

CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR DE JORRO FLUIDIZADO BIDIMENSIONAL E ANÁLISE DA SUA FLUIDODINÂMICA

KAREN GLASER MAIALLE

Engenheira de Alimentos

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por KAREN GLASER MAIALLE e aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de março de 1996.

Campinas, 28 de março de 1996

PROFa. DRa. FLORENCIA C. MENEGALLI



**Tese apresentada para obtenção do título de
mestre em Engenharia de Alimentos**

Orientadora: Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli

**Faculdade de Engenharia de Alimentos
Universidade Estadual de Campinas**

1996



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	M27c
V	Ex
TOMBO BC/	27553
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	88,11,00
DATA	02/05/96
N.º CPD	

CM-00088178-1

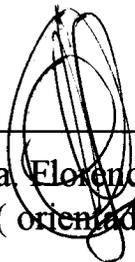
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

M217c, **Maialle, Karen Glaser**
Construção de um secador de jorro fluidizado bidimensional e análise da sua fluidodinâmica / Karen Glaser Maialle. -- Campinas, SP : [s.n.], 1996.

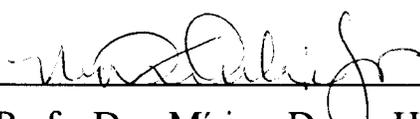
Orientador : Florencia Cecília Menegalli.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.*Jorro. 2.*Jorro fluidizado. 3. Bidimensional.
4. Fluidodinâmica. 5. Secagem. I. Menegalli, Florencia Cecília. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

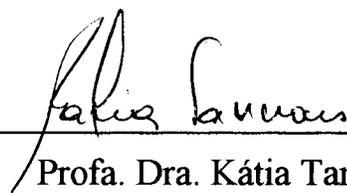
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Eloencina Cecilia Menegalli
(orientadora)



Prof. Dra. Míriam Dupas Hubinger
(banca)



Prof. Dra. Kátia Tannous
(banca)



Prof. Dra. Maria Aparecida Silva
(banca)

Campinas,

de

1996.

**Para Marcos, Giovanna
e meus pais.**

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Florencia Cecilia Menegalli, pela sua orientação, dedicação, paciência e estímulo durante todas as etapas da tese.

Aos professores integrantes da pré-banca, Dra. Mirian Dupas Hubinger, Dra. Maria Aparecida Silva e Dra. Kátia Tannous, pela correção e sugestões à versão inicial deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela cessão de instalações físicas, laboratórios e funcionários.

À técnica Alessandra Rodrigues da Silva, pela colaboração no desenvolvimento do trabalho experimental.

À aluna de Iniciação Científica Carolina Dorin, pelo auxílio na obtenção dos dados experimentais.

À todos que colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho estudou-se a fluidodinâmica do escoamento dos inertes de um secador bidimensional com leito de jorro-fluidizado. O equipamento foi construído com a área da base de $0,015 \text{ m}^2$ ($0,3 \text{ m}$ de comprimento e $0,05 \text{ m}$ de largura) e um metro de altura. Esferas de vidro com $3,8 \text{ mm}$ de diâmetro e densidade de $2516 \text{ kg} / \text{m}^3$ foram adotadas como inertes no interior do leito. Nos casos de estudo da queda de pressão no leito úmido foi utilizada água como fluido teste.

Na análise da fluidodinâmica, duas alturas de inertes no leito foram estudadas (17 e 22 cm). Compararam-se os resultados experimentais de queda de pressão no leito em função da vazão do jorro, da vazão no ânulo e combinações entre as duas vazões. Obteve-se a velocidade mínima de fluidização e / ou de jorro em cada caso.

O estudo do leito úmido forneceu informações sobre o efeito da adição de líquido na velocidade do jorro e na queda de pressão total no leito. Avaliou-se também a capacidade evaporativa do leito em função de diferentes combinações de vazões no ânulo e no jorro.

SUMMARY

The present work investigates the hydrodynamics of a bidimensional spout-fluid bed dryer. The dryer was constructed having $0,015 \text{ m}^2$ transversal area, ($0,3 \text{ m}$ of width, $0,05 \text{ m}$ thickness) by one meter high. The inerts chosen were glass spheres ($3,8 \text{ mm}$ in diameter and 2516 kg / m^3 density) and water was used as the fluid test in the wet bed analysis.

The bed behavior was studied using two different height for the bed (one with 17 cm and another with 22 cm). The experimental results were analyzed as a function of the spouting flow, annulus flow and as a combination of them. The minimum velocities of the fluidization flow and of the spouting flow were obtained for each studied bed.

The effects of the addition of liquid on the spouting velocity and / or the spouting pressure drop were also obtained in the wet-bed study. The evaporation capacity of the bed was accessed in terms of several combinations of spouting and annulus flow.

NOMENCLATURA

A_A	Área da seção transversal do ânulo	(m ²)
A_C	Área da seção transversal do leito	(m ²)
A_o	Área do orifício da placa medidora de vazão	(m ²)
C_D	Coefficiente de arraste	(-)
C_o	Coefficiente de descarga	(-)
C_{par}	Calor específico do ar	(kcal / kg °C)
d_i	Diâmetro da entrada do jorro	(m)
$d_{i \max}$	Diâmetro da entrada do jorro máximo	(m)
$(d_{i \max})_{eq}$	Diâmetro da entrada do jorro máximo equivalente	(m)
D_c	Diâmetro da coluna	(m)
D_i	Diâmetro interno da tubulação	(m)
D_s	Diâmetro médio do jorro	(m)
d_p	Diâmetro médio da partícula	(m)
$(d_p)_{eq}$	Diâmetro equivalente médio da partícula	(m)
g	Aceleração da gravidade	(m / s ²)
G	Velocidade mássica do fluido [$\rho_f \times U_A$]	(kg / m ² s)
h_{fg}	Calor latente de vaporização	(kcal / kg)
Δh	Diferença de altura do fluido manométrico	(m)
H_{mF}	Altura do leito na mínima fluidização	(m)
H_{MS}	Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro convencional	(m)
H_{MSF}	Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro fluidizado	(m)
$H_{MSF mS}$	Altura máxima do leito capaz de produzir jorro nas condições de mínimo jorro	(m)

$H_{MSF\ mSF}$	Altura máxima do leito capaz de produzir jorro nas condições de mínimo jorro fluidizado	(m)
H_S	Altura do leito em jorro convencional	(m)
H_{SF}	Altura do leito em jorro fluidizado	(m)
K_o	Permeabilidade do canal do jorro	(-)
K_1	Permeabilidade da fase densa	(-)
L	Comprimento do leito fixo	(m)
L_1	Largura do leito bidimensional	(m)
L_2	Espessura do leito bidimensional	(m)
L_N	Largura da entrada do jorro em leito bidimensional	(m)
ΔP	Queda de pressão	(N / m ²)
ΔP_{AmF}	Queda de pressão no ânulo, nas condições de mínima fluidização	(N / m ²)
ΔP_{AS}	Queda de pressão no ânulo em jorro convencional	(N / m ²)
ΔP_{ASF}	Queda de pressão no ânulo em jorro fluidizado	(N / m ²)
ΔP_{AS}^{wet}	Queda de pressão no ânulo em jorro convencional, no leito úmido	(N / m ²)
ΔP_{ASF}^{wet}	Queda de pressão no ânulo em jorro fluidizado, no leito úmido	(N / m ²)
ΔP_{mS}	Queda de pressão, nas condições de mínimo jorro	(N / m ²)
P_{bar}	Pressão barométrica	(N / m ²)
P_{amb}	Pressão barométrica do local	(N / m ²)
T_{amb}	Temperatura ambiente	(°C)
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	(°C)
T_{arc}	Temperatura do ar na entrada do secador	(°C)
T_{ars}	Temperatura do ar na saída do secador	(°C)
U	Velocidade superficial do fluido	(m / s)
U_A	Velocidade superficial do ar no ânulo	(m / s)

