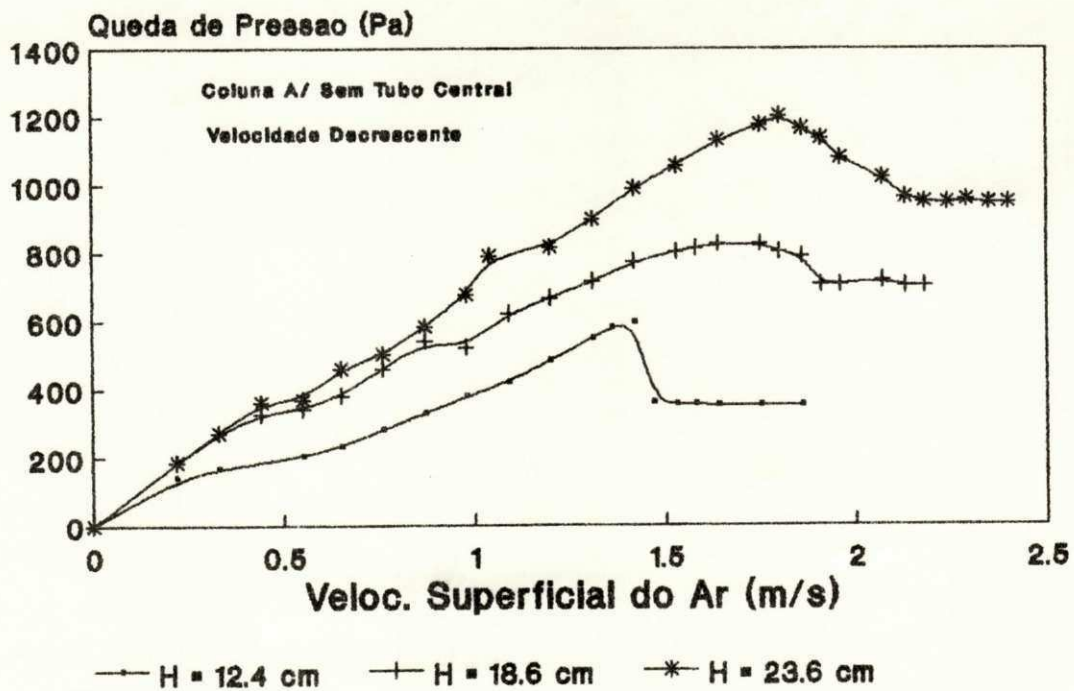
4.3 - Fluidodinâmica em Leito de Jorro Convencional e Leito de Jorro Modificado

4.3.1 - Curvas Características

As curvas características da perda de carga em função da velocidade do ar na coluna para o sistema de jorro convencional, para diferentes alturas do leito, são apresentadas na Figura 4.3. Observamos que essas curvas apresentam um comportamento tradicional, sendo semelhantes às obtidas por ALMEIDA (1991), LIMA (1992) e MADONNA et alli (1960).



(a)

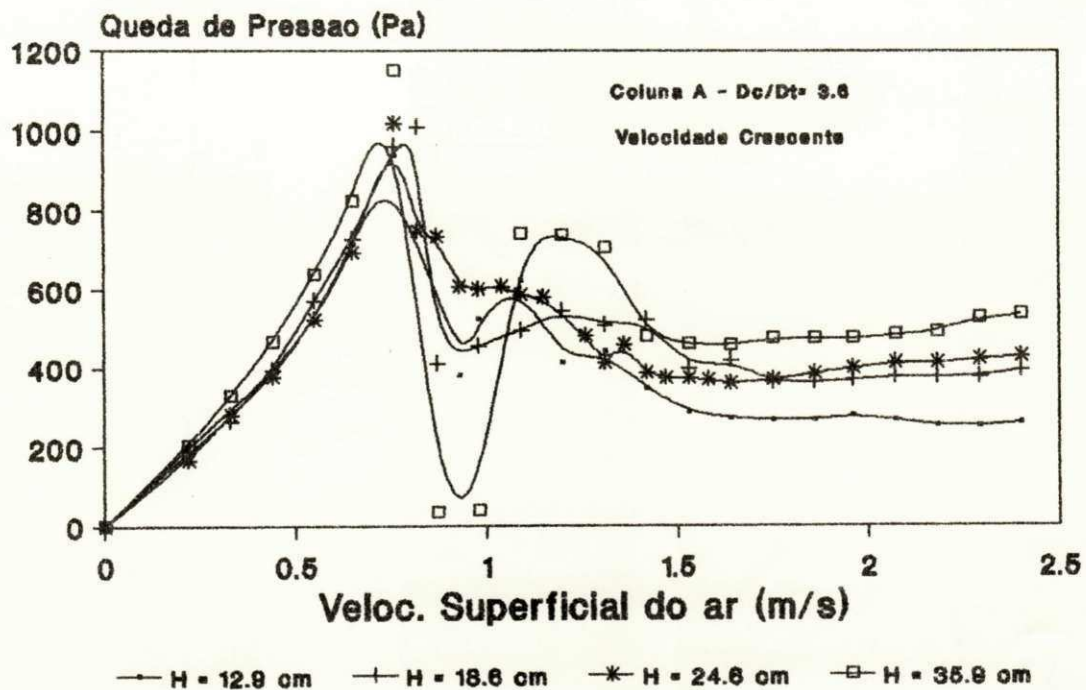


(b)

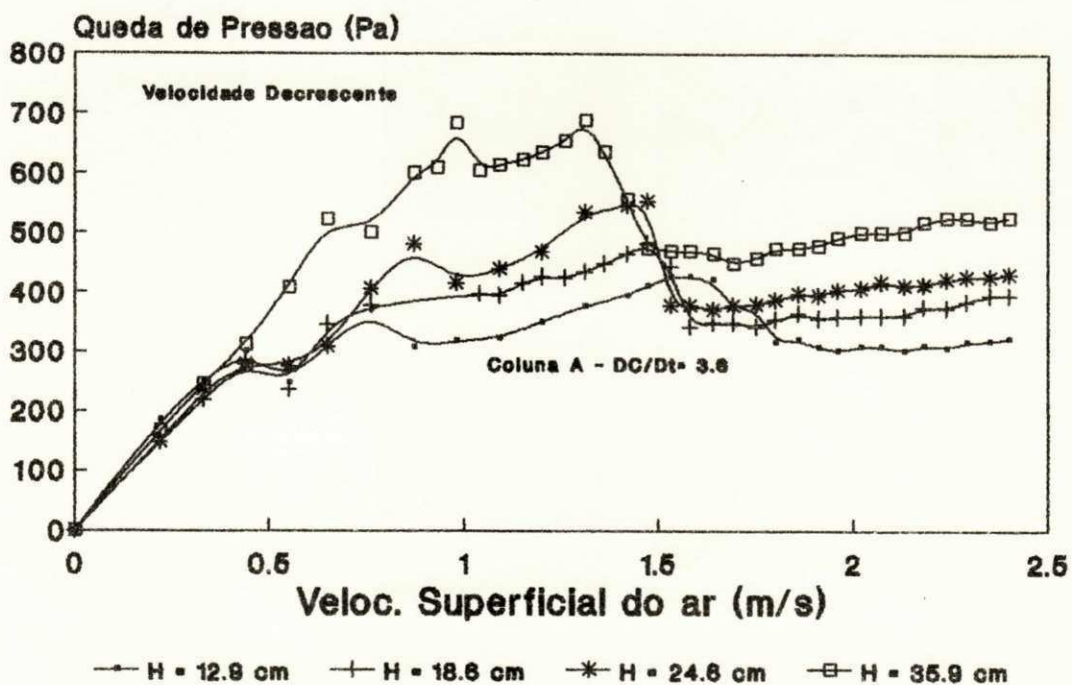
FIGURA 4.3. Curvas Caracteristicas em Leito de Jorro Convencional.

Nas experiências realizadas em leito de jorro não-convencional, para construção das curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar, utilizamos uma relação fixa de D_c/H_t igual a 0.5 para as colunas A e B, como também a distância entre o orifício de entrada do ar e a parte inferior do tubo central L_e igual a 6.0 cm. Na coluna C, não foi possível obtermos as curvas características, devido a limitações do equipamento, no que se refere ao controle da velocidade do gás na coluna.

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram os ensaios realizados na coluna A para razões do diâmetro da coluna (D_c)/diâmetro do tubo D_t de 3.6 e 4.7, e, razão do diâmetro do tubo (D_t)/diâmetro do orifício de entrada do ar (D_i) de 1.0 a 0.76, respectivamente. Observamos que a perda de carga nas condições de jorro estável apresenta um comportamento irregular aumentando gradativamente com a elevação da velocidade. Portanto não é possível nos referirmos a uma única queda de pressão de jorro estável, analisando em seu lugar o ΔP_{jm} , correspondente a U_{jm} . Este efeito é mais acentuado para a D_c/D_t igual a 4.7, que corresponde $D_t/D_i = 0.76$, sendo provocado, provavelmente, pela redução do diâmetro do jorro limitado pelo diâmetro do tubo central que é menor que o orifício de entrada do ar. Comportamento similar foi obtido por PERES et alli (1988), em estudo da caracterização física e dinâmica do leito de jorro cônico com finos de xisto.

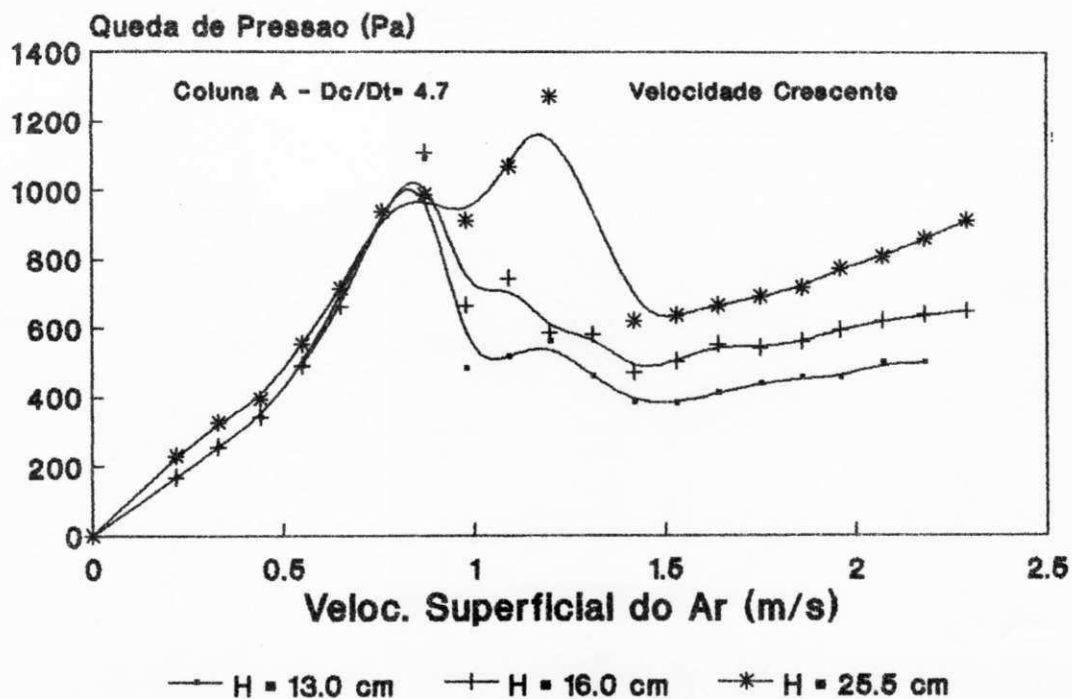


(a)

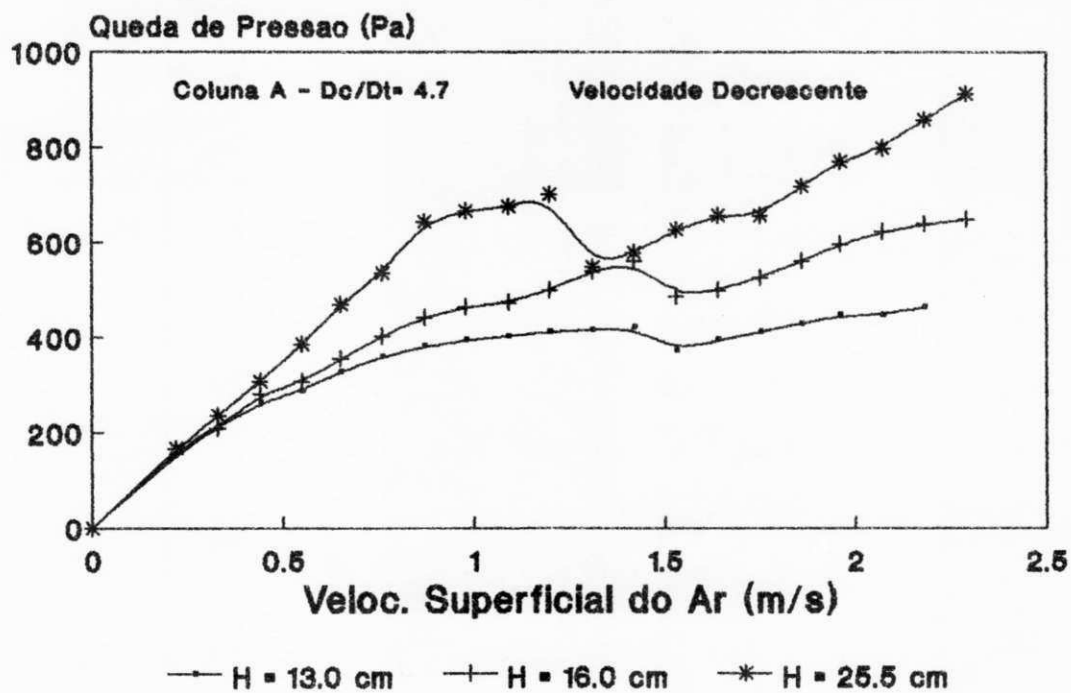


(b)

FIGURA 4.4. Curvas Características em Leito de Jorro Modificado.