U_{AH}	Velocidade superficial do ar no topo do ânulo	(m / s)
$U_A (0)$	Velocidade superficial na entrada do ânulo [$V_A (0) / A_A$]	(m / s)
U_{mF}	Velocidade mínima de fluidização	(m / s)
U_{mS}	Velocidade mínima de jorro	(m / s)
$U_N (0)$	Velocidade superficial na entrada do jorro [$V_N (0) / (A_C - A_A)$]	(m / s)
U_P	Velocidade da partícula	(m / s)
U_S	Velocidade superficial do ar no jorro	(m / s)
U_{SH}	Velocidade superficial do ar no topo do jorro	(m / s)
U_T	Velocidade terminal da partícula	(m / s)
V	Vazão volumétrica do fluido	(m ³ / s)
$V_A (0)$	Vazão do fluido na entrada do ânulo	(m ³ / s)
$V_A (0)_{MAX}$	Vazão do fluido no ânulo capaz de fluidizar apenas topo do leito	(m ³ / s)
$[V_A (0)]_{mF}$	Vazão do fluido na entrada do ânulo nas condições de mínima fluidização	(m ³ / s)
$[V_A (0)]_{mSF}$	Vazão do fluido na entrada do ânulo nas condições de mínimo jorro fluidizado	(m ³ / s)
V_b	Volume "bulk" do leito	(m ³)
V_l	Volume de líquido adicionado ao leito	(m ³)
V_{mF}	Vazão mínima de fluidização	(m ³ / s)
V_{mS}	Vazão mínima de jorro	(m ³ / s)
$V_N (0)$	Vazão do fluido na entrada do jorro	(m ³ / s)
$[V_N (0)]_{mSF}$	Vazão do fluido na entrada do jorro nas condições de mínimo jorro fluidizado	(m ³ / s)
V_{real}	Vazão do fluido à T_{amb} e P_{amb}	(m ³ / s)
V_T	Vazão do fluido da velocidade terminal da partícula [$U_T \times A_C$]	(m ³ / s)
x	Distância horizontal no leito	(m)
z	Distância vertical no leito	(m)

GREGAS

β	Razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno da tubulação	(-)
ρ_{ar}	Densidade do ar	(kg / m ³)
ρ_b	Densidade “bulk” dos sólidos em leito livre	(kg / m ³)
ρ_f	Densidade do fluido	(kg / m ³)
ρ_g	Densidade do gás	(kg / m ³)
ρ_{man}	Densidade do fluido manométrico	(kg / m ³)
ρ_p	Densidade da partícula	(kg / m ³)
ρ_s	Densidade do sólido	(kg / m ³)
ϵ	Porosidade no leito fixo	(-)
ϵ_{AH}	Porosidade no topo do ânulo	(-)
ϵ_A^{dry}	Porosidade do leito seco (região anular)	(-)
ϵ_{mF}	Porosidade do leito na mínima fluidização (região anular)	(-)
ϵ_{mS}	Porosidade do leito no mínimo jorro	(-)
μ_f	Viscosidade do fluido	(kg / ms)
μ_{liq}	Viscosidade do líquido de secagem	(kg / ms)
ϕ	Esfericidade da partícula	(-)
η	Viscosidade dinâmica da fase gasosa	(Ns / m ²)

ADIMENSIONAIS

A_{2D}	$Re_{mF} * Re_t d_p / A_r L_N$	
Ar	$\rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$	(Número de Arquimedes)

Fr_{mf}	$(U_{mf})^2 / d_p g$	(Número de Froude)
$g(\phi)$	$\phi (5\phi^3 - 7,57\phi^2 + 4,09\phi - 0,516)$	
Ga	$(d_p \rho_f^2 g / \mu^2)$	(Número de Galileo)
M_v	$(\rho_s - \rho_1) / \rho_1$	(Razão de Densidade)
Re_{mf}^*	Re_{mf} / ϕ	
Re_{mf}	$\rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$	(Número de Reynolds na Mínima Fluidização)
Re_T	$\rho_f d_p g(\phi) U_T / \mu_f$	(Número de Reynolds na Velocidade Terminal)
Re_{ms}	$\rho_f d_p \text{esf} U_{ms} / \mu_f$	(Número de Reynolds no Mínimo Jorro)
c_3	$18(1 - \varepsilon_{ms}) / [(X_{2D}^*)^{(n-1)} \cos^2 \lambda]$	
c_4	$(\varepsilon_{ms} \text{esf})^3 / [2(X_{2D}^*)^{(n-1)}]$	
λ	$180^\circ - 2 \arctan [D / \tan(45^\circ - \theta_c / 2)]$	
D	$2 [X_{2D}^*_{max} / X_{2D}^*]^{(n-1)}$	
$X_{2D}^*_{max}$	$1 / (H_{MS} / L_1 + 1)$	
X_{2D}^*	$1 / (1 - H_{MSF} / L_1)$	
Y^*	$1 - \frac{\Delta P_{ms}}{\Delta P_{AmF}}$	
n	$\tan^2(45^\circ + \theta_c / 2)$	
θ_c	Ângulo de Coulomb da resistência ao cisalhamento de um material particulado sólido	

ÍNDICE

1 - Introdução.....	1
2 - Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Limitações dos Leitos Fluidizados e de Jorro Convencional na Aplicação em Secagem.....	4
2.2 Leitos Fluidizados Convencionais.....	5
2.3 Leitos de Jorro Convencionais.....	11
2.4 Leitos de Jorro Fluidizados.....	18
3 - Desenvolvimento Experimental.....	36
3.1 Equipamento.....	36
3.2 Operação do Equipamento.....	40
4 - Resultados Obtidos e Discussão.....	45
4.1 Descrição da Circulação das Partículas e Tamanho das Zonas Mortas no Leito Seco.....	45
4.2 Queda de pressão no Ânulo em Função da Vazão no Ânulo....	54
4.3 Queda de pressão no Jorro em Função da Vazão no Jorro.....	61
4.4 Perfil de pressão no Leito Seco.....	67
4.5 Queda de pressão no Jorro em Função da Vazão no Jorro em Leito Úmido.....	78
4.6 Capacidade Evaporativa do Secador.....	83
5 - Conclusão.....	89
5.1 Circulação das Partículas e Tamanho das Zonas Mortas.....	89
5.2 Queda de Pressão no Ânulo em Função da Vazão no Ânulo....	89
5.3 Queda de Pressão no Jorro em Função da Vazão no Jorro.....	90
5.4 Perfil de Pressão no Leito.....	90

5.5 Queda de pressão no Leito Úmido	90
5.6 Capacidade Evaporativa do Leito Úmido	91
5.7 Sugestões de Trabalhos Futuros.....	91
Referências Bibliográficas.....	92
Apêndice A.....	99
Apêndice B	104
Apêndice C	107

1 - INTRODUÇÃO

A técnica de jorro foi descrita pela primeira vez por MATHUR & GISHLER, 1955 e é aplicada industrialmente para secagem de grãos desde 1962. Recentemente, estudos para a secagem de pastas e líquidos estão sendo desenvolvidos e relatados na literatura.

Os secadores de jorro tradicionais apresentam sérios problemas de zonas estagnadas ao longo da coluna. Para resolvê-los foi proposta uma modificação no leito de jorro padrão fornecendo ar complementar para a região anular, de maneira a promover a fluidização. Como resultado, o leito de jorro fluidizado apresenta melhor mistura dos sólidos, melhor contato fluido-sólido e menor tendência dos sólidos se aglomerarem.