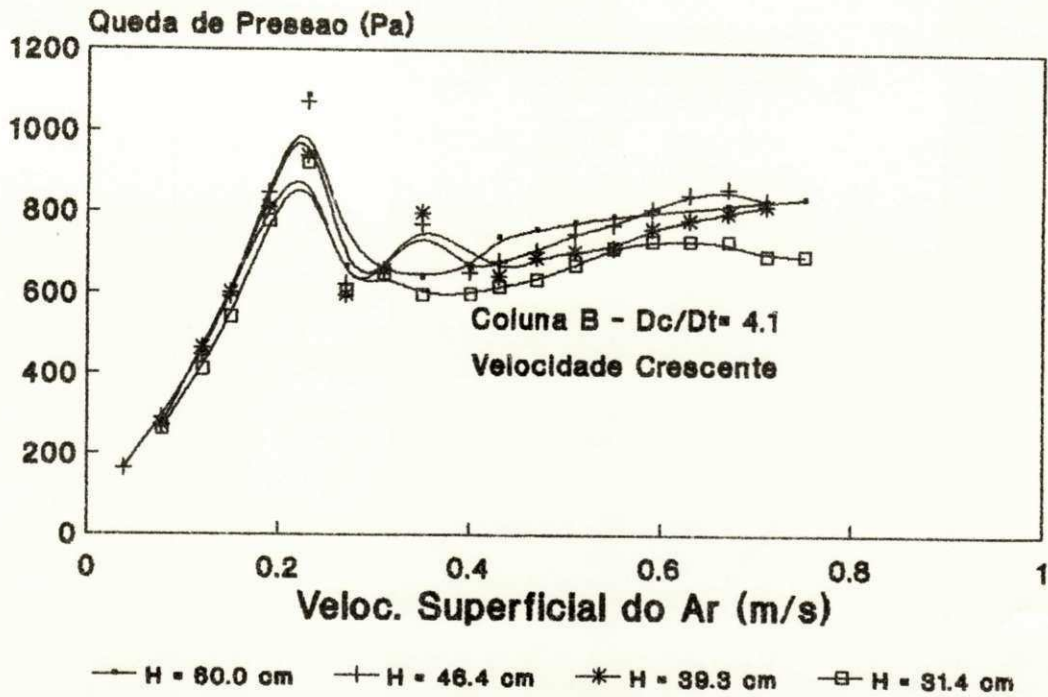
(a)



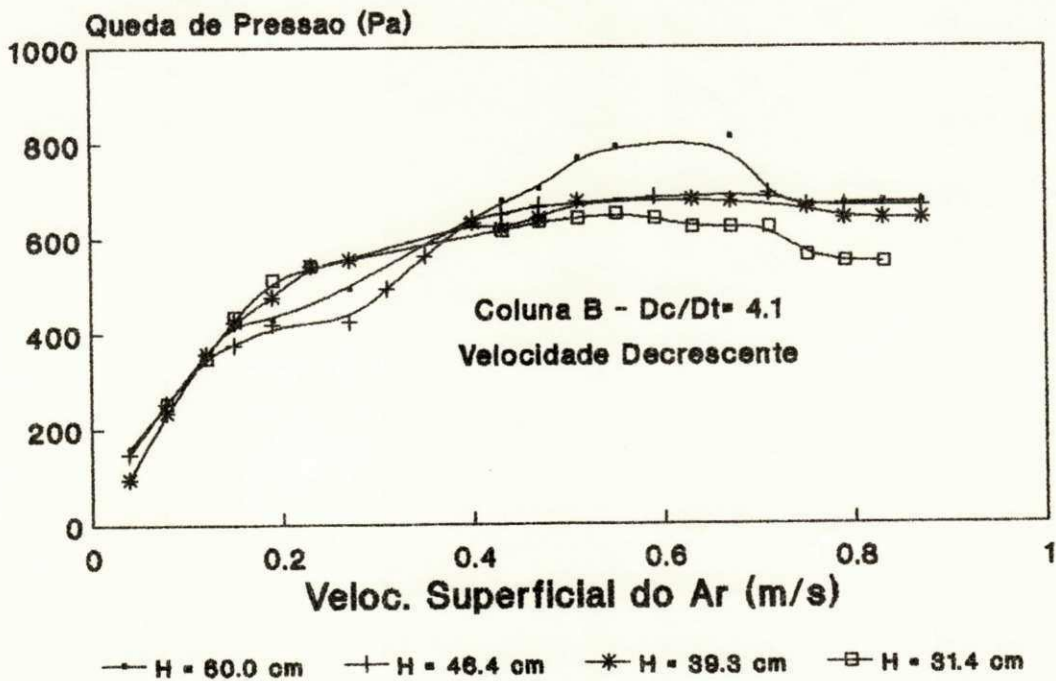
(b)

FIGURA 4.5. Curvas Características em Leito de Jorro Modificado.

As Figuras 4.6 e 4.7, correspondem aos experimentos realizados na coluna B para D_c/D_t de 4.1 e 6.0, e, D_v/D_i de 1.46 e 1.0, respectivamente. Verificamos nas curvas características obtidas para D_c/D_t igual 4.1, que a perda de carga de jorro estável é substancialmente afetada pela relação D_v/D_i igual 1.46, tornando as leituras de queda de pressão mínima e da velocidade mínima de jorro imprecisas. Entretanto, quando o diâmetro do tubo é igual ao diâmetro do orifício de entrada, o comportamento geral das curvas é semelhante ao obtido por GIUDICI et alli (1983) e DUTRA (1984), e semelhante ao obtido no jorro convencional.

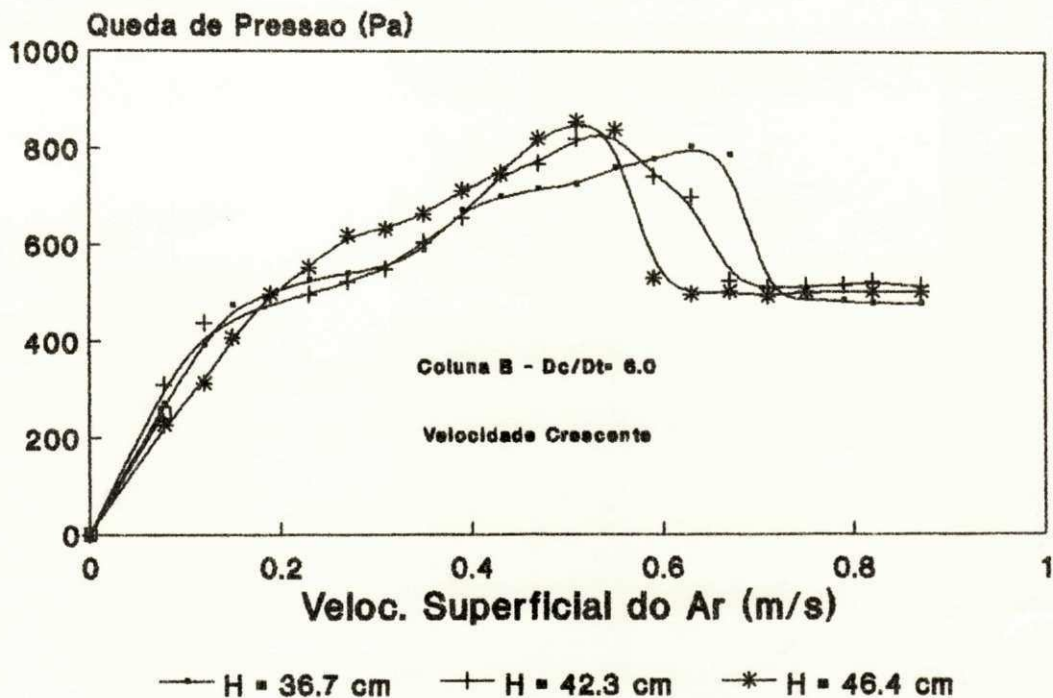


(a)

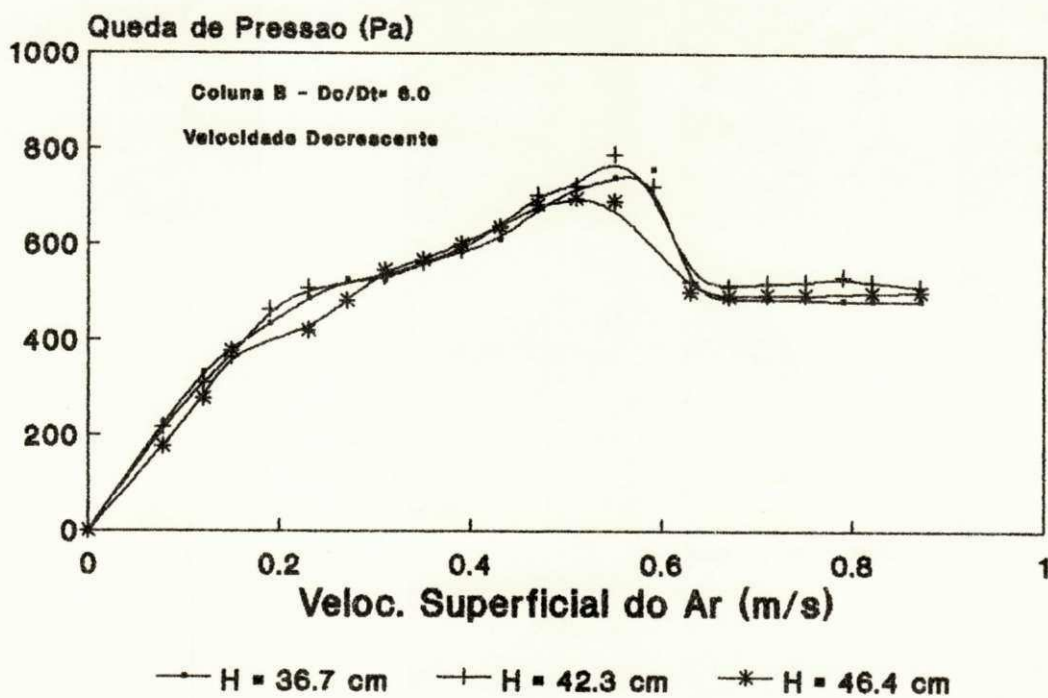


(b)

FIGURA 4.6. Curvas Características em Leito de Jorro Convencional.



(a)



(b)

FIGURA 4.7. Curvas Características em Leito de Jorro Convencional.

4.3.2 - Altura Máxima Jorrável

Através de sucessivas experiências, realizadas na coluna A para leito de jorro tradicional, determinamos a altura máxima do leito onde ocorre ainda jorro estável, a partir deste valor observamos que ocorre uma fluidização incipiente e de baixa qualidade. A Tabela 09, apresenta uma comparação entre o resultado experimental e os estimados através de correlações. Verificamos que as Equações (13) e (15) subestimam o nosso valor, enquanto que o determinado pela equação (14) superestima o valor experimental. Observamos que estas expressões ainda não são suficientes para estimar com precisão o valor de H_{max} . Contudo, as equações propostas por GRBAVCIC et alli (1976) e LEFROY & DAVIDSON (1968), são as que se aproximam mais do valor experimental, pois são função apenas da geometria da coluna e característica da partícula.

TABELA 09: Comparação de H_{max} Experimental e os Estimados através de Correlações Empíricas.

EXPERIMENTAL H_{max} (cm)	CORRELAÇÃO, H_{max} (cm)		
	(13)	(14)	(15)
24.0	18.48	36.11	11.14

4.3.3 - Efeito da Altura do Leito nos Parâmetros Fluidodinâmicos

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram os resultados experimentais de perda de carga mínima de jorro, queda de pressão máxima e velocidade mínima de jorro, obtidos para diferentes alturas do leito e condições distintas de D_c/D_t .

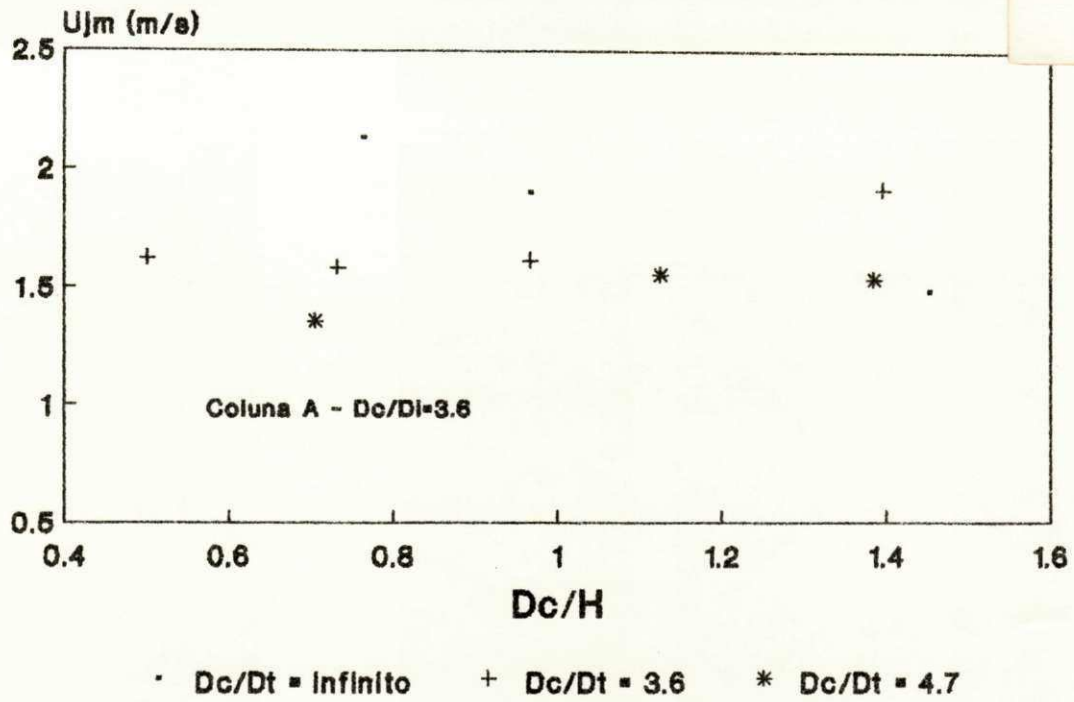


FIGURA 4.8. Efeito da Altura do Leito na Velocidade de Jorro Mínimo.

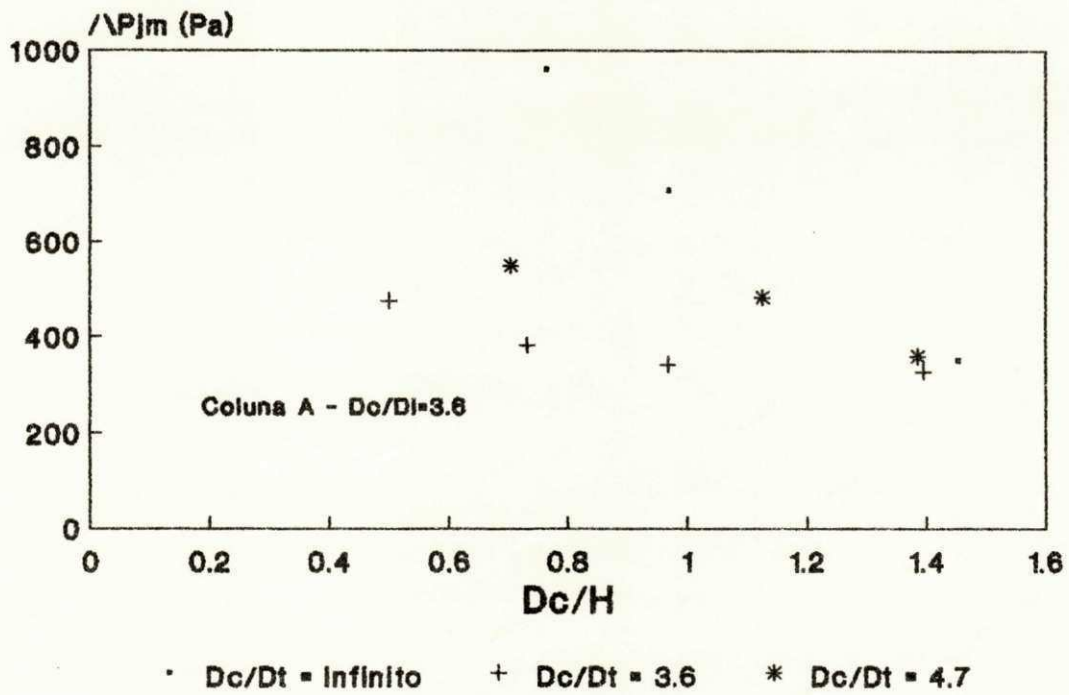


FIGURA 4.9. Efeito da Altura do Leito na Queda de Pressão Mínima de Jorro

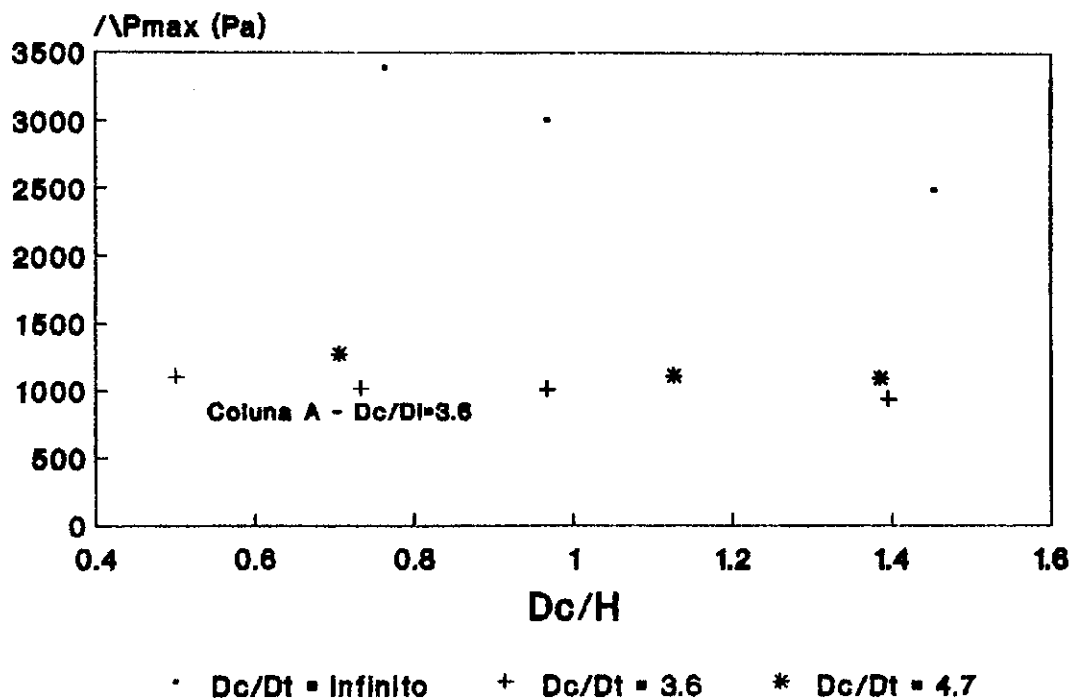


FIGURA 4.10. Efeito da Altura do Leito na Queda de Pressão Máxima.

Na Figura 4.8, observamos que para D_c/D_t infinito, leito de jorro convencional, a velocidade mínima de jorro (U_{jm}) aumenta progressivamente com a elevação da altura do leito. Na mesma figura, verificamos que a relação D_c/D_t não apresenta um efeito significativo em U_{jm} , pois neste caso as relações D_c/D_t e D_c/D_i são próximas. Observamos também nesta configuração que a altura do leito não apresenta uma influência apreciável na U_{jm} . Este comportamento foi observado por DUTRA (1984) e GIUDICI et alli (1983). Analisando as duas configurações percebemos que no leito de jorro convencional a velocidade de jorro mínimo para uma mesma altura do leito em relação ao sistema modificado é sempre superior.

Nas Figuras 4.9 e 4.10, são ilustrados o efeito da altura do leito na queda de pressão de jorro mínimo e queda de pressão máxima, respectivamente. Observamos que a perda de carga depende de forma apreciável da altura do leito, quando operamos no

sistema tradicional. Em relação a ΔP_{jm} , na Figura 4.9, verificamos que este parâmetro para pequenas alturas tende a ser independente da configuração e razão D_c/D_t . Em alturas elevadas é relevante ressaltar que para D_c/D_t igual a D_c/D_i a perda de carga de jorro mínimo no leito é inferior aos outros dois casos mostrados na figura.

A perda de carga máxima, observada na Figura 4.10, mostra que a altura do leito praticamente não apresenta influência no leito de jorro modificado, porém como era de esperar aumenta com a altura do leito no sistema convencional. Para razões de D_c/D_t igual a D_c/D_i o comportamento é similar ao observado em relação a ΔP_{jm} , apresentando perdas de carga menores que nas outras configurações. De maneira geral, observamos que, a introdução do tubo central diminui consideravelmente a perda de carga no leito, sendo uma das vantagens citadas por MUJUNDAR (1989).

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 é observado também o efeito da altura do leito na U_{jm} , ΔP_{jm} e ΔP_{max} , para a configuração modificada na coluna B.

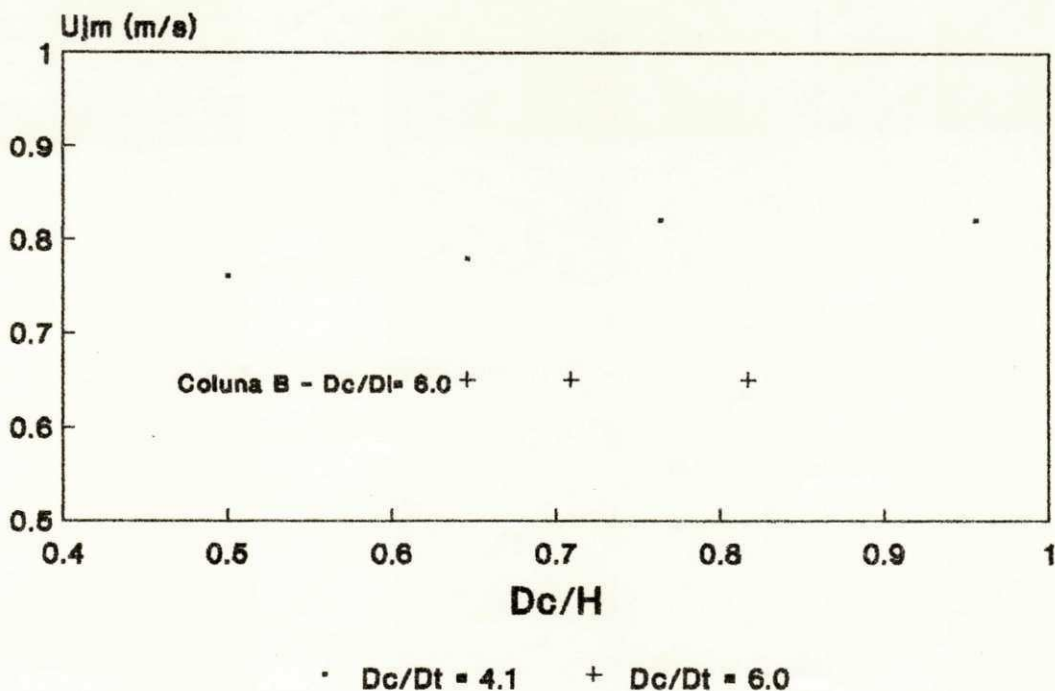


FIGURA 4.11. Efeito da Altura do Leito na Velocidade de Jorro Mínimo.

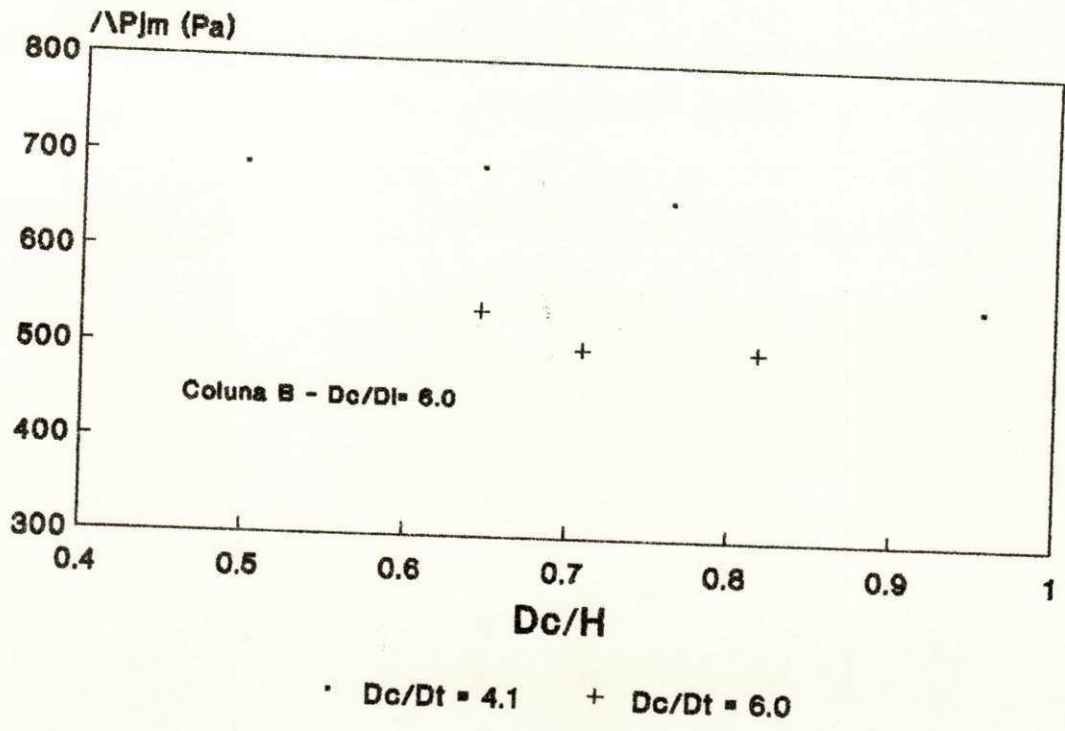


FIGURA 4.12. Efeito da Altura do Leito na Queda de Pressão Mínima de Jorro.

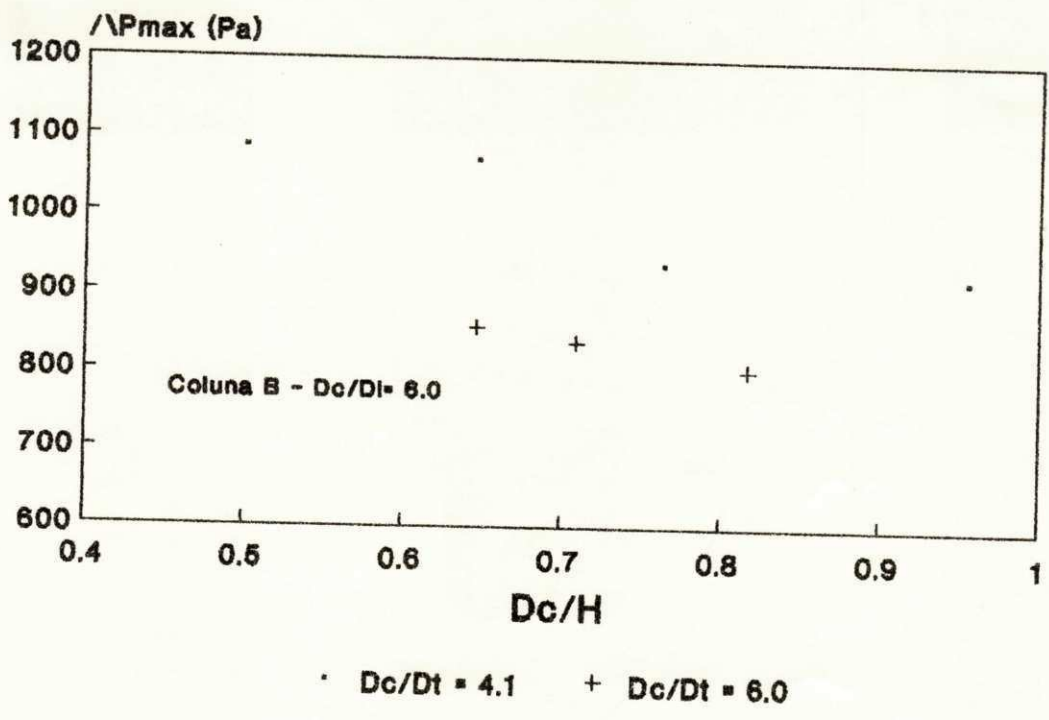


FIGURA 4.13. Efeito da Altura do Leito na Queda de Pressão Máxima.

Observamos na Figura 4.11, um comportamento semelhante ao da coluna A em relação a U_{jm} para um $D_t = D_i$, ou seja, a velocidade de jorro mínimo independe da altura do leito. Era esperado de acordo com os resultados obtidos na coluna A que o efeito de D_c/D_t não fosse tão significativo, contudo é relevante lembrar que quando operamos com D_c/D_t igual a 4.1 o diâmetro do tubo central foi superior ao diâmetro do orifício de entrada do gás, o que poderia explicar este comportamento anômalo. No qual poderia estar ocorrendo a formação de um jorro interno ou talvez uma aeração complementar na região do anel.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, são ilustrados o efeito da altura do leito na perda de carga de jorro mínimo e queda de pressão máxima, respectivamente. Observamos que ocorre uma inversão em relação aos resultados obtidos na coluna A, ou seja, para D_c/D_t maior os valores de ΔP_{jm} e ΔP_{max} foram inferiores. Este efeito poderia ser explicado novamente devido a utilização de D_t ser superior ao diâmetro do orifício de entrada do ar D_i .

4.3.4 - Comparação dos Resultados Experimentais

Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, ilustramos uma análise comparativa dos dados experimentais de U_{jm} , ΔP_{jm} e ΔP_{max} , respectivamente, obtidos no sistema de jorro convencional, com os estimados através de correlações empíricas pesquisadas na literatura.

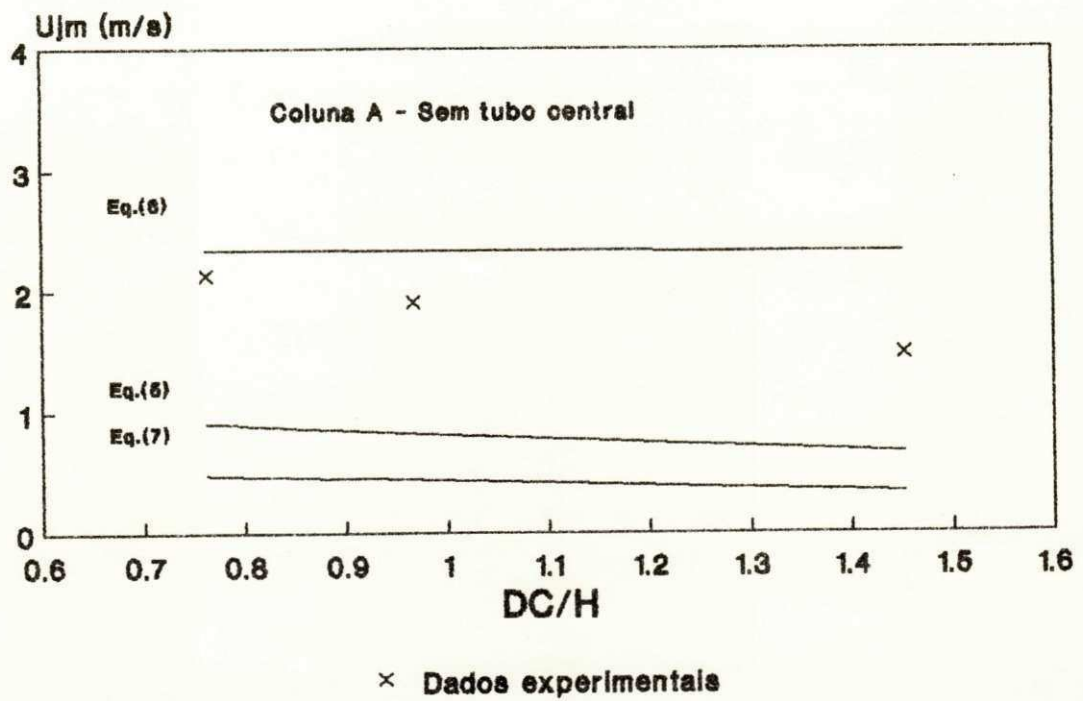


FIGURA 4.14. Comparação entre os Resultados Experimentais e Estimados para Velocidade de Jorro Mínimo.