A geometria dos secadores de jorro é geralmente a cônica-cilíndrica. Esta geometria apresenta algumas limitações bem conhecidas no que se refere à capacidade volumétrica. Várias modificações foram sugeridas para tentar resolver este problema, sendo uma delas sugerida por MUJUMDAR (1984), que propõe o uso de geometria bidimensional para o leito. Neste caso a capacidade volumétrica pode ser facilmente aumentada pelo acréscimo da espessura do leito. Esta geometria também possibilita uma maior flexibilidade na operação, uma vez que uma pequena modificação no tipo de bico injetor da vazão no jorro pode resultar em diferentes regimes de fluxo, facilitando o "Scale-up". (PASSOS, 1991)

Construiu-se um equipamento para secagem de líquidos e pastas do tipo jorro fluidizado bidimensional a fim de adotar as duas modificações citadas. Constitui esse equipamento: o soprador, um aquecedor de gás, a linha de transporte do gás até o leito de jorro bidimensional acrescido de inertes, um atomizador para adição do líquido de secagem e a linha de transporte do líquido até o atomizador.

O trabalho de caracterização do equipamento e o estudo da fluidodinâmica do leito são descritos a seguir:

No capítulo 2 da tese expõe-se uma revisão bibliográfica sobre secadores de leito de jorro-fluidizados, ressaltando as diferenças entre o leito fluidizado, o leito de jorro e o leito de jorro fluidizado. Destacam-se também quais as suas vantagens e usos.

No capítulo 3 descreve-se detalhadamente o equipamento construído que se encontra no prédio da planta piloto do Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP e o modo de operação do equipamento para a execução dos experimentos.

Os resultados obtidos e a discussão dos mesmos são apresentados no capítulo 4. Parte deste capítulo trata do estudo do escoamento dos inertes e do escoamento dos gases no interior do leito, utilizando duas alturas de inertes diferentes (17 e 22 cm). Também é apresentada a análise da queda de pressão no leito em função das vazões no jorro e no ânulo, bem como em função da adição de líquidos. Avaliou-se a capacidade evaporativa do leito em função da vazão no jorro e no ânulo. Um planejamento fatorial foi realizado para a obtenção de curvas de superfície de respostas desta propriedade. Os resultados são mostrados através de figuras, gráficos e tabelas.

As conclusões e sugestões encontram-se no capítulo 5. Compõe o apêndice os itens: Calibração das Placas de Orifício, Caracterização dos Inertes e Calibração da Vazão do Aspensor.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

MATHUR & GISHLER (1955) desenvolveram inicialmente a técnica do leito de jorro para a secagem de grãos. Este também foi aplicado com sucesso para processos químicos envolvendo partículas como: recobrimento de sólidos (ROCHA, *et alii*, 1995), pirólise e queima de carvão (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

A secagem de líquidos em leito de jorro foi desenvolvida pelos russos na década de 60 (MINCHEV *et alii*, 1968), (MINCHEV *et alii*, 1969), (MINCHEV *et alii*, 1969 b), (REGER *et alii*, 1967). Sendo uma alternativa de mais baixo custo comparada com o secador "spray", o secador de leito de jorro com sólidos inertes, é considerado como solução ideal para a produção de produtos em pó secos, de alta qualidade. Esta técnica foi usada por ROMANKOV & RASHKASKAYA (1971), MATHUR & EPSTEIN (1974), ORMOS & BLICKLE (1980), e mais recentemente por PHAM (1983), BARRET & FANE (1988), RÉ & FREIRE (1988) e POVRENOVIC *et alii* (1990).

No caso do uso do secador de leito de jorro com inertes, as baixas taxas de circulação de partículas e o longo tempo de residência requerido afetam adversamente a eficiência da secagem e as propriedades do material, particularmente para produtos muito sensíveis ao calor. Em muitos casos o acúmulo excessivo desse material causa bloqueio do leito.

Várias modificações no leito clássico de jorro foram propostas para melhorar a sua operacionalidade e trazer melhor ajuste entre as características do leito e a necessidade do processo. Entre essas modificações citamos: o uso de rosca para elevar o material de secagem no interior do leito (KUDRA *et alii* 1989), o uso de "draft tube" (GRBAVIIC *et alii*, 1992) e a fluidização do ânulo do leito (CHATTERJEE, 1970).

A fluidização e o jorro são técnicas amplamente aceitas para promover o contato entre um fluido e um material granular. Isto porque suas características fornecem sistemas onde temos uniformidade de condições ao longo do leito, como temperatura e concentração, além de possuírem altos coeficientes de transferência de calor e massa. Estes dois sistemas apresentam porém limitações, no que se refere a suas aplicações.

2.1 Limitações dos Leitos Fluidizado e de Jorro Convencional na Aplicação em Secagem

Para uma boa operação de fluidização é desejável o uso de partículas relativamente finas e uniformes. MATHUR & GISHLER (1955) desenvolveram para partículas grandes a técnica do jorro. Nesta técnica temos uma fase na parte central em um estado muito diluído, se deslocando para cima e ao redor desta parte central, temos o ânulo que atua aproximadamente com um leito empacotado movendo-se para baixo.

No caso do leito de jorro, a mistura local não é tão alta como em um leito fluidizado, porque a maioria das partículas move-se como um leito empacotado no ânulo e apenas 15 % das partículas estão no jorro a cada momento. (THORELY *et alii*, 1959). Porém, a vantagem distinta que o leito de jorro promove é que a taxa de circulação dos sólidos é alta, crescendo com o aumento da vazão (CHATTERJEE, 1970). Em um jorro cerca de 60 a 70 % do fluido se move através do ânulo (THORELY *et alii*, 1959) e como o fluido não está na forma de bolhas, o contato entre o fluido e o sólido é melhor.

A vazão requerida para atingir o jorro é sempre alta e por isso o tempo de contato é baixo exigindo altas taxas de reciclo. Apesar desta técnica apresentar um fluxo radial restrito de fluido ela possui amplas aplicações que já foram citadas anteriormente.

O jorro aparece não apenas como uma forma especial de fluidização, podendo ser aplicado em materiais tão grossos, que não produzem boa fluidização. O tipo de movimentação de partículas em um leito de jorro impede o "back-mixing" e devido ao movimento muito rápido das partículas existe a tendência de eliminar o gradiente de temperatura no leito, que usualmente ocorre em leitos empacotados.

A técnica do jorro fluidizado vem para superar as limitações do leito fluidizado e o leito de jorro. A superposição dos dois sistemas garante uma grande mistura dos sólidos melhorando as características de transferência de calor e de massa.

O leito de jorro fluidizado não favorece a estratificação promovendo a mistura de partículas com diferentes tamanhos e densidades. Isto é de particular importância para sistemas como a calcinação, gaseificação e secagem de líquidos ou pastas, onde as partículas são deformadas e mudam as suas propriedades físicas e químicas.

Leitos de jorro fluidizados proporcionam propriedades intermediárias entre o jorro e a fluidização. Permitem também o desenvolvimento de leitos com diferentes características ou regimes. Estes regimes encontram-se descritos em maiores detalhes no item 2.4.1.

2.2 Leitos Fluidizados Convencionais

A fluidização ocorre quando um fluxo de fluido ascendente através de um leito de partículas adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, sem arrastá-las junto com o fluido. O leito assume então o aspecto de um líquido em ebulição e devido a isso surgiu o termo fluidizado. O fluido responsável pela fluidização pode ser um gás ou um líquido. A escolha irá conferir diferentes propriedades ao sistema fluidizado.