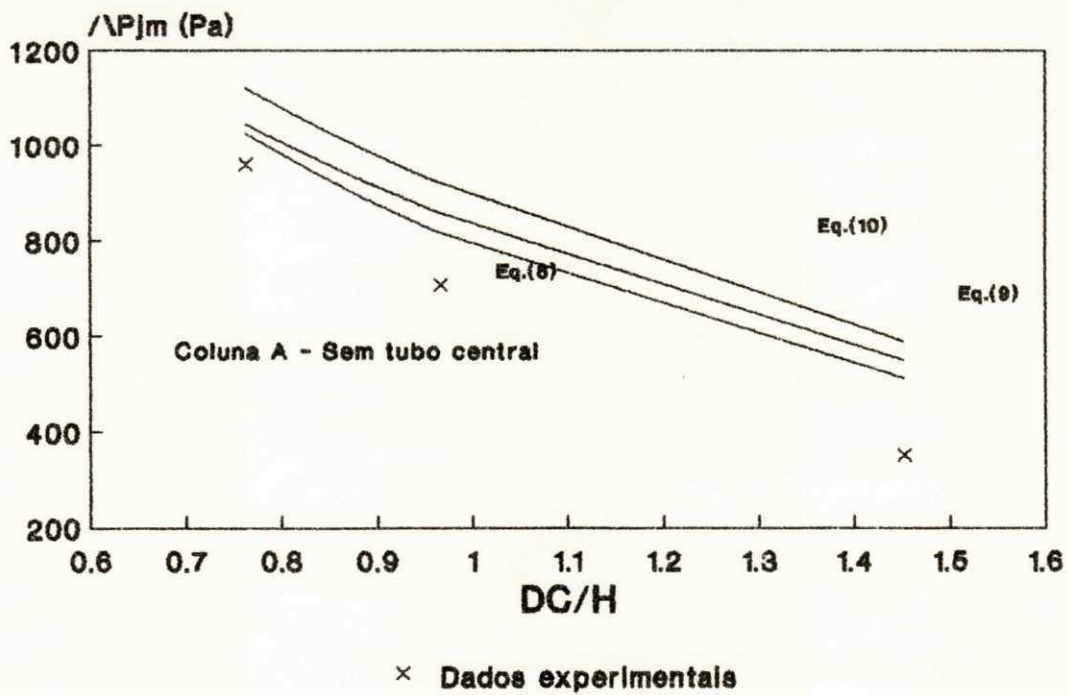


FIGURA 4.15. Comparação entre os Resultados Experimentais e Estimados para Queda de Pressão Mínima de Jorro.

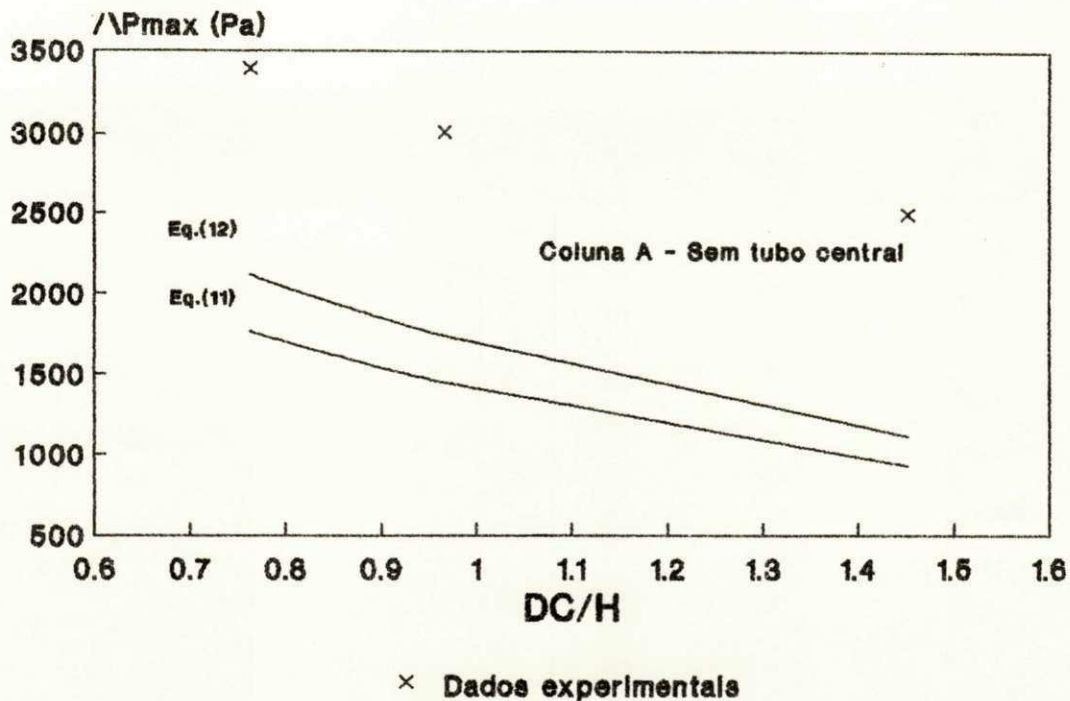


FIGURA 4.16. Comparação entre os Resultados Experimentais e Estimados para Queda de Pressão Máxima

Na Figura 4.14, observamos que os dados experimentais de U_{jm} e os estimados através das correlações empíricas mostram uma mesma tendência em relação a altura do leito, cujas as curvas apresentadas possuem um mesmo comportamento, sendo praticamente paralelas. Observamos, também, que para D_c/H inferior a 1.0 a equação de SMITH e REDDY (6) tende a ajustar melhor os nossos dados experimentais, enquanto que para valores de D_c/H superiores a 1.0 a equação de GISHLER (5) estima melhor os valores obtidos experimentalmente.

Na Figura 4.15, observamos, de forma geral, que a queda de pressão mínima de jorro aumenta com a altura do leito. Os valores estimados para este parâmetro superestimam os resultados obtidos experimentalmente. Contudo, as curvas apresentadas comportam-se de forma similar, praticamente paralelas. Verificamos que a equação

proposta por MALEK et alli (8), estima razoavelmente bem ΔP_{jm} para valores de D_c/H inferior a 1.0.

Na Figura 4.16, observamos que as curvas apresentadas, da queda de pressão máxima em função da altura do leito, comportam-se de forma semelhante sendo, também, praticamente paralelas. Contudo, nenhuma das equações utilizadas para estimar o ΔP_{max} apresentou um comportamento satisfatório, pois estas subestimam de forma significativa os valores experimentais.

No estado atual da arte, verificamos que as correlações empíricas são apenas aproximações grosseiras e não podem ser generalizadas.

4.3.5 - Taxa de Circulação de Sólidos

As experiências para a determinação da taxa de circulação de sólidos foram realizadas apenas na coluna intermediária B. Na coluna A não foi possível medir os valores, pois a circulação de sólidos era muito alta, fazendo com que se tornasse quase impossível o dimensionamento do tempo de aquisição das sementes de forma que este fosse suficiente para atingir o equilíbrio fluidodinâmico e devidamente curto para que a ausência de recirculação das sementes não alterasse as características iniciais do leito.

Na Figura 4.17, podemos observar que os dados experimentais apresentam uma boa reprodutibilidade, e, que a taxa de circulação de sólidos é, praticamente, independente da altura do leito, pois como a altura do tubo central é fixa e maior que a altura do leito em todos os ensaios, o fator predominante na W_s é o tempo de residência controlado pela altura do tubo central. Observamos, também, que W_s nas condições operacionais utilizadas tende a aumentar gradativamente com a vazão do gás. Não foi possível fazer uma estimativa de W_s pois, não foi encontrado na literatura pesquisada expressões que descrevam o comportamento de W_s em leito de jorro modificado. LIMA

et alli (1991), utilizando um sistema convencional para secagem de polpa de umbu e MASSARANI et alli (1992), utilizando leito de jorro cônico com tubo central no estudo da produção de concentrado de urucum, observaram um comportamento semelhante aos obtidos no presente trabalho. Ainda na Figura 4.17, comparamos os resultados obtidos por MASSARANI et alli (1992) com urucum com características muito semelhantes ao utilizado neste trabalho em leito de jorro cônico com tubo central para $L_e = 6.0\text{cm}$ e $D_c/D_t = 6.0$. Para efeito de comparação as velocidades superficiais do ar utilizadas pelo autor foram recalculadas para a superfície do leito. Verificamos que a circulação de sólidos apresenta mesma ordem de grandeza e mesma tendência, contudo os seus valores são superiores aos do presente trabalho. Os autores também mostram que a taxa de circulação de sólidos pode ser consideravelmente elevada com o aumento de L_e .

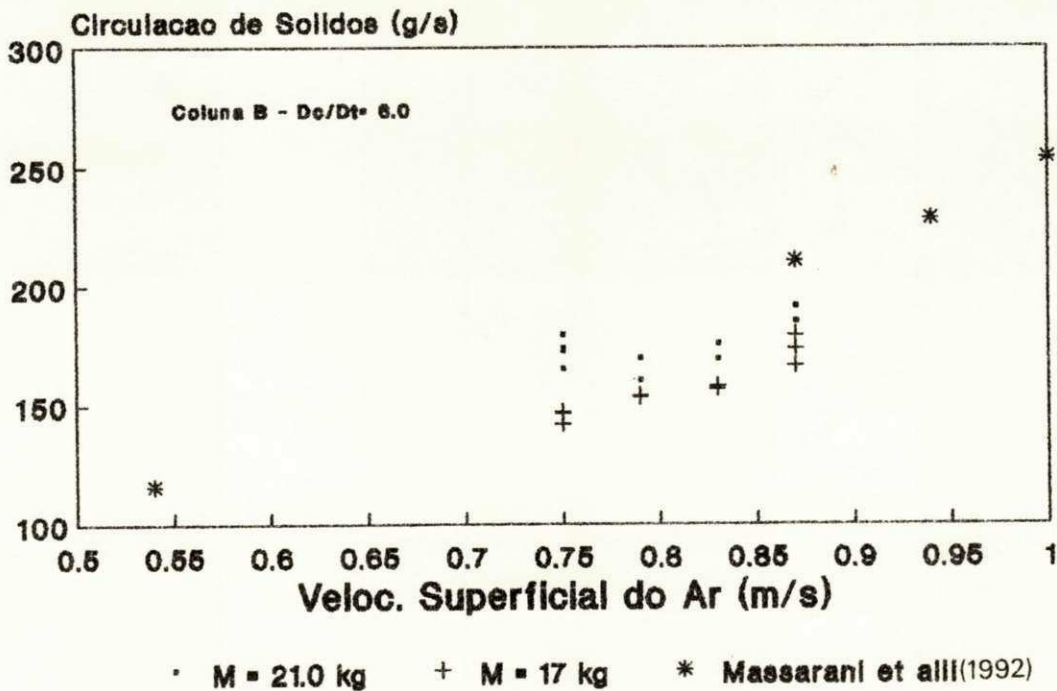
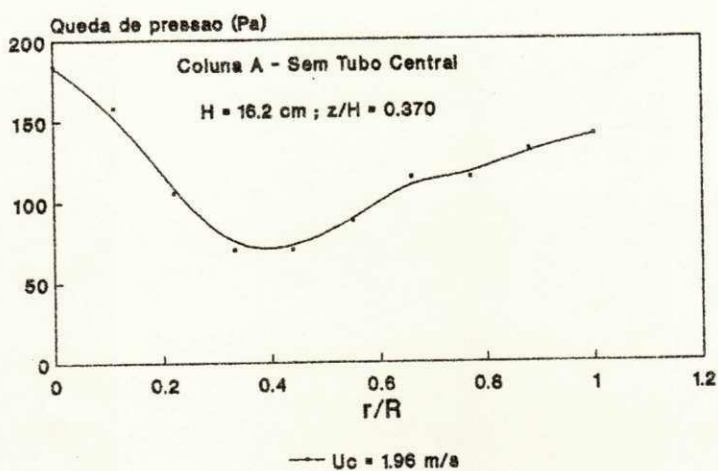


FIGURA 4.17. Efeito da Velocidade do Ar e Altura do Leito na Taxa de Circulação de Sólidos.

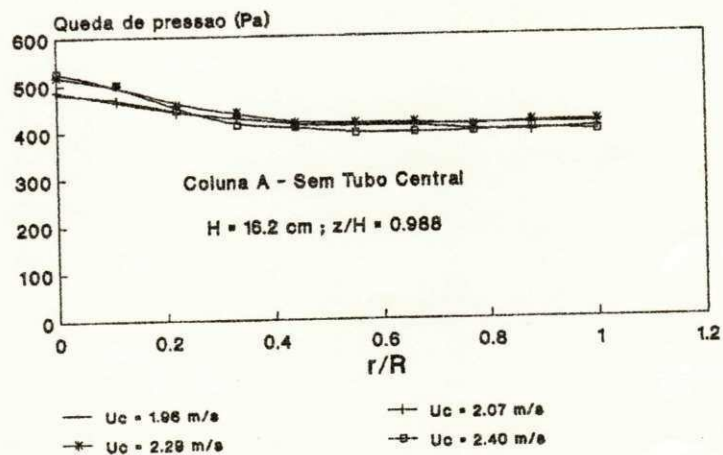
4.4 - Distribuição de Pressão Radial

4.4.1 - Diâmetro do Jorro

A distribuição da queda de pressão radial foi utilizada na determinação do diâmetro do jorro, segundo a técnica descrita no Capítulo III e são mostradas nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21.

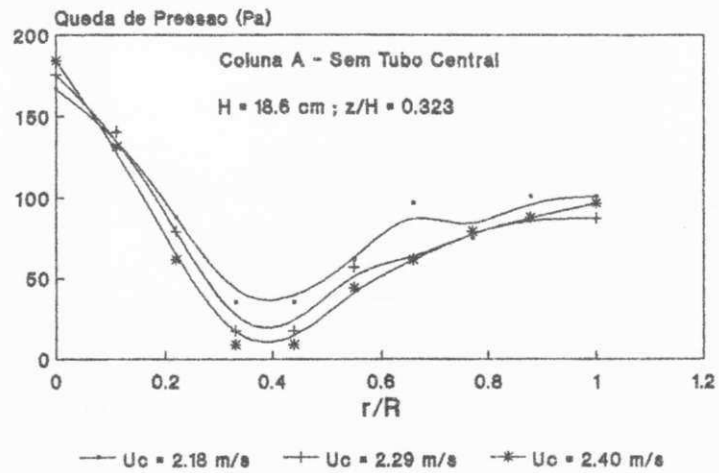


(a)

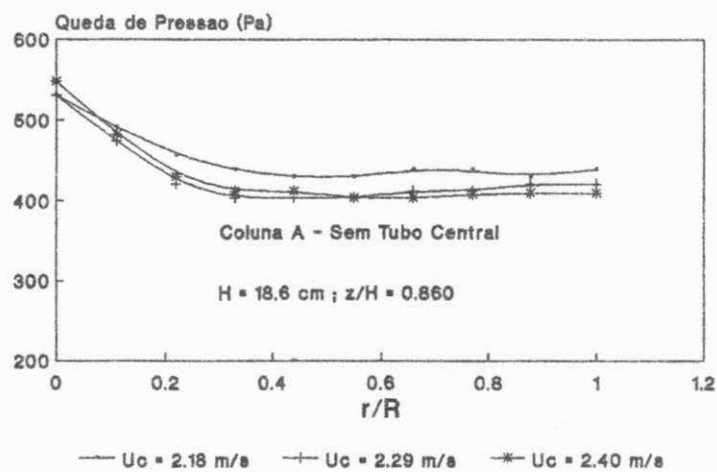


(b)

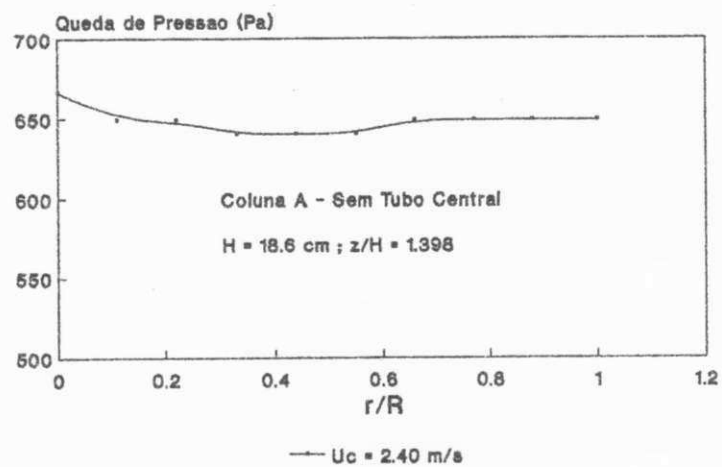
FIGURA 4.18. Distribuição Radial de Pressão.