Utilizando-se baixas vazões, que é o caso mais simples, o fluido passa pelo material simplesmente percolando pelos vazios entre as partículas estacionárias tem-se o chamado leito fixo. Com o aumento contínuo na vazão atinge-se um ponto na qual a força de fricção entre as partículas e o fluido equilibra o peso efetivo do leito, com os sólidos ficando suspensos no gás ou líquido ascendente. As partículas, que no leito fixo descansavam umas sobre as outras, descolam-se e a queda de pressão é aproximadamente igual ao peso do fluido e das partículas no leito. Neste momento não existe movimento relativo das partículas em relação às paredes da coluna que as contém, tem-se o chamado leito fluidizado (COUDERC, 1985). A mínima velocidade requerida para suportar o leito é conhecida como velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e o leito que encontra-se com esta velocidade, pode ser descrito como sendo um leito com fluidização incipiente (DAVIDSON *et alii* , 1977).

Num sistema gás-sólido, o aumento da velocidade do fluido acima da de mínima fluidização provoca muita instabilidade no leito, com formação de bolhas e canais para a passagem da gás excedente. O leito não se expande muito acima de seu volume nas condições de mínima fluidização, mas a agitação e o movimento dos sólidos é mais vigorosa.

Com o aumento ainda maior na velocidade pode-se atingir a velocidade de arraste das partículas, com a superfície do leito desaparecendo e os sólidos sendo elutriados. Realiza-se, assim, o transporte pneumático ou hidráulico dos sólidos, dependendo se o fluido é um gás ou um líquido, respectivamente.

Na prática utilizam-se para uma operação em leito fluidizado velocidades no fluido variando entre a mínima de fluidização e a velocidade terminal do leito. Entre estes dois valores de velocidade pode-se observar uma variedade de tipos de

fluidização. Estes tipos de fluidizações encontram-se explicados no item 2.2.2 deste capítulo.

Comparado com outros métodos de contato fluido-sólido, o leito fluidizado apresenta altas taxas de transferência de calor e massa, característica que é útil nos processos de secagem. Uma revisão bastante útil sobre o uso de fluidização e suas aplicações no processamento de alimentos pode ser encontrada em SHILTON & NIRANJAN (1993), onde são descritas a ciência da fluidização e as aplicações típicas em indústrias de alimentos

Segundo SHILTON & NIRANJAN (1993), a fluidização é um método eficiente de contato fluido-sólido porém suas aplicações ficariam limitadas a partículas relativamente pequenas e uniformes. Quando trabalha-se com partículas maiores, a fluidização raramente é uma boa escolha. Neste caso, a técnica mais recomendada pelos autores, para promover um contato fluido-sólido eficiente é o jorro.

2.2.1 Queda de Pressão em Leito Fluidizado

Na figura 2.1 apresenta-se um gráfico típico da variação da queda de pressão num leito de partículas em função da velocidade do gás.

Na parte inicial da curva o gás escoava em baixa velocidade com o leito, mantendo-se fixo. Nesta situação a queda de pressão é aproximadamente proporcional à velocidade do gás. Normalmente a queda de pressão do leito atinge um valor máximo um pouco maior que a pressão estática do leito. Se a velocidade do gás é aumentada um pouco mais, as partículas se separam, a porosidade aumenta para a mínima fluidização e a pressão decresce, igualando-se à pressão estática do leito e inicia-se a fluidização. Novo aumento na velocidade do gás provoca expansão do leito, com a formação de bolhas ou canais. A perda de carga mantém-se constante já que a fase densa do leito é bem aerada e pode deformar-se facilmente, oferecendo pouca resistência à passagem do gás adicional.

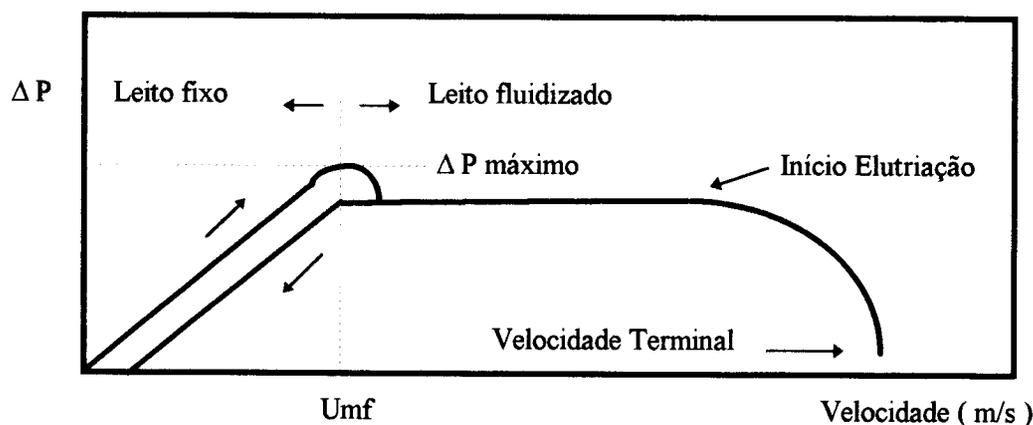


Figura 2.1 - Curva característica para o Leito Fluidizado. Queda de Pressão no Leito vs. Velocidade do gás

2.2.2 Tipos de Fluidização

A fluidização pode ser generalizada em dois tipos, que dependem grandemente da natureza do meio de fluidização:

2.2.2.1 Fluidização Particulada

Ocorre principalmente em sistemas que envolvem sólido-líquido, por exemplo quando ervilhas são fluidizadas em salmoura durante o branqueamento. O leito estabelecido é homogêneo, com uma distribuição espacial uniforme das partículas sólidas. Com o crescimento da velocidade do líquido a distância interparticular continua crescendo desde a situação do leito fixo até que ocorra o transporte hidráulico, (COUDERC, 1985).

2.2.2.2 Fluidização Agregada

Aparece em sistemas que envolvem gás-sólido. Quando a velocidade do gás cresce, uma fração do gás passa através do leito na forma de bolhas. Como resultado, a distribuição de partículas no interior do leito não é grandemente homogênea e existe uma porosidade importante no volume. (DAVIDSON *et alii* , 1977), (COUDERC, 1985).

A velocidade na qual se forma a primeira bolha é conhecida como velocidade mínima de borbulhamento (U_{mb}). O conhecimento da velocidade mínima de fluidização e de mínimo borbulhamento pode ajudar a categorizar os diferentes tipos de partículas presentes em sistemas gás-sólidos, que representam as características de fluidização (figura 2.2).

A classificação apresentada a seguir foi elaborada por GELDART (1973).

Grupo A

Neste caso o leito expande-se consideravelmente quando a velocidade está acima da velocidade mínima de fluidização e antes de se iniciar a formação de bolhas. O leito colapsará rapidamente antes de se expandir novamente com o acréscimo da vazão do gás. Entre a velocidade mínima de fluidização e a velocidade mínima de borbulhamento, o leito apresenta-se com fluidização particulada, a velocidade mínima de borbulhamento marca o limite entre a fluidização particulada e a fluidização agregada. (RICHARDSON, 1971). Encontram-se neste grupo sólidos com pequenos tamanhos médios e / ou com baixas densidades de partículas (menos que $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg / m}^3$).

Grupo B

Neste grupo as bolhas iniciam-se imediatamente após atingir a velocidade mínima de fluidização. A expansão do leito é muito pequena. A densidade da partícula fica na faixa de $1,4 \cdot 10^3$ até $4,0 \cdot 10^3 \text{ kg / m}^3$ e o tamanho médio dos sólidos na faixa de 40 até 500 μm . A areia é um exemplo típico do grupo B.

Grupo C

Partículas com forças coesivas encaixam-se neste grupo. A obtenção de fluidização com estas partículas é bastante difícil. Em leitos com diâmetros pequenos o leito pode levantar-se como um pistão. A formação do pistão ocorre porque as forças interparticulares são maiores que a força que o fluido exerce sobre a partícula. São exemplos deste grupo, partículas que são muito pequenas ou que se encontram muito úmidas ou pegajosas. Para que ocorra fluidização neste sistema pode-se utilizar agitadores mecânicos ou induzir vibrações no interior do leito.

Grupo D

Este grupo contém um grande número de partículas densas, como grãos e sementes. As bolhas sobem mais vagarosamente que o gás intersticial no leito. A vazão de ar ao redor da partícula é turbulenta. Isto pode causar atrito entre as partículas e produzir finos, que rapidamente são arrastados para fora do leito. Este grupo pode ser utilizado em leitos de jorro, secadores amplamente utilizados na secagem de produtos agrícolas (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

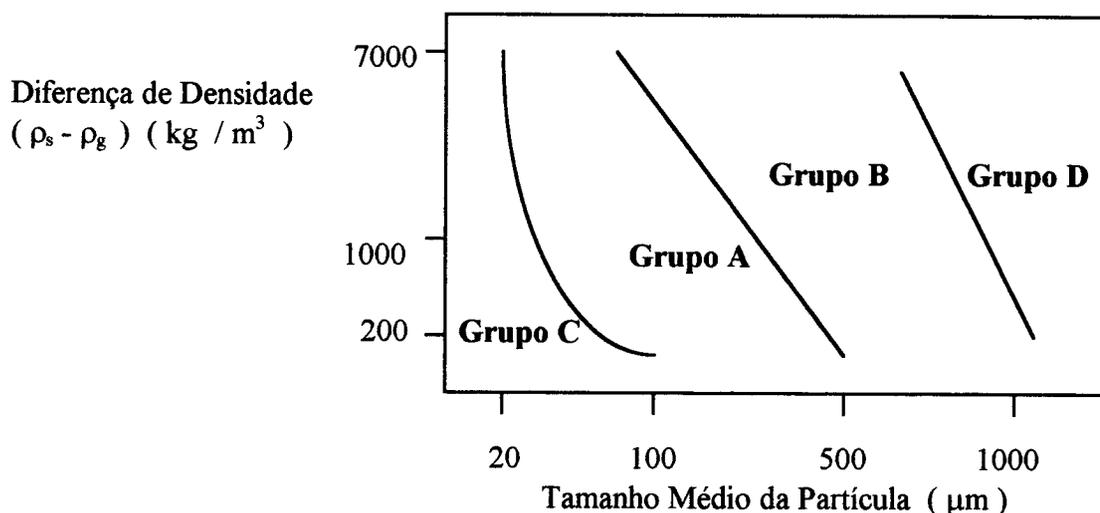


Figura 2.2 - Classificação de GELDART (1973), para leito fluidizado em um sistema gás-sólido.

Um outro método utilizado para caracterizar o tipo de fluidização foi sugerido por RICHARDSON, 1971, o autor utiliza o número de Froude (Fr_{mf})

$$Fr_{mf} = \frac{(U_{mf})^2}{d_p \times g} \quad (1)$$

Onde: Fr_{mf} = número de Froude

U_{mf} = velocidade mínima de fluidização (m / s)

d_p = diâmetro da partícula (m)

g = aceleração da gravidade (m / s²)

WILHELM & KWAUK (1948), citado por KUNII & LEVENSPIEL (1969), encontraram nos seus experimentos que a fluidização agregada ocorre para valores de Fr_{mf} maiores que 1,3 e a fluidização particulada ocorre para valores de Fr_{mf} menores que 0,13. Com valores intermediários obtém-se regimes intermediários. Este sistema de classificação é uma simplificação bastante grande e é aplicado apenas em sistemas ideais. A classificação de GELDART é mais abrangente e por isso mais recomendada.

2.2.3 Velocidade Mínima de Fluidização

A velocidade mínima de fluidização é um importante parâmetro a ser avaliado. A velocidade média em um leito durante o curso de qualquer operação no leito deverá ser mantida sempre acima da velocidade mínima de fluidização. COUDERC (1985), resumiu várias correlações que poderão ser utilizadas para estimar a velocidade mínima de fluidização. Outra revisão bibliográfica bastante extensa sobre velocidade mínima de fluidização, com várias correlações para prever a velocidade do tipo $K1 Re_{mf}^2 + K2 Re_{mf} = Ar$ pode ser encontrada em THONGLIMP *et alii* (1984). TANNOUS (1993), também relacionou diversas correlações do tipo $Re_{mf} = [A^2 + B A_r]^{-1/2} - C$, descrevendo quais as condições utilizadas nas obtenções das equações relacionadas.

Algumas das correlações de velocidade mínima de fluidização baseiam-se no fato de que nas condições de fluidização incipiente, a queda de pressão no leito pode ser representada pelo peso das partículas sólidas suportadas pelo fluido. As correlações resultantes são as vezes de difícil uso, uma vez que elas contém invariavelmente termos que são funções da porosidade do leito na fluidização incipiente, e estes são por muitas vezes desconhecidos .

Quando utilizamos partículas esféricas COUDERC (1985) recomenda a seguinte correlação empírica desenvolvida por RIBA *et alii* (1978):

$$Re_{mf} = 1,54 \cdot 10^{-2} Ar^{0,66} M_v^{0,7} \quad (2)$$

onde: Re_{mf} Número de Reynolds no ponto de fluidização incipiente
 Ar Número de Arquimedes ($d_p^3 \rho_g (\rho - \rho_g) g / \mu^2$)
 M_v Razão de densidade ($(\rho_s - \rho_l) / \rho_l$)

Esta equação pode ser facilmente usada para estimar a velocidade mínima de fluidização de partículas de alimentos de forma esférica, como grãos de mostarda, ervilhas etc.

No caso de alimentos não esféricos pode ser usada uma equação baseada no balanço de forças na fluidização incipiente. Para o cálculo da queda de pressão na fluidização incipiente MCKAY & MCLAIN (1980), recomendaram o uso da equação de ERGUN (1952), na qual introduziu-se uma modificação de acordo com a forma da partícula. Um método simples para estimar a velocidade mínima de fluidização é dado a seguir.

A equação de ERGUN (1952), na forma generalizada é a seguinte (KUNNI & LEVENSPIEL , 1962):

$$(1 - \varepsilon_{mF}) (\rho_s - \rho_g) g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mF})^2}{\varepsilon_{mF}^3} \frac{\mu_f U_{mF}}{(\Phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mF})}{\varepsilon_{mF}^3} \frac{\rho_g U_{mF}^2}{\Phi d_p} \quad (3)$$

onde: L = Comprimento do leito fixo (m)

ε_{mF} = Porosidade do leito fixo

U_{mF} = Velocidade superficial do fluido (m / s)

μ_f = Viscosidade do fluido (kg / ms)

ϕ = Esfericidade da partícula

$(d_p)_{eq}$ = Diâmetro médio equivalente da partícula (m)

Nesta equação $(d_p)_{eq}$ é o diâmetro de uma esfera de mesmo volume que a partícula sólida a ser considerada, e a esfericidade é a medida de desvio da forma esférica. A esfericidade é definida como a razão entre a área superficial da esfera que contém o volume da partícula considerada e a área superficial real da partícula. É claro que para partículas esféricas $\phi = 1$ e para outros formatos $\phi < 1$.

contém o volume da partícula considerada e a área superficial real da partícula. É claro que para partículas esféricas $\phi = 1$ e para outros formatos $\phi < 1$.

Porém ainda é necessário conhecer a porosidade do leito na mínima fluidização. Para uma estimativa deste valor, uma correlação aproximada pode ser estabelecida entre a esfericidade da partícula e a porosidade mínima de fluidização (KUNNI & LEVENSPIEL, 1962). LIMAS BALLESTEROS *et alii* (1982) sugeriram que :

$$\varepsilon_{mF} = 0,42 \phi^{-0,376} \quad (4)$$

Na prática, os leitos quase sempre são do tipo empacotado e dados obtidos por KUNNI & LEVENSPIEL (1962) indicam que o expoente da equação acima deveria ser mudado para -0,597 se $0,4 < \phi < 1$. Estas equações devem ser consideradas como uma aproximação e sua validade para o sistema em estudo não pode ser garantida até o momento da coleta dos dados.