(a)

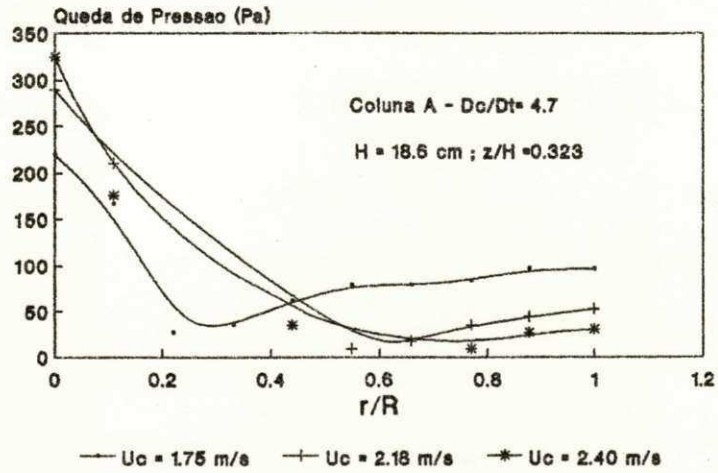


(b)

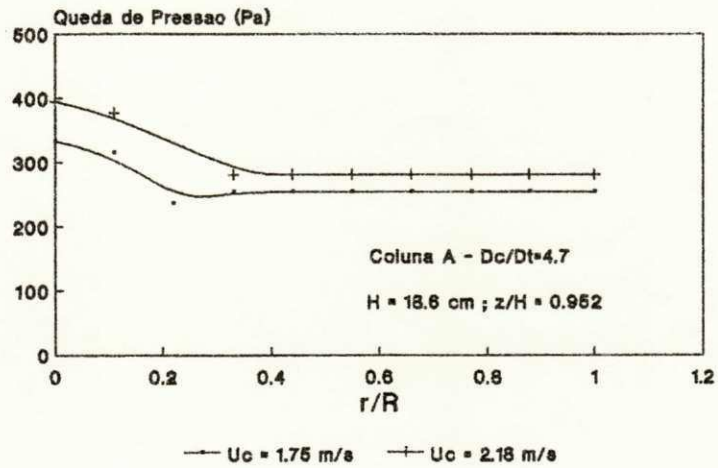


(c)

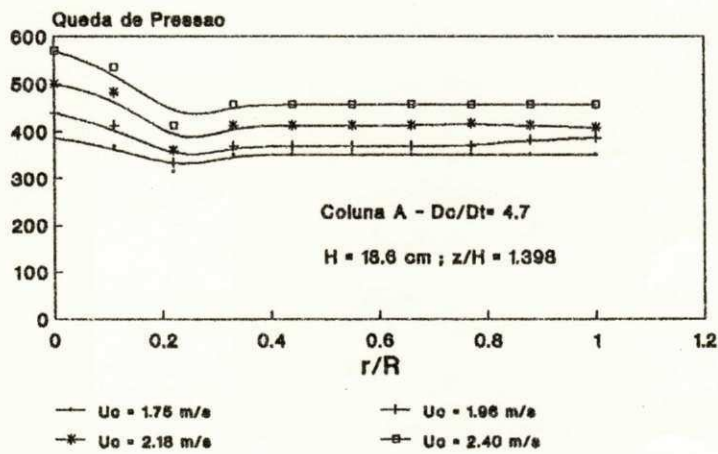
FIGURA 4.19. Distribuição Radial de Pressão.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.20. Distribuição Radial de Pressão.

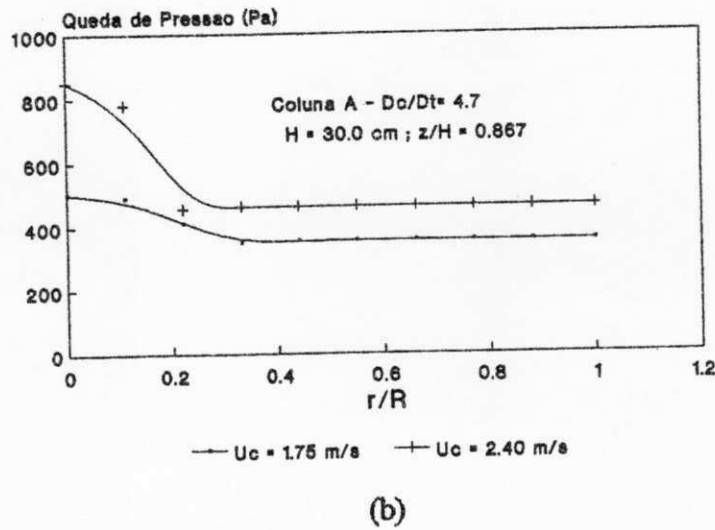
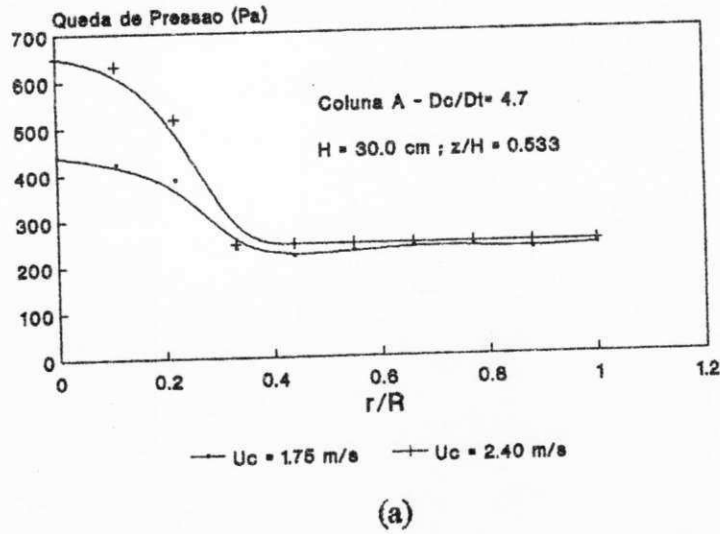


FIGURA 4.21. Distribuição Radial de Pressão.

Observamos nas Figuras 4.18a, 4.19a e 4.20a 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. 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. Estes resultados são ilustrados nas Figuras 4.18b, 4.19b, 4.19c, 4.20b, 4.20c, 4.21a e 4.21b.

Verificamos nas Figuras 4.18 e 4.19, cujos ensaios foram realizados em leito de jorro convencional, que nas condições operacionais utilizadas o perfil de pressão para uma mesma altura do leito depende praticamente da posição adimensional Z/H , sendo mais ou menos plano como citado anteriormente. Na Tabela 10, observamos que o valor experimental do diâmetro do jorro se aproxima mais da correlação de LEFROY e ABDELRAZEK (31) e DAVIDSON (32), pois as mesmas são apenas escritas em função do diâmetro da coluna, do diâmetro da partícula e altura do leito. As outras correlações superestimam o valor experimental obtido no presente trabalho, pois estas são baseadas na altura do leito e velocidade mínima de jorro, o que não foi observado no presente estudo.

TABELA 10: Comparação do Valor Experimental de D_j e os estimados através de Correlações

H (cm)	D_j (cm)			
	EXPERIMENTAL	CORRELAÇÃO		
		(31)	(32)	(33)
16.2	5.65 ± 1.18	6.13		9.35
			5.1	
18.6		6.35		12.29

As Figuras 4.20 e 4.21, representam as experiências realizadas com sistema de leito de jorro com tubo central. Observamos que o D_j nesta configuração é limitado pelo diâmetro do tubo interior.

4.4.2 - Distribuição de Gás na Região Anular

No presente trabalho, tentamos determinar os perfis de velocidade na região anular a partir de medidas diretas realizadas com um velômetro, baseado no princípio do

tubo de Pitot. Porém, devido à grande dimensão do diâmetro da sonda comparado ao diâmetro das sementes de urucum no leito, as perturbações introduzidas pela mesma provocaram erros de medição. Esta dificuldade foi assinalada, também, por BECKER (1961), MAMURO & HATTORI (1968) e VAN VELZEN et alli (1972). Portanto, embora qualitativamente apresentassem a mesma forma dos obtidos a partir dos perfis de pressão, optamos por este último método por considerá-lo mais preciso.

A partir dos gradientes de pressão estática tomados em várias posições axiais no leito, determinamos, a distribuição radial do gás no anel baseado na equação de ERGUN (1969), nas condições de leito expandido. Observamos que os perfis radiais de pressão anular são planos exceto na região próxima do cone, então, consideramos como uma boa aproximação fluxo pistão do gás no anel independente da posição da sonda de medida no leito, logo:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1 - \epsilon_{mf})^2}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_a}{dv^2} + \frac{1.75 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi \epsilon_{mf}} \frac{\rho_g U_a^2}{dv} \quad (34)$$

A velocidade média do gás no anel para um dado nível no leito, foi obtida a partir da equação:

$$\langle U_a \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{R_j}^{R_c} U_z(r) r dr d\theta}{\pi (R_c^2 - R_j^2)} \quad (35)$$

Onde $U_z(r)$ obtivemos a partir de um ajuste polinomial das velocidades do gás no anel, determinadas pela equação de ERGUN (1969).

A partir dos resultados obtidos da $\langle U_a \rangle$ para leito de jorro convencional e leito de jorro modificado, utilizando a metodologia descrita acima, observamos que no sistema sem tubo central a velocidade média do ar na região anular independe da velocidade superficial do gás na coluna, onde qualquer vazão adicional do gás passa pelo jorro. Também, verificamos que para um mesmo nível no leito acima da região cônica a

$\langle U_a \rangle$ independe da altura total do leito. Estes comportamentos foram observados por THORLEY et alli (1959) e GRBAVCIC et alli (1976). A Tabela 11, ilustra os resultados para leito de jorro convencional.

**TABELA 11. Velocidade do Gás no Anel.
Leito de Jorro Convencional.**

H (m)	Z (m)	VELOCIDADE DO GÁS NA COLUNA (m/s)				
		1.96	2.07	2.18	2.29	2.40
0.186	0.06			0.497	0.478	0.436
	0.16			0.720	0.692	0.696
	0.26					0.676
0.162	0.06	0.545				
	0.16	0.697	0.689		0.699	0.682

Em relação aos valores de $\langle U_a \rangle$ obtidos no sistema de jorro modificado os resultados obtidos para esta configuração são apresentados na Tabela 12. Observamos que a velocidade média do gás no anel é dependente da altura do leito e da velocidade do gás na coluna, ocorrendo uma redução com a elevação da altura do leito e, aumentando em geral com o aumento da vazão para qualquer nível no leito.

TABELA 12. Velocidade do Gás no Anel.**Leito de Jorro Modificado. Le = 6.0 cm**

H (m)	Z (m)	VELOCIDADE DO GÁS NA COLUNA (m/s)			
		1.75	1.96	2.18	2.4
0.186	0.06	0.443			
	0.16	0.552		0.550	
	0.26	0.767	0.489	0.516	
0.300	0.16	0.143			0.151
	0.26	0.196			0.236

Comparando os dois sistemas de jorro, verificamos que no sistema modificado, as velocidades do gás na região anular são, em geral, menores para uma mesma altura do leito na região cilíndrica. Entretanto, para a posição Z igual a 0.06 m no leito, observamos que nos dois sistemas a $\langle U_a \rangle$ é, praticamente, coincidente. Isto poderia estar vinculado ao fato de que, no sistema de jorro modificado, a parte inferior do tubo central encontra-se um pouco acima deste ponto.

Baseado na proposta de EPSTEIN et alli (1978), para modelagem dos resultados de distribuição de gás utilizamos o modelo de MAMURO & HATTORI (1968) modificado, Equação (23). Em vez de U_{mf} foi usado o valor de $U_{aH_{max}}$, obtido por extrapolação dos dados experimentais para $H = H_{max}$. O valor encontrado para $U_{aH_{max}}$ foi de 0.783 m/s com desvio de ± 0.088 m/s, sendo bastante inferior à velocidade de mínima fluidização. EPSTEIN et alli (1978), obtiveram um valor mais próximo de U_{mf} , porém também inferior, na ordem de 10%.

Utilizamos, também, o modelo proposto por LEFROY & DAVIDSON (1976), Equação (25), que é generalizado para qualquer altura do leito. Os valores experimentais médios para dois níveis do leito são apresentados na Tabela 13, juntamente com os obtidos a partir desses dois modelos.

TABELA 13. Comparação da U_a média com os obtidos através dos modelos

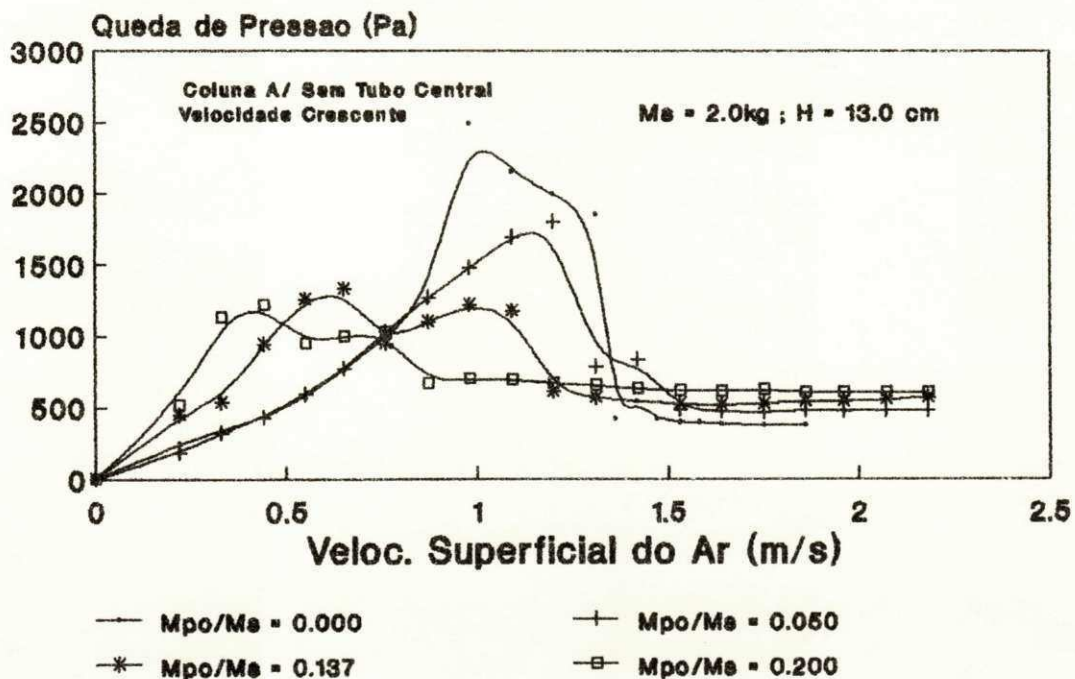
Z (m)	U_a (m/s) EXPERIMENTAL	MODELOS, U_a (m/s)		
		EPSTEIN et alli (1978)	LEFROY & DAVIDSON (1976)	
			H = 0.186	H = 0.162
0.06	0.489	0.453	0.836	0.922
0.16	0.696	0.754	1.682	1.677

Observamos na Tabela 13, que o modelo proposto por MAMURO e HATTORI (1968) modificado por EPSTEIN et alli (1978) ajusta-se melhor com os nossos dados experimentais, apresentando desvio médio de ± 0.03 m/s, enquanto o modelo de LEFROY & DAVIDSON (1976) predizem valores que se afastam muito dos nossos num fator de aproximadamente dois. Esta discrepância, talvez, seja devido a consideração feita pelos autores de U_a ser dependente da altura do leito, comportamento não verificado no presente trabalho.