O uso da equação (4) de ser criterioso MCKAY & MCLAIN (1980), tentaram comprovar a validade da equação de mínima porosidade para batatas fritas com $\phi = 0,60$. Usando a equação de LIMAS BALLESTEROS *et alii* (1982), para a porosidade mínima de fluidização com o expoente modificado, os autores encontraram um valor de porosidade na mínima fluidização de 0,57, abaixo do valor medido experimentalmente de 0,63.

2.3 Leitos de Jorro Convencionais

O leito de jorro é formado pela penetração de um jato de fluido através de um leito de partículas sólidas. No leito de jorro convencional estas partículas estão contidas em uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica, em cuja extremidade inferior fica localizado o orifício de entrada do fluido no leito. Este fluido é usualmente um gás, sendo que na prática utiliza-se com mais freqüência o ar.

O início da circulação dos sólidos, que caracteriza o leito de jorro, acontece quando a vazão de ar torna-se suficiente para arrastar pneumaticamente as partículas para cima do nível do leito. Estas partículas passarão por uma região central, de alta porosidade, denominada jorro, e ao atingir o ponto em que sua velocidade se iguala a zero, passarão a ter movimento descendente através de uma região de menor porosidade. Esta região está localizada entre as paredes da coluna e o jorro e é denominada região anular ou ânulo. As partículas podem retornar ao jorro ao longo de toda interface entre o jorro e a região anular, mas no entanto, a maior parte dos sólidos desloca-se para baixo e só na região da base invertem seu sentido de

movimento retornando ao deslocamento ascendente. Estabelece-se então um movimento cíclico dos sólidos.

Algumas limitações na utilização da técnica do leito de jorro foram relacionadas por MUJUMDAR (1982): a perda de carga é elevada antes de se atingir o jorro estável, o fluxo de ar é governado mais pelas necessidades do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa, a capacidade é limitada (devido aos limites no diâmetro do cilindro e na altura máxima do leito), dificuldades no "scale-up" (leitos fluidizados tem a sua escala ampliada de laboratório para até 30 m. A ordem de magnitude de um jorro parece estar na ordem de 3 m , LIM & GRACE, 1987) e finalmente a grande faixa de tempos de residência das partículas.

Visando superar parte destas limitações desenvolveram-se modificações no leito de jorro convencional. MUJUMDAR (1982), sugeriu o uso de geometria bidimensional. Esta modificação foi mais uma vez indicada por MUJUMDAR (1984).

2.3.1 Mecanismos de Instabilidade do Jorro

Os mecanismos que indicam a instabilidade do jorro convencional em leito bidimensional são a fluidização do ânulo e o estrangulamento do jorro. PASSOS *et alii* (1993) desenvolveram um importante trabalho sobre a estabilidade de leitos bidimensionais de jorro convencional. Foram relacionados os adimensionais de relevância e as correlações importantes para esse tipo de leito utilizando-se partículas pequenas e grandes.

O parâmetro adimensional A_{2D} definido pelos autores pode ser usado para identificar os mecanismos terminais do jorro. Para $A_{2D} < 0,044$ o estrangulamento do jorro é o principal mecanismo. Para $A_{2D} > 0,094$, a fluidização do ânulo é o mecanismo que governa a estabilidade do jorro. Para $0,044 < A_{2D} < 0,094$, ocorre a transição entre os dois mecanismos, que se caracteriza por uma oscilação no regime com uma movimentação periódica do jorro, em torno do eixo central do leito.

$$A_{2D} = Re_{mf}^* Re_T d_p / A_r L_N \quad (7)$$

onde : $Re_{mf}^* = Re_{mf} / \phi$

$$Re_{mf} = \rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$$

$$Re_T = \rho_f d_p g(\phi) U_T / \mu_f$$

$$g(\phi) = \phi (5\phi^3 - 7,57\phi^2 + 4,09\phi - 0,516)$$

$$Ar = \rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$$

ρ_f = Densidade do fluido (kg / m³)

μ_f = Viscosidade do fluido (kg / m s)

ρ_p = Densidade da partícula (kg / m³)

d_p = Diâmetro da partícula (m)

U_{mf} = Velocidade mínima de fluidização (m / s)

U_T = Velocidade terminal da partícula (m / s)

ϕ = Esfericidade da partícula

L_N = Largura da entrada do jorro

g = Aceleração da gravidade (m / s²)

PASSOS *et alii* (1993) sugerem ainda que existe uma analogia entre o jorro cônico e o jorro bidimensional e ela pode ser expressa na forma de um diâmetro da entrada do jorro máximo equivalente:

$$\pi (d_{i_{MAX}})_{eq}^2 / 4 = (L_2 \cdot L_N)_{MAX} \quad (8)$$

L_2 = Espessura do leito bidimensional (m)

$(d_{i_{MAX}})_{eq}$ = Diâmetro máximo equivalente da entrada do jorro (m)

2.3.2 Altura Máxima do Leito

É importante registrar a existência de uma altura máxima do leito onde é possível obter um jorro estável sem que ocorra uma fluidização heterogênea, um movimento empistonado ou o estrangulamento do jorro. Esta altura é função da geometria do sistema e das propriedades e dimensões das partículas envolvidas.

Definimos como altura máxima do leito a altura na qual o jato não pode penetrar até a superfície do leito e a velocidade no topo do leito é menor que a velocidade mínima de fluidização. (GRBAVCIC *et alii*, 1991)

Quando a altura do leito for igual a altura máxima do leito aonde se pode obter o jorro, a velocidade do fluido no topo do leito será igual a velocidade mínima de fluidização (NAGARKATTI & CHATTERJEE, 1974).

Para um leito de jorro convencional bidimensional, PASSOS *et alii* (1993), relataram decréscimo da altura máxima com o crescimento do diâmetro da partícula.

LITTMAN *et alii* (1979) desenvolveram uma equação bastante útil para o cálculo da altura máxima em leitos de jorro convencionais de coluna cilíndrica. Esta equação é função apenas das propriedades do sistema (diâmetro da coluna e diâmetro da entrada do jorro), e das propriedades do sistema fluido-partícula. A equação é válida para prever a máxima altura em leitos que utilizam partículas grandes e esféricas, onde a fluidização do ânulo limita a penetração do jato do fluido com $A > 0,02$.

$$\frac{H_{MS} d_i}{D_c^2} = 0,218 + \left(\frac{0,00500}{A} \right) \quad (9)$$

onde
$$A = \left[\frac{\rho_f}{(\rho_p - \rho_f)} \right] \left[\frac{U_{mF} \cdot U_T}{g d_i} \right] = \left[\frac{Re_{mF} \cdot Re_T}{Ar} \right] \left(\frac{d_p}{d_i} \right)$$

H_{MS} Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro convencional (m)

d_i Diâmetro da entrada do jorro (m)

D_c Diâmetro da coluna (m)

ρ_f Densidade do fluido (kg / m³)

ρ_p Densidade da partícula (kg / m³)

Re_{mF} $\rho_f d_p \phi U_{mF} / \mu_f$

Re_T $\rho_f d_p g(\phi) U_T / \mu_f$

Ar $\rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$

$g(\phi)$ $\phi (5 \phi^3 - 7,57 \phi^2 + 4,09 \phi - 0,516)$

ϕ Esfericidade da partícula

U_T Velocidade terminal da partícula (m / s)

U_{mF} Velocidade mínima de fluidização (m / s)

μ_f Viscosidade do fluido (kg / ms)