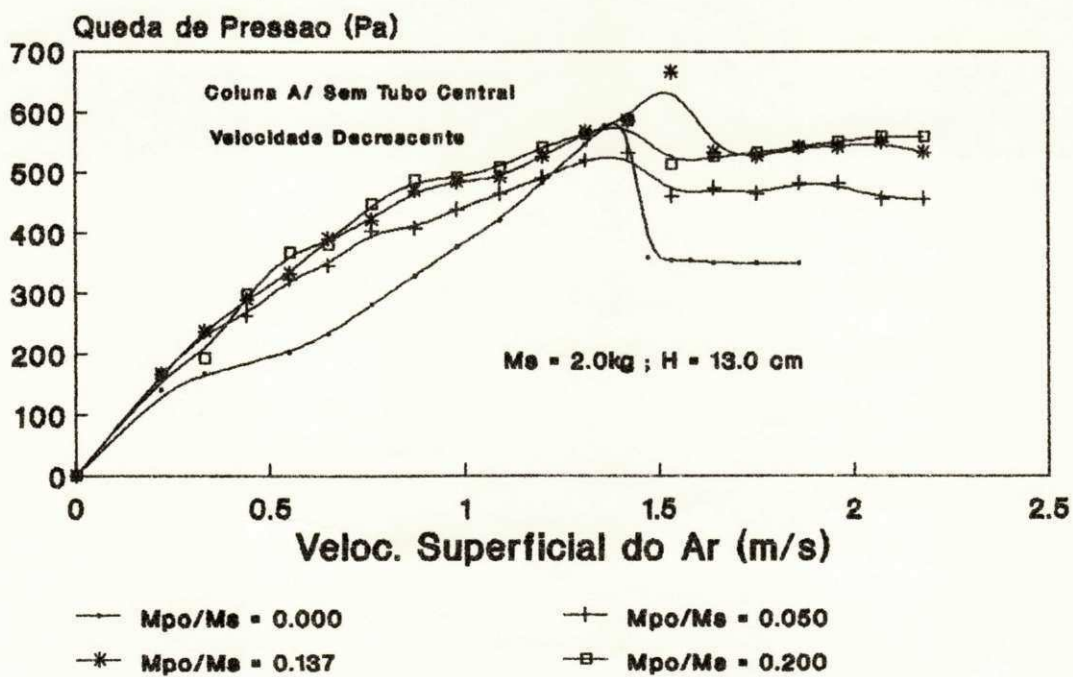
4.5 - Estudos Fluidodinâmicos com Leito de Jorro-Pneumático

A seguir será apresentado o efeito da relação massa inicial de pó / massa de sementes (M_{po}/M_s) nos parâmetros fluidodinâmicos.

Na Figura 4.22, verificamos que o comportamento da curva característica de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar na coluna é similar ao obtido sem presença de pó no leito de jorro tradicional.



(a)



(b)

FIGURA 4.22. Curvas Caracteristicas em Leito de Jorro Convencional com Mistura de Particulas.

Resultados preliminares de U_{jm} , ΔP_{jm} e ΔP_{max} , obtidos em leito de jorro-pneumático, de mistura de partículas com propriedades completamente diferentes são apresentados, para uma mesma altura do leito, aproximadamente 13.0 cm, nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25. Nestes ensaios observamos que além de ocorrer o jorro das partículas maiores, sementes de urucum, as partículas de dimensões menores, o pó do urucum, eram arrastadas pneumaticamente escapando da coluna.

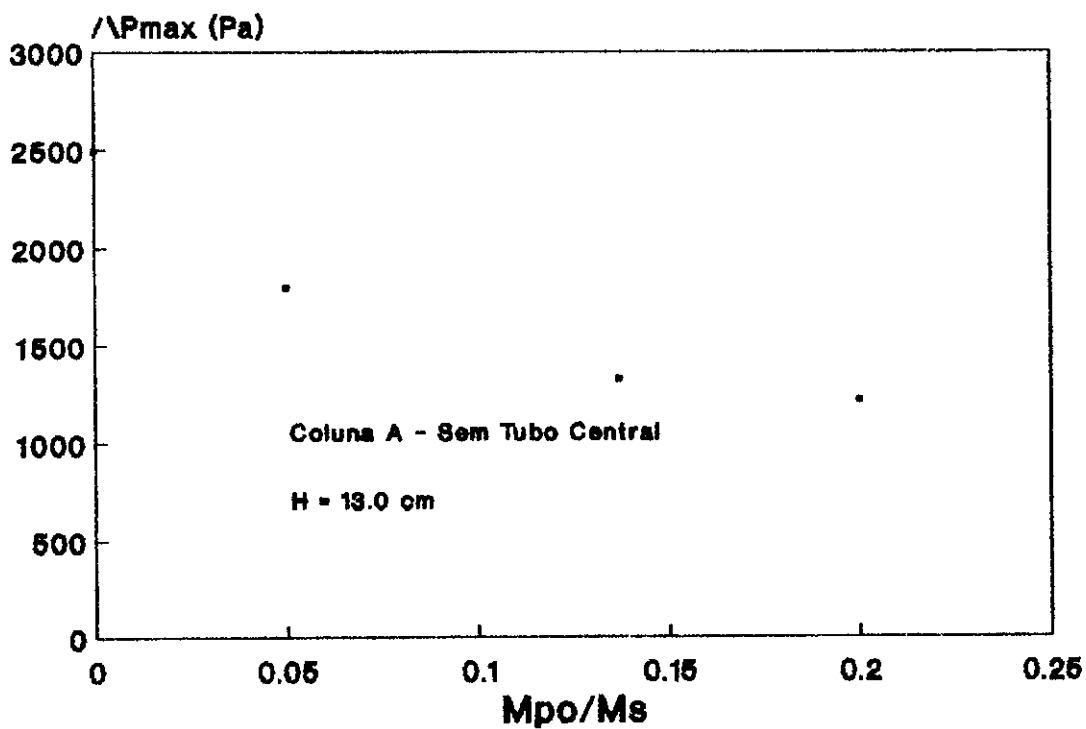


FIGURA 4.23. Efeito da Massa de Pó Inicial / Massa de Sementes na Queda de Pressão Máxima.

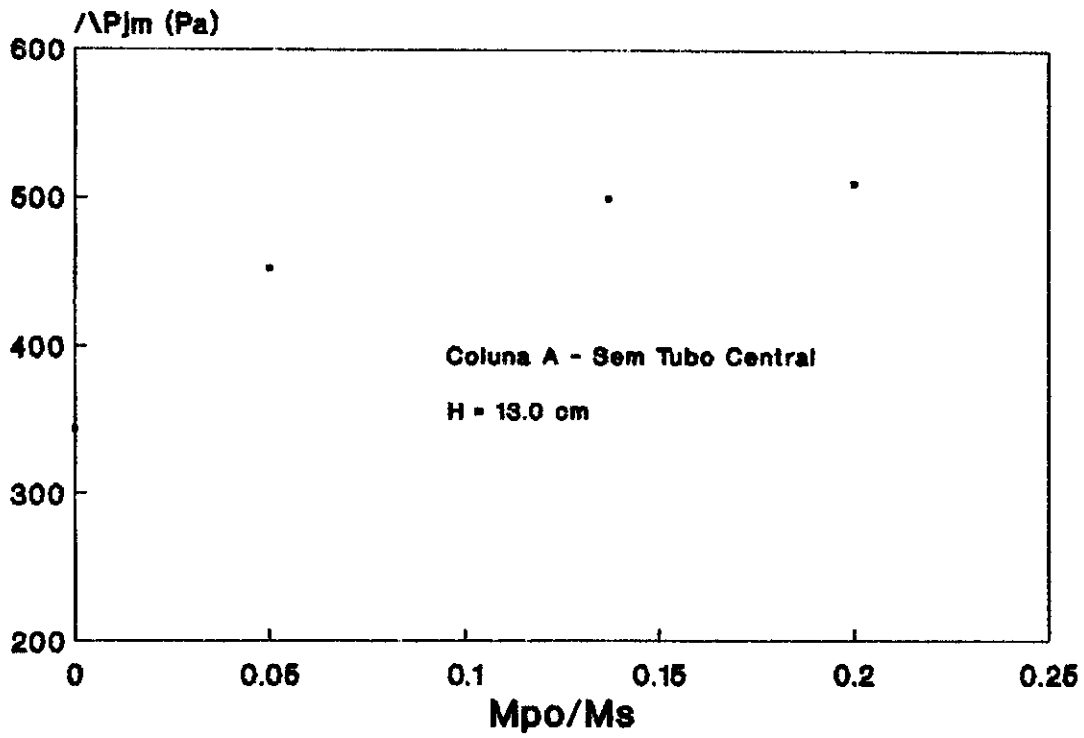


FIGURA 4.24. Efeito da Massa de Pó Inicial / Massa de Sementes na Queda de Pressão Mínima de Jorro.

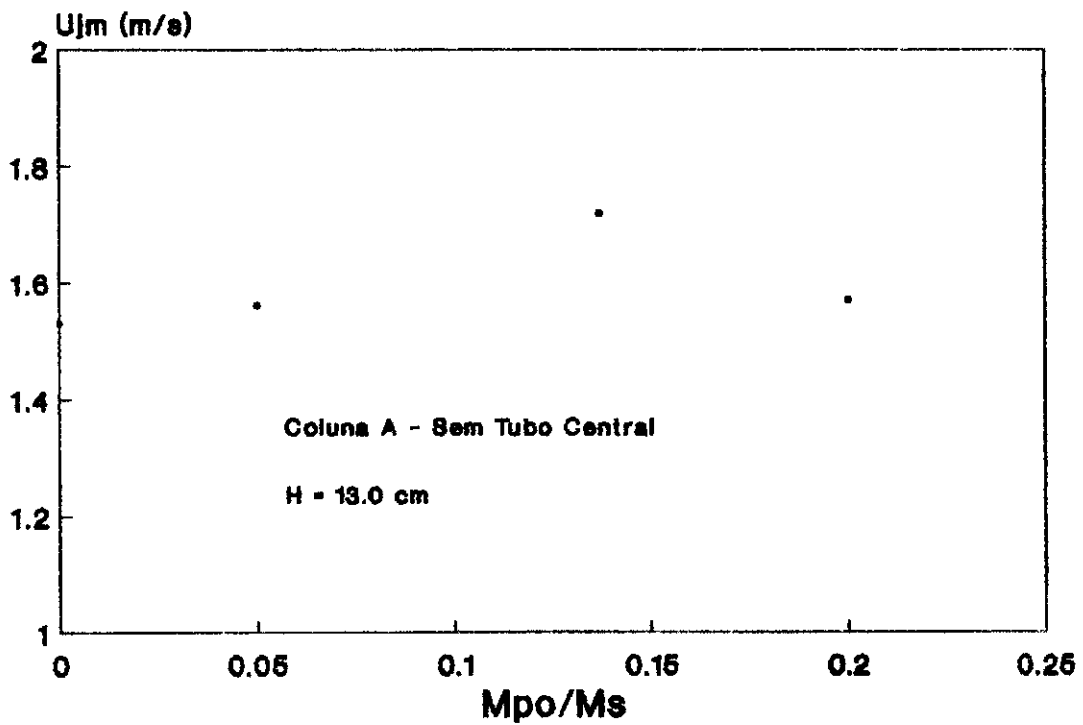


FIGURA 4.25. Efeito da Massa de Pó Inicial / Massa de Sementes na Velocidade Mínima de Jorro

Na Figura 4.23, observamos que ΔP_{max} diminui com o aumento de M_{po}/M_s . Este efeito pode ser explicado pela alteração sofrida na porosidade do leito, pois quando inicia-se o processo para obtenção dos valores de perda de carga em função da velocidade do ar, a vazão provoca um jorro interno e uma parte das partículas menores são arrastadas pneumáticamente, fazendo com que a porosidade do leito seja aumentada antes do jorro aflorar a superfície. Quanto maior a massa inicial de pó maior será a fração de vazios deixada no leito quando do arraste do pó. Observamos, também, que a partir de uma razão de M_{po}/M_s de aproximadamente 0.17, a queda de pressão máxima tende a se estabilizar.

Uma vez aflorado o jorro, predomina a diminuição da porosidade no anel, devido ao preenchimento dos interstícios pelo pó remanescente na coluna junto com o produzido durante o processo de atrição. O efeito da presença do pó, manifesta-se num aumento da queda de pressão de jorro mínimo, ΔP_{jm} , com o aumento da relação inicial M_{po}/M_s , como podemos observar na figura 4.24. Verificamos, também, que o efeito tende a ser desprezível a partir de um valor próximo a 0.17.

Em relação a velocidade de jorro mínimo, U_{jm} , verificamos na Figura 4.25, que o seu valor evolui gradativamente como o aumento da proporção M_{po}/M_s . Em seguida, para um valor próximo a 0.17, U_{jm} , tende a diminuir. Este comportamento pode estar relacionado com a possível estabilização de ΔP_{max} e ΔP_{jm} a partir deste ponto, e a ocorrência simultânea dos dois efeitos opostos assinalados anteriormente: uma tendência ao aumento da porosidade do jorro pelo arraste pneumático do pó, junto com uma diminuição da porosidade do anel, pelo preenchimento dos interstícios entre as partículas maiores pelas partículas menores.

4.6 - Ampliação de Escala

Para uma melhor análise do estudo de mudança de escala os dados, de U_{jm} , ΔP_{jm} e ΔP_{max} , apresentados na seção anterior serão mostrados em conjunto nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28.

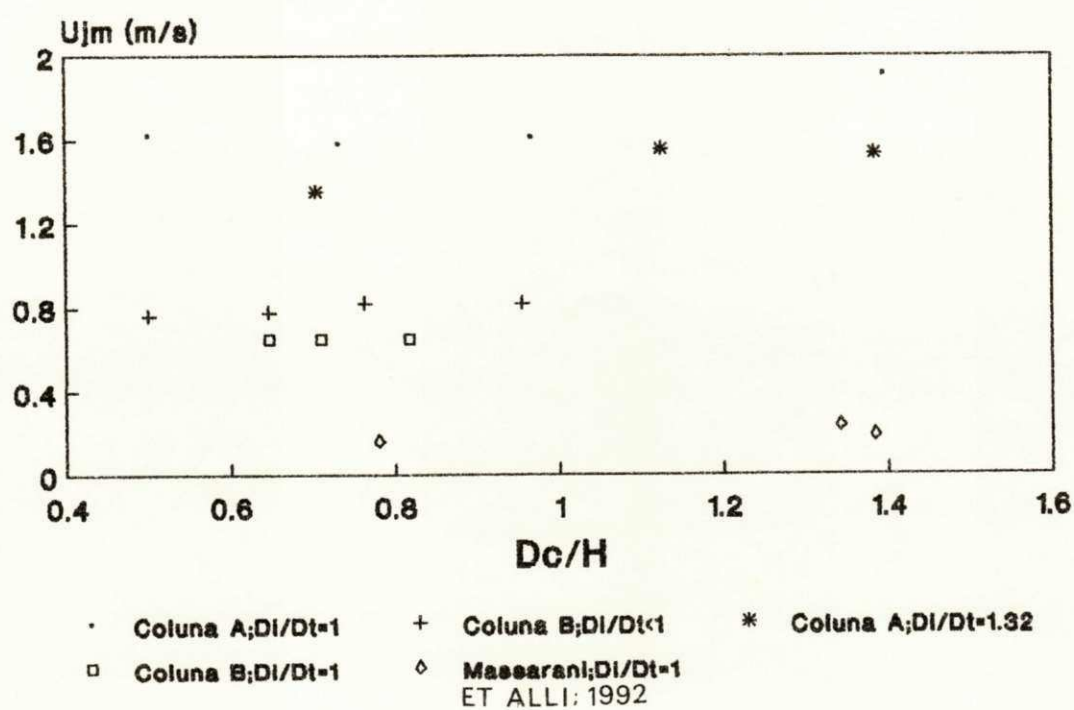


FIGURA 4.26. Efeito da Ampliação de Escala na Velocidade Mínima de Jorro.

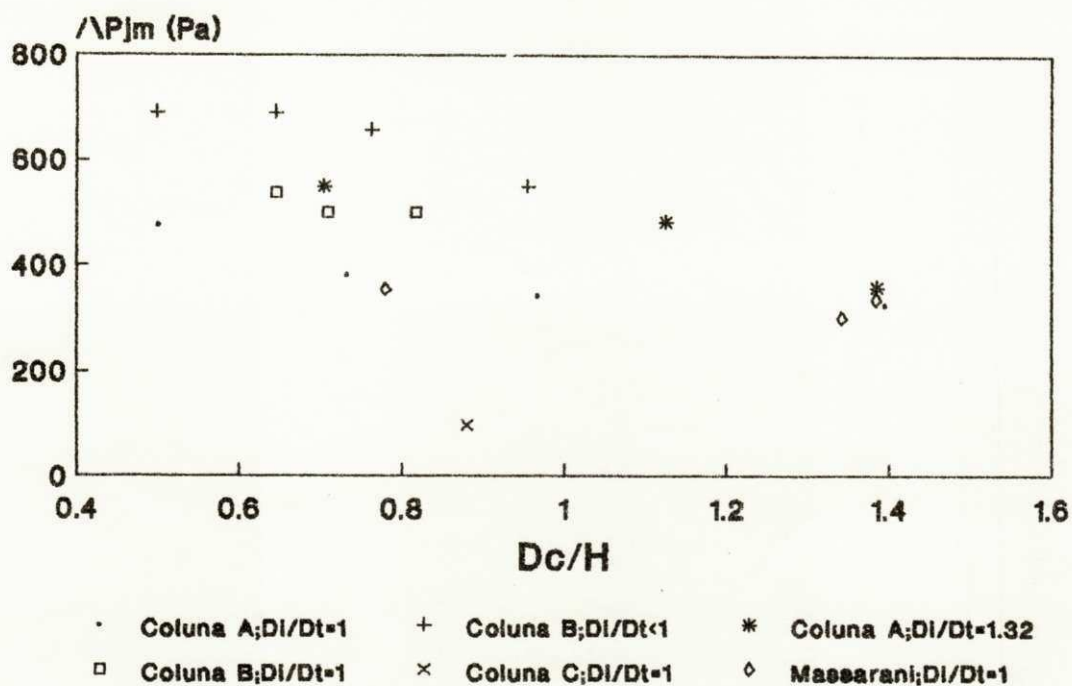


FIGURA 4.27. Efeito da Ampliação de Escala na Queda de Pressão Mínima de Jorro.

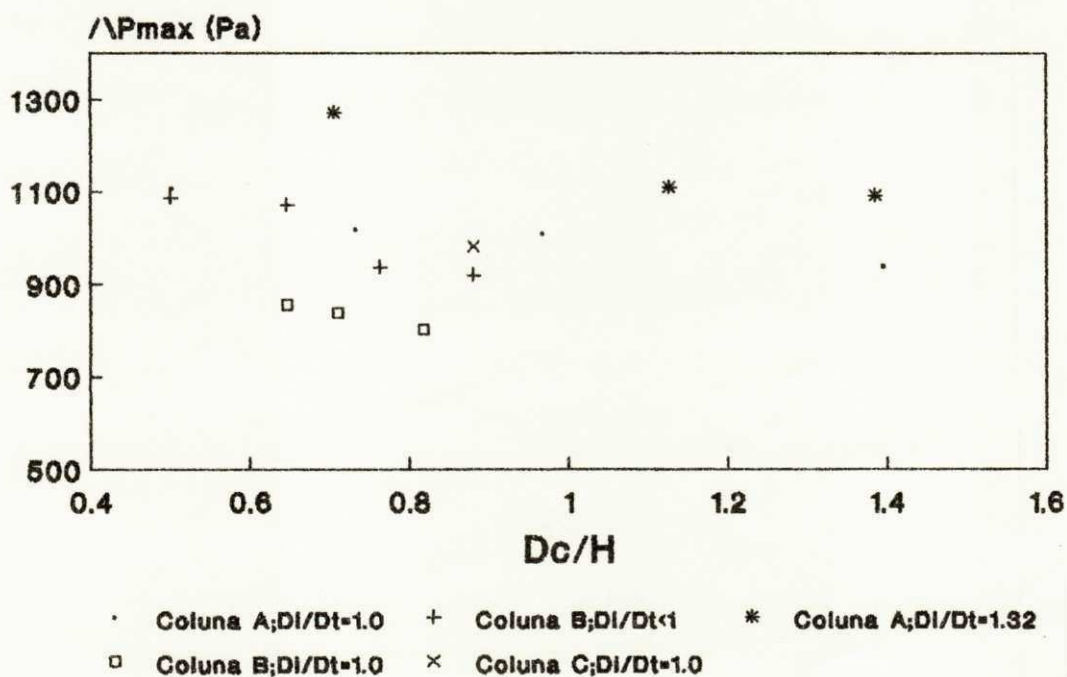


FIGURA 4.28. Efeito da Ampliação de Escala na Queda de Pressão Máxima de Jorro.

Na Figura 4.26, se observa o efeito da ampliação de escala sobre a velocidade de jorro mínimo. A utilização dos dados de MASSARANI et alli (1992) para efeito de comparação, foi acompanhada de um procedimento semelhante ao descrito na Seção 4.3.5 na conversão da velocidade do gás no orifício de entrada, considerando o diâmetro do cone na superfície do leito. Observamos nesta figura que U_{jm} aumenta significativamente para colunas com diâmetros menores.

Em geral, na Figura 4.27, observamos que a queda de pressão de jorro mínimo tende a diminuir, com o aumento de D_c/D_t e a diminuição de D_i/D_t . Verificamos, que nos dois casos onde D_c/D_t é igual a 3.6, os valores obtidos com a razão de D_i/D_t menor são inferiores. Afastam-se deste comportamento, como ressaltado na seção 4.3.3 os pontos de ΔP_{jm} , nos quais o tubo central possui o diâmetro maior do que o orifício de entrada do ar.

Com relação à queda de pressão máxima, o comportamento é semelhante, como pode ser visto na Figura 4.28. Observamos que ΔP_{max} é maior quando o diâmetro da coluna é superior. Porém, devemos ressaltar que o único caso onde foi possível determinarmos ΔP_{max} na coluna C, este apresentou valor da mesma ordem de grandeza, com os obtidos na coluna A. Infelizmente, MASSARANI et alli (1992) não apresentaram dados sobre este parâmetro, de forma que não podemos fazer nenhuma análise comparativa, haja visto, ser a queda de pressão máxima o parâmetro mais difícil de ser determinado com precisão, apresentando pouca reprodutibilidade. Permanece em aberto a questão para estudos futuros.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos permitem concluir que:

- Em relação ao leito de jorro convencional, os resultados obtidos em relação ao efeito da altura do leito concordam em geral, com o comportamento previsto na literatura.

Algumas correlações disponíveis foram utilizadas para estimar os valores de H_{max} , ΔP_{jm} , ΔP_{max} e U_{jm} . No estado atual da arte, as correlações empíricas apresentaram apenas aproximações, e, são recomendáveis como estimativas preliminares, não podendo ser generalizadas.

- De acordo com os resultados obtidos no sistema de jorro modificado observamos, que:

- praticamente elimina a restrição do sistema convencional relacionado à altura máxima onde ainda se obtém um jorro estável, aumentando consideravelmente a capacidade da coluna;
- apresentou uma significativa diminuição na perda de carga e vazão do ar necessária à manutenção do jorro, para alturas de leito elevadas;
- a velocidade de jorro mínimo independe da relação D_i/D_r ;

- a queda de pressão máxima e mínima de jorro, dependem da relação D_c/D_t . Sendo maiores para valores de D_c/D_t mais altos. Contudo, também, são afetados pela relação D_i/D_t .

Com respeito ao estudo de mudança de escala, em leito de jorro com tubo central, as principais modificações observadas, foram:

- ΔP_{jm} e ΔP_{max} tendem a diminuir com o aumento de D_c/D_t e a redução de D_i/D_t ;
- a velocidade de jorro mínimo apresenta uma diminuição para colunas de diâmetros mais elevados independente de D_i/D_t .

De acordo com os modelos analisados para determinação da velocidade média do gás no anel, observamos que apesar de termos utilizado no presente trabalho uma técnica de menor precisão que as aplicadas pelos diversos pesquisadores citados, os nossos dados experimentais se ajustam de forma satisfatória ao modelo proposto por MAMURO & HATTORI (1986) modificado por EPSTEIN et alli (1988).

Em relação ao estudo inicial do mecanismo do leito de jorro-pneumático, de mistura de partículas com características diferentes, observamos que o comportamento ΔP_{jm} e ΔP_{max} são inversos em relação a razão de M_{po}/M_s , ou seja um tende a aumentar enquanto que o outro a diminuir, respectivamente. Contudo, verificamos que U_{jm} evolui gradativamente com o aumento de M_{po}/M_s , passando em seguida a diminuir.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES

Para prosseguimento do presente trabalho, algumas sugestões são consideradas importantes. Entre estas são consideradas imediatas:

- Avaliar os parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro-pneumático, para outras alturas do leito e razão de M_{po}/M_s ;
- verificar a aplicabilidade do modelo de distribuição de velocidade proposto por MATTHEW et alli (1988);
- estudar um modelo do mecanismo de atrição para predizer a produção de pó.
- realizar medidas diretas de velocidade utilizando anemometria a laser;
- aprofundar o estudo de mudança de escala para diversas relações de D_s/D_t , para avaliar melhor a sua influência.

BIBLIOGRAFIA

- ABDELRAZEK, I. D. *"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. *"Desidratação de Polpa de Umbu"*. Relatório de Estágio Integrado. Campina Grande: UFPB, 1991.
- ALSINA, O. L. S., SILVA, G. F. *"Secagem de Urucum em Leito de Jorro: Estudo dos Efeitos das Variáveis Operacionais"*. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. p. 355-366, 1991.
- BABU, S. P., SHAH, B. e TALWAKAR, A. *"Fluidization Correlations for Coal Gazeification Materials, Minimum Fluidization Velocity and Fluidized Bed Expansion Ratio"*. Citado por MURACHMAN, B. *"Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz"*. Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.
- BARRETO, D. W., JAEGER, L. M. & MASSARANI, G. *"Produção de Concentrado de Bixina em Leito de Jorro: III"*. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. V.I, p. 175-179, 1989.
- BARROSO, M. A. S. *"Secagem de Grãos em Leito de Jorro não Convencional"*. Citado por DUTRA, C. H. M. C. *"Dinâmica do Leito de Jorro não Convencional"*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1984.

- BECKER, H. A. *"An Investigation of Baws Governing the Spouting of Coarse Particles"*, citado por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. New York. Academic Press, 1974.
- BERRUTI, F., MUIR, J. R. & BEHIE, L. A. *"Solids Circulation in a Spout-Fluid Bed with Draft Tube"* : The Canadian Journal of Chemical Engineering. v.66, p. 919-923, 1988.
- BOTTERIL, J. S. M., TEOMANY, Y. e YUREGIR, K. R., *"Comments on Minimum Fluidisation at high Temperatures"*. Citado por MURACHMAN, B. *"Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz"*. Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990. (a)
- BOTTERIL, J. S. M., TEOMANY, Y. e YUREGIR, K. R., *"The Effect of Operating Temperature on the Velocity of Minimum Fluidization, Bed-Voidage and General Behaviour"*. Citado por MURACHMAN, B. *"Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz"*. Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990. (b)
- CARVALHO, P. R. N. *"Extração de Corante de Urucum"*. Seminário: Corantes Naturais para Alimentos, Campinas, 1989.
- CHATTERJEE, A. *"Spout-Fluid Bed Technique"*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 9, 340, 1970.
- CAFLIN, J. K. & FANE, A. G. *"Spouting with a Porous Draft-Tube"*. In: The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 61, p. 356, 1983.
- CAFLIN, J. K. & FANE, A. G. *"Gás Distribution and Heat Transfer in a Draft Tube Spouted Bed"*. Citado por LIMA, M. F. M. *"Desidratação de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Estudos Fluidodinâmicos e Térmicos"*. Tese de M.Sc., UFPB, 1992.

- COUTINHO, P. L. A. "*Secagem de Soja em Leito de Jorro*". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1983.
- DAMASCENO, Y. "*Corantes: Guerra aos Sintéticos Ressuscita os Naturais*". Química e Derivados, marco, (10), 1988.
- DUTRA, C. H. M. C. "*Dinâmica do Leito de Jorro não Convencional*". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1984.
- EPSTEIN, N., LIM, C. J. & MATHUR, K. B. "*Data and Models for Flow Distribution and Pressure Drop in Spouted Beds*". The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 56, p. 436-447, ago 1978.
- EPSTEIN, N. & LEVINE, S. "*Darcy Flow and Pressure Distribution in a Spouted Bed*". Citado por EPSTEIN, N., LIM, C. J. & MATHUR, K. B. "*Data and Models for Flow Distribution and Pressure Drop in Spouted Beds*". The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 56, 1978.
- ERGUN, S. "*Determination of Particle Density of Crushed Porous Solids*". Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz*". Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.
- ERGUN, S. "*Fluid Flow Through Packed Columns*". Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz*". Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.
- ERGUN, S. "*Thèse Ph. D. a l'Université Wisconsin*" (1958), Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz*". Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.
- GELDART, D. "*Gas Fluidization Technology*", John Wiley e Sons, New York, London, 1986.

GIUDICI, R., CHIAPPETTA, A. & NASCIMENTO, C. A. O. "*Perda de Carga em Leito de Jorro Modificado*", Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. 1, Rio de Janeiro, 1983.

GRBAVCIC, A. B., VUKOVIC, D. U. & ZDANSKI, F. K. "*Fluid Flow Pattern, Minimum Spouting Velocity and Pressure Drop in Spouted Beds*". The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 54, p. 33, 1976.

GRBAVCIC, Z. B., VUKOVIC, D. V., GARIG, R. V. e HADZISMAFLOVIC, Dz. E., Citado por HADZISMAFLOVIC, Dz. E., GRBAVCIC, Z., POVRENOVIC, D. S., VUKOVIC, D. V. & GARIC, R. V. "*The Hydrodynamic Behaviour of a 0.95m Diameter Spout-Fluid Bed with a Draft Tube*". Int, Fluidiz. Conf., Austrália, 1992.

HAJI-ZAINALI, M. "*Solids Size Reduction in a Spouted Bed*". Citado por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N. "*Spouted Beds*". New York: Academic Press, 1974.