MORGAN & LITTMAN (1982), McNAB & BRIDGWATER, (1977), LITTMAN & MORGAN (1988) e SOUZA (1993), desenvolveram outras

correlações para leito de coluna cilíndrica com o mesmo tipo de equação que :

$$\frac{H_{MS} d_i}{D_c^2} = KA.$$

PASSOS *et alii* (1993) em seu trabalho ainda estabeleceram uma correlação para a altura máxima de leitos bidimensionais com jorro convencional. Esta correlação leva em consideração o parâmetro A_{2D} definido no item 2.3.1, que trata dos mecanismos de instabilidade do jorro:

$$H_{MS} / L_1 = 0,605 + 6,21 \cdot 10^{-2} / A_{2D} \quad \text{para } A_{2D} \geq 0,044 \quad (10)$$

com:

H_{MS} = Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro convencional (m)

L_1 = Largura do leito bidimensional (m)

$A_{2D} = Re_{mf} * Re_T d_p / Ar L_N$

2.3.3 Queda de Pressão em Leito de Jorro Convencional

Antes de ser atingido o movimento cíclico e permanente das partículas algumas etapas ocorrem no leito. Estas etapas podem ser observadas através da curva característica da queda de pressão em função da vazão de ar, indicada na figura 2.3.

Inicialmente, com pequenas vazões, o gás apenas percola entre as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento do fluxo, surge nas proximidades do orifício de entrada do gás, uma cavidade devido à ação do jato que já é suficiente para deslocar algumas partículas. Esta cavidade vai se alongando dando origem ao jorro interno, sempre com um aumento de perda de pressão até um pico. Um incremento na vazão após este estágio ocasiona uma queda brusca de pressão e neste instante o jorro aflora na superfície. Neste ponto a perda de pressão torna-se constante e um aumento no fluxo do gás acarreta somente elevação da fonte.

No processo inverso, com a redução no fluxo do gás, o jorro mantém-se estável até o ponto correspondente ao jorro mínimo. A perda de carga neste ponto é bem menor que a obtida no pico, isto porque a perda de carga neste ponto é devida somente à interação gás-sólido, não havendo mais a ação de ruptura do jato através do leito. No jorro mínimo temos a menor vazão de gás com que se pode obter o jorro estável. A partir daí a queda de pressão decresce à medida que se processa a redução da vazão de gás.

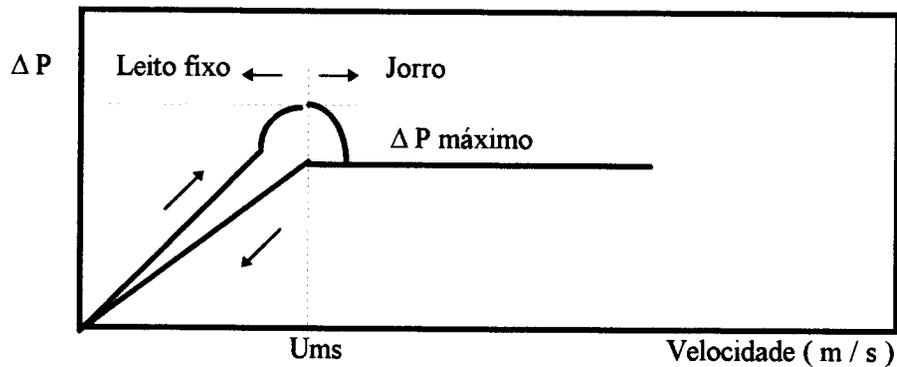


Figura 2.3 - Curva característica para o leito de jorro Convencional . Queda de Pressão no Leito vs. Velocidade do gás

2.3.4 Velocidade Mínima de Jorro

A velocidade mínima de jorro é definida como a velocidade na qual um pequeno decréscimo na vazão ocasiona o colapso do jorro (MATHUR & EPSTEIN , 1974).

Entre as muitas correlações publicadas para o cálculo da velocidade mínima de jorro a mais conhecida é a desenvolvida por MATHUR & GISHLER (1955), que apesar de empírica demonstrou ser válida para muitos dos dados da literatura. THORELEY *et alii*, (1959) estabeleceram uma correlação empírica para uma coluna cilíndrica com 2 pés de diâmetro com cerca de 15 % de erro. MATHUR & EPSTEIN, (1974), organizaram várias equações e discutiram em muitos detalhes a equação de MATHUR & GISHLER (1955) e a equação de BECKER (1961). Posteriormente GRBAVIIC *et alii*, (1976) desenvolveram uma outra correlação para colunas cilíndricas baseada no modelo de MAMURO & HATTORI (1968). LITTMAN & MORGAN (1983), sugerem uma correlação geral para a velocidade mínima de jorro em coluna cilíndrica e mostram que a velocidade mínima de jorro normalizada (U_{ms} / U_{mF}) é função de três parâmetros adimensionais. Esta correlação mostrou um desvio médio de 11,6 %.

Outros autores trabalharam ainda com correlações para velocidade mínima de jorro. FANE & MITCHELL (1984), propuseram um correlação dimensional empírica para $D_c > 0,4$ m. LIM & GRACE (1987), realizaram um estudo em leitos de coluna cilíndrica com 0,91m de diâmetro, onde verificam os resultados obtidos para velocidade mínima de jorro com várias partículas diferentes e comparam os resultados com algumas correlações mais usadas para a determinação de velocidade mínima de jorro. PASSOS *et alii* (1994), em seu trabalho sobre "scale-up" de leito de jorro, citam mais uma correlação bastante útil desenvolvida por LITTMAN & MORGAN (1988).

Encontramos apenas uma correlação desenvolvida para leitos de jorro bidimensionais. PASSOS *et alii* (1991), e PASSOS (1991) desenvolveram uma correlação para a predição da velocidade mínima de jorro em leitos bidimensionais de jorro convencional:

$$Re_{mS} = (c_3^2 + c_4 (1 - Y^*) A_r)^{0,5} - c_3 \quad \text{para } A_{2D} \geq 0,044 \quad (11)$$

onde : $Re_{mS} = \rho_f d_p \phi U_{mS} / \mu_f$

$$c_3 = 18 (1 - \epsilon_{mS}) / [(X_{2D}^*)^{(n-1)} \cos^2 \lambda]$$

$$c_4 = (\epsilon_{mS} \phi)^3 / [2 (X_{2D}^*)^{(n-1)}]$$

$$\lambda = 180^\circ - 2 \arctan [D / \tan (45^\circ - \theta_c / 2)]$$

$$D = 2 [X_{2D}^*_{max} / X_{2D}^*]^{(n-1)}$$

$$X_{2D}^*_{max} = 1 / (H_{MS} / L_1 + 1)$$

$$X_{2D}^* = 1 / (1 - H_{MSF_{mS}} / L_1)$$

$$A_r = \rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$$

$$Y^* = 1 - \frac{\Delta P_{mS}}{\Delta P_{AmF}}$$

$$n = \tan^2 (45^\circ + \theta_c / 2)$$

θ_c = Ângulo de Coulomb da resistência ao cisalhamento para um material particulado sólido.

H_{MS} Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro convencional (m)

$H_{MSF_{mS}}$ Altura máxima do leito capaz de produzir jorro nas condições de mínimo jorro (m)

U_{mS} Velocidade mínima de jorro (m / s)

ΔP_{AmF} Queda de pressão no ânulo, nas condições de mínima fluidização (N / m²)

ΔP_{mS} Queda de pressão, nas condições de mínimo jorro (N / m²)

ϵ_{mS} Porosidade do leito na mínimo jorro

L_1 Largura do leito bidimensional (m)

2.4 Leitos de Jorro Fluidizados

O leito de jorro fluidizado foi descrito pela primeira vez por CHATTERJEE, (1970). Ele é uma modificação do leito de jorro padrão, no qual o fluido é também fornecido à região anular promovendo a sua fluidização e atenuando alguma tendência na formação de zonas estagnadas ao longo da base da coluna. Como resultado obtém-se melhor mistura de sólidos e o contato do fluido com o sólido na região anular é melhor que nos jorros convencionais (CHATTERJEE, 1970), (MADONNA *et alii*, 1980). Estes leitos apresentam também menor tendência das partículas se aglomerarem, (KONO, 1981), (YE, 1988).