HADZISMAFLOVIC, Dz. E. et al. In: "*Fluidization V*". Ed. J. R. GRACE et al. Citados por MUJUNDAR, A. S. "*Spouted Beds: principles and recent developments*". Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. v. 1, 1989.

HADZISMAFLOVIC, Dz. E., GRBAVCIC, Z., POVRENOVIC, D. S., VUKOVIC, D. V. & GARIC, R. V. "*The Hydrodynamic Behavior of a 0.95m Diameter Spout-Fluid Bed with a Draft Tube*". Int, Fluidiz. Conf., Austrália, 1992.

KHOE, G. K. & VAN BRAKEL, J. "*Solids Sep. Processes, I*", citados por MUJUNDAR, A. S. "*Spouted Beds: Principles and Recent Developments*". Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. v. 1, 1989.

LEFROY, G. A. & DAVIDSON, J. F. "*The Mechanics of Spouted Beds*". Trans. Int. Chem. Eng. v. 47, t120, 1969.

- LIMA, M. F. M., SOUSA, F. M. F. & ALSINA, O. L. S. "*Secagem de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Variáveis Fluidodinâmicas do Leito*". Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, V. I, p. 367-377, Campinas, 1991.
- LIMA, M. F. M. "*Desidratação de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Estudos Fluidodinâmicos e Térmicos*". Tese de M.Sc., UFPB, Ago 1992.
- LIMA, V. E. "*Determinação das Propriedades Físicas e Secagem em Leito de Jorro das Sementes de Urucum*". Relatório de Estágio Integrado. DEQ/CCT/UFPB, Campina Grande, 1993.
- LUCAS, A., ARNALDOS, J., CASAL, J. & PUIGJANER, L. "*High Temperature Incipient Fluidization in Mono and Polydisperse Systems*". Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques Dans les Lits Fluidises par les Gaz*". Tese de Doutorado, I. N. P., Toulouse, 1990.
- MADONNA, L. A., LAMA, R. F. e BRISSON, W. L. "*Solids-air Jets*". Citado por LIMA, M. F. M. "*Desidratação de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Estudos Fluidodinâmicos e Térmicos*". Tese de M.Sc., UFPB, 1992.
- MAEGAVA, L. M. & CHAMAS, C. I. "*Análise da Dinâmica do Leito de Jorro não-Convencional para Partículas de Xistos*". Anais do XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. p. 118-131, 1987.
- MALEK, M. A., MADONNA, L. A. & LU B. C. Y. "*Estimation of Spout Diameter in a Spouted Bed*". Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop. v.2, p-30, 1963.
- MAMURO, T. & HATTORI, H. "*Flow Pattern of Fluid in Spouted Beds*", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.

- MANURUNG, P. "*Studies in the Spouted Bed Technique with Particular Reference to Low Temperature Coal Carbonization*", citado por COUTINHO, P. L. A., "*Secagem de Soja em Leito de Jorro*", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1983.
- MARTIN, H. "*Heat and Mass Transfer in Fluidized Beds*". Int. Chem. Eng., 22, p. 30-43, 1982.
- MASSARANI, G., PASSOS, M. L. e BARRETO, D. W. "*Production of Annatto Concentrates in Spouted Beds*". Canadian Journal of Chem. Eng. Vol. 70, p. 954-959, 1992.
- MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. "*Spouted Beds*". New York: Academic Press, 1974.
- MATHUR, K. B. & GISHLER, P. E. "*A Technique of Contacting Gases with Coarse Solid Particles*", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.
- MATTHEW, M. C., MORGAN, M. H. & LITTMAN, H. "*Study of the Hydrodynamics Within a Draft Tube Spouted Bed System*". The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 66. p. 908-917, 1988.
- MELLO, A. A. A. & LIMA, L. C. F. "*Urucum: Situação Atual e Perspectiva Região Norte e Nordeste*". Seminário: Corantes Naturais para Alimentos, Campinas, 1989.
- MIKHAILIK, V. D. "*The Pattern of Change of Spout Diameter in a Spouting Bed*"; collected works on Research on heat and Mass Transfer in Technological Processes, citado por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.
- MUJUNDAR, A. S. "*Spouted Beds: Principles and Recent Developments*". Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. V. 1, p. 03-13, 1989.

- MURACHMAN, B. *"Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz"*. Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.
- NEMETH, J., PALLAI, E. e ARADI, E. *"Scale-up Examination of Spouted Bed Dryer"*. Citado por RÉ, J. I. & FREIRE, J. T. *"Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro"*. Tese de M.Sc., UFSCar, 1986.
- OLIVEIRA, V. P. *"Urucum: Situação Atual e Perspectiva Região Sul e Sudeste"*. Seminário: Corantes Naturais para Alimentos, Campinas, 1989.
- PALLAI, I. & NEMETH, J. *"Residence Time Distribution in Spouting Beds"*, citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. New York: Academic Press, 1974.
- PASSOS, M. L., MUJUNDAR, A. S., RAGHAVAN, V. G. S. *"Dinâmica do Leito de Jorro Fluidizado Bidimensional"*. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. V.I, p. 295-306, 1989.
- PERES, W. B. & MASSARANI, G. *"Xisto: Caracterização Física e Dinâmica do Leito de Jorro"*. Anais do XIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. São Paulo, v. 2, p. 376-382, 1988.
- PICCININI, N., GRACE, J. R., MATHUR, K. B. *"Vapour Phase Chemical Reaction in Spouted Beds: Verification of Theoretical"*. Chem. Eng. sci., 34, p. 1257-1263, 1979.
- RÉ, J. I. & FREIRE, J. T. *"Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro"*. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. Campinas, p. 85-98, 1986.
- RÉ, J. I. & FREIRE, J. T. *"Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro"*. Tese de M.Sc., UFSCar, 1986.

- REDDY, K. V. S., FLEMING, R. J. & SMITH, J. W. "*Maximum Spoutable Bed Depths of Mixed Particles-Size Beds*", citados por COUTINHO, P. L. A., "*Secagem de Soja em Leito de Jorro*", Tese de M.Sc., COOPE/UFRJ, 1983.
- REYES, A. & MASSARANI, G. "*Secado de Pastas en Lecho de Chorro*". Resumo do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. p. 61, 1991.
- RICHARDSON, J. F. "*Incipient Fluidization and Particles System*". Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques Dans les Lits Fluidises par les Gaz*". Tese de Doutorado, I. N. P., Toulouse, 1990.
- ROMANKOV, P. G. & RASHKOVSKAYA, N. B. "*Drying in a Suspended State*", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.
- SAMPAIO, L. S. V. "*Dinâmica do Leito de Jorro*", citado por COUTINHO, P. L. A. "*Secagem de Soja em Leito de Jorro*", Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, 1983.
- SAXENA, S. C. e VOGEL, G. J. "*The Measurement of Incipient Fluidization Velocities in a Bed of Coarse Dolomite at Temperature and Pressure*". Citado por MURACHMAN, B. "*Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz*". Dissertação de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990. (a)
- SILVA, O. S. "*Processamento de Urucum em Leito de Jorro*". Relatório de Estágio Supervisionado. Campina Grande: UFPB, 1993.
- SILVA, G. F. "*Processamento de Urucum em Leito de Jorro*". Dissertação de Mestrado. Campina Grande: UFPB, 1991.
- SOUZA, F. M. F. "*Efeito da Altura do Leito de Inerte*". Relatório de Iniciação Científica. CNPQ, 1992.

THORLEY, B., SAUNBY, J. B., MATHUR, K. B. & OSBERG, G. L. "*An Analysis of Air and Solid Flow in a Spouted wheat Bed*". The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 37, p.184-192, 1959.

THORLEY, B., SAUNBY, J. B., MATHUR, K. B. & OSBERG, G. L. "*An Analysis of Air and Solid Flow in a Spouted wheat Bed*", citados por COUTINO, P. L. A., "*Secagem de Soja em Leito de Jorro*", Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, 1983.

VAN VELZEN, D., FLAMM, R. J. & LANGENKAMP, H. "*Gas Flows in Spouting Beds*", citados por MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. New York: Academic Press, 1974.

ZULKE, K. R., GUBULIN, I. C. & FREIRE, J. T. "*Leito de Jorro com Aeração Complementar. Aspectos Hidrodinâmicos*". Anais do XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos. V.1 p. 132-140, 1987.

APÊNDICE 01

TABELA 01: Leito Fluidizado

D_c/D_i	H (cm)
3.6	8.0
	17.0
	20.0
	30.0

TABELA 02: Leito de Jorro Convencional. $\theta = 60^\circ$

COLUNA	D_c/H
A	1.451
	0.967
	0.763

TABELA 03: Leito de Jorro com Tubo Central $D_c/H_t = 0,5$; $L_e = 60\text{cm}$;

$\theta = 60^\circ$

COLUNA	D_c/D_t	D_c/H
A	3.6	0.501
		0.732
		0.967
		1.395
	4.7	0.705
		1.125
		1.385
B	4.1	0.500
		0.646
		0.763
		0.955
	6.0	0.646
		0.709
C	8.0	0.817
		0.880

TABELA 04: Circulação de Sólidos

COLUNA	MASSA (Kg)	D_c/D_t	U (m/s)
B	17-21	6.0	0.75
			0.79
			0.83
			0.87

TABELA 05: Distribuição Radial de Pressão. $D_t = 3,8$ cm; $D_c = 18,0$ cm

COLUNA	CONFIGURAÇÃO	D_c/H	Z/H	U (m/s)
A	Convencional	0.967	0.323-0.860	2.18
				2.29
			2.40	
A	Convencional	1.111	1.398	2.40
			0.370	1.96
				1.96
				2.07
				2.29
2.40				
A	Modificada	0.967	0.952	1.75
				2.95
			1.398	1.75
				1.96
				2.18
2.40				
A	Modificada	0.600	0.533	1.75
				2.40
			0.867	1.75
				2.40

APÊNDICE 02

TABELA 01 - Faixa Operacional das Correlações Empíricas

Continua

CORRELAÇÃO	MATERIAL UTILIZADO	FAIXA OPERACIONAL UTILIZADA
(1)	$d_p = 70 - 2870 \mu\text{m}$ $\phi = 0.63 - 0.74$ $\rho_s = 2.56 - 3.924 \text{ g/cm}^3$	$D_c = 3.1 - 29.2 \text{ cm}$ $Re_{mf} = 0.02 - 170$
(2)	$d_p = 88 - 1410 \mu\text{m}$ $\phi = 0.73 - 0.98$ $\rho_s = 2.46 - 2.41 \text{ g/cm}^3$	$D_c = 15.2 \text{ cm}$ $Re_{mf} = 6.4 - 102$
(3)	$d_p = 250 - 1000 \mu\text{m}$ $\phi = 1.0$ $\rho_s = 2.46 - 2.41 \text{ g/cm}^3$	$D_c = 3.4 \text{ cm}$ $Re_{mf} = 1 - 1000$
(5)		$D_c = 15.2 \text{ cm}$ $D_i = 0.95 \text{ cm}$ $\theta = 85^\circ$
(6)	$d_p = 9 - 19 \text{ mm}$	$D_c = 15 \text{ cm}$ $H = 33 - 58 \text{ cm}$ $\theta = 60^\circ$
(7)	$d_p = 0.05 - 0.08 \text{ cm}$ $\rho_s = 2.46 - 7.07 \text{ g/cm}$	$D_c = 5 - 10 \text{ cm}$ $D_c/D_i = 12$ $H/D_c = 1 - 3$
(9)	$d_p = 0.17 \text{ cm}$ $\rho_s = 0.58 \text{ g/cm}$	$D_c = 30.5 \text{ cm}$ $D_c/D_i = 12$ $H/D_c = 0.5$ $\theta = 180^\circ$
(10)	Milho Sorgo	$D_c = 32.0 \text{ cm}$ $D_i = 5.08 \text{ cm}$ $\theta = 35^\circ$
(11)	Trigo $d_p = 0.48 \text{ cm}$	$D_c = 71 \text{ cm}$ $D_c/D_i = 6.0$ $H/D_c = 10$ $\theta = 60^\circ$

TABELA 01 - Faixa Operacional das Correlações Empíricas

		Conclusão
CORRELAÇÃO	MATERIAL UTILIZADO	FAIXA OPERACIONAL UTILIZADA
(13)	Poliestireno	$D_i = 2.55 - 5.1 \text{ cm}$ $\theta = 180^\circ$ $H = 75 - 180 \text{ cm}$
	Trigo	$D_c = 61 \text{ cm}$ $D_i = 10.2 \text{ cm}$ $\theta = 60^\circ$ $H = 183 \text{ cm}$
(15)	Trigo	$D_c = 15.2 \text{ cm}$ $D_i = 0.9 - 1.9 \text{ cm}$ $\theta = 25^\circ$ $H = 30 - 61 \text{ cm}$
(30)	$d_p = 0.52 - 0.61 \text{ mm}$ $\rho_s = 2.46 \text{ mg/m}^3$	$D_c = 5 - 10 \text{ cm}$ $D_i = 0.42 - 0.85 \text{ cm}$ $H = 7.6 - 33 \text{ cm}$ $W_g/A_c = 0.13 - 0.43 \text{ kg/s m}^2$
(31)	$d_p = 1.3 - 7.3 \text{ mm}$ $\rho_s = 0.92 - 1.4 \text{ mg/m}^3$	$D_c = 10 - 61 \text{ cm}$ $D_i = 0.6 - 10 \text{ cm}$ $H = 15 - 183 \text{ cm}$ $W_g/A_c = 0.35 - 1.8 \text{ kg/s m}^2$
(33)	$d_p = 1.5 - 4 \text{ mm}$ $\rho_s = 1.4 - 7.8 \text{ mg/m}^3$	$D_c = 9.4 - 14 \text{ cm}$ $D_i = 1.5 - 2.5 \text{ cm}$ $H = 5 - 25 \text{ cm}$ $W_g/A_c = 0.71 - 5.25 \text{ kg/s m}^2$

TABELA 02 - Caracterização das Partículas do P6 de Urucum

TAMANHO DA MALHA TYLER	INTERVALO dx (mm)	TAMANHO MÉDIO x (mm)	% NO INTERVALO dφ	x dφ
+28	0.112	0.6450	3.40	2.1930
-28 +35	0.172	0.5030	6.33	3.1840
-35 +48	0.122	0.3560	3.45	1.2282
-48 +80	0.115	0.2375	7.42	1.7623
-80 +100	0.033	0.1635	8.50	1.3898
-100 +200	0.073	0.1105	45.60	5.0476
-200	0.031	0.0585	24.96	1.4602

dp = 0.160 mm

TABELA 03 - Análise Estatística dos Resultados Experimentais em Relação aos Teóricos

AUTOR	Nº DA CORRELAÇÃO	DESVIO PADRÃO MÉDIO
BABU et alli (1978)	1	± 0,195 m/s
SAXENA et alli (1977)	2	± 0,291 m/s
ERGUN (1951, 1952 a e b)	3	± 0,395 m/s
GISHLER (1955)	5	± 0,737 m/s
SMITH e REDDY (1967)	6	± 0,353 m/s
ABDELRAZEK (1969)	7	± 1,002 m/s
MALEK et alli (1955)	8	± 69,237 Pa
LEFROY e DAVIDSON (1969)	9	± 136,905 Pa
NASCIMENTO (1976)	10	± 95,241 Pa
THORLEY et alli (1959)	11	± 1132,872 Pa
GRBAVCIC (1976)	12	± 941,235 Pa
MALEK et alli (1963)	31	± 0,417 cm
LEFROY e DAVIDSON (1969)	32	± 0,389 cm
MIKHAILLK (1977)	33	± 3,656 cm