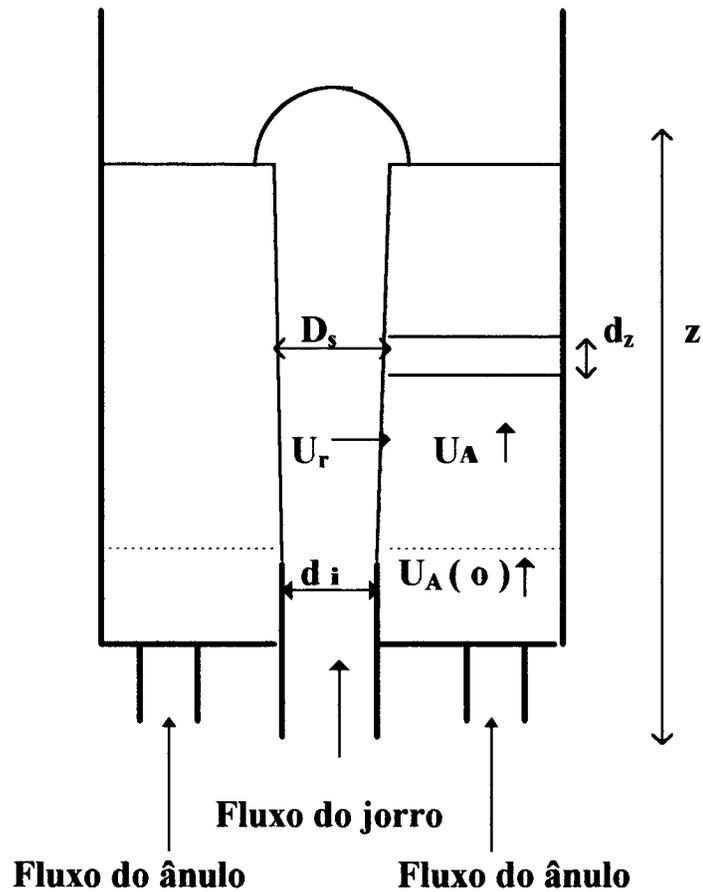
Existem vários trabalhos na bibliografia a respeito da hidrodinâmica de leitos de jorro fluidizado em condição de temperatura ambiente MATHUR & EPSTEIN (1974) e SUTANTO *et alii* (1985). Existe também a importante revisão realizada por EPSTEIN & GRACE (1984). WU *et alii* (1987), relataram a hidrodinâmica de leitos de jorro com temperaturas entre 20 - 420 °C, utilizando no interior da coluna três tipos de areia. LIM & GRACE (1992) estudaram leitos de jorro e leitos de jorro fluidizados com uma faixa de temperatura de 20 até 880 °C.

A relação entre as vazões no jorro e no ânulo nas condições de mínimo jorro, para um leito de jorro fluidizado com a sua altura menor ou igual à máxima altura possível de se obter o jorro foi derivada por HADZISMAJLOVIC *et alii* (1983).

O leito de jorro-fluidizado envolve um substancial fluxo do fluido através de um orifício único central como um leito de jorro convencional e um fluxo de fluido através de um distribuidor na base como um leito fluidizado (figura 2.4).O termo jorro fluidizado se refere a vários sistemas bifásicos (fluido-partícula), no qual a vazão total do sistema é dividida entre a região do jorro e a região anular do leito. Estes sistemas formados são também denominados regimes e encontram-se descritos no item 2.4.1

2.4.1 Regimes Obtidos em Jorro Fluidizado

O jorro e a fluidização são fenômenos visíveis que ocorrem em uma faixa definida de velocidade do gás, para uma dada combinação de características da fase sólida e gasosa e da configuração do leito.



D_s - Diâmetro médio do jorro (m) d_i - Diâmetro da entrada do jorro (m)

z - Distância vertical no leito (m)

U_r - Velocidade superficial radial do fluido do jorro para ânulo (m / s)

U_A - Velocidade superficial do ar no ânulo (m / s)

$U_A(0)$ - Velocidade superficial do ar no ânulo na entrada do distribuidor (m / s)

Figura 2.4 - Diagrama esquemático de um leito de jorro fluidizado

Desde que o termo jorro fluidizado foi introduzido por CHATTERJEE (1970), muitas publicações sobre o tema apareceram. SUTANTO *et alii* (1984), observaram que o termo jorro fluidizado significava diferentes coisas para diferentes autores. Observaram ainda que LITTMAN *et alii* (1976) e VUKOVIC *et alii* (1982), referiam-se a uma condição na qual um jorro convencional era acompanhado de uma aeração adicional, mas não ocasionava a fluidização do ânulo. O regime foi então mais apropriadamente denominado jorro com aeração ou jorro aerado.

Devido ao problema de nomenclatura, quando examinamos um regime de jorro fluidizado é muito importante que o localizemos dentro de um mapa de regime a fim de evitar confusões com respeito ao estado em que o leito se encontra.

Os mapas de regime para leitos de jorro fluidizados foram apresentados por NAGARKATTI & CHATTERJEE (1974), DUMITRESCU (1981), HEIL & TELS (1983), VUKOVIC *et alii* (1984) e SUTANTO *et alii* (1984).

Optou-se pela classificação apresentada por VUKOVIC *et alii*, (1984) por que esta classificação é a mais recente e de fácil entendimento. VUKOVIC *et alii* (1984) identificaram os diferentes tipos de regime para o leito de jorro com aeração suplementar. Eles foram obtidos variando-se as vazões do jorro e do ânulo, com ar e água, desde zero até a velocidade de transporte, utilizando esferas de cálcio com 1,8 mm de diâmetro. Além do jorro convencional e do leito fluidizado, os autores identificaram três regimes:

Jorro Aerado - Neste leito a velocidade no ânulo desde a base até o topo é menor que a velocidade mínima de fluidização .

Jorro Fluidizado - Neste caso o ânulo é parcialmente fluidizado, a altura no leito em que a velocidade no ânulo iguala-se à velocidade mínima de fluidização depende da vazão externa do ânulo.

Jato em Leito Fluidizado - O ânulo é totalmente fluidizado com a velocidade de entrada do ar no ânulo igual ou superior à velocidade mínima de fluidização. O jato do jorro penetra totalmente no leito.

As figuras 2.5 a 2.9 ilustram as diferenças entre o leito de jorro, o leito fluidizado e o leito de jorro fluidizado em diversos regimes (jorro aerado, jorro fluidizado e jato em leito fluidizado).

Os extremos do jorro fluidizado são mostrados nas figura 2.5 e 2.9. O leito de jorro (figura 2.5) é obtido quando toda a vazão passa através do orifício de entrada do jorro e o leito fluidizado, (figura 2.6), quando toda a vazão é uniformemente distribuída através da seção transversal do leito na base.

Quando a vazão de gás na entrada do ânulo ($V_A(0)$) é zero e a vazão de gás no jorro ($V_N(0)$) for pelo menos igual à vazão mínima necessária para produzir o jorro, obtém-se o leito de jorro convencional (figura 2.5). Neste regime a altura do leito (H_S) deve ser menor que a altura máxima admissível nas condições de mínimo jorro (H_{MSmS}), e a velocidade superficial do fluido no ânulo (U_A) deve ser sempre menor que a velocidade mínima de fluidização (U_{mF}).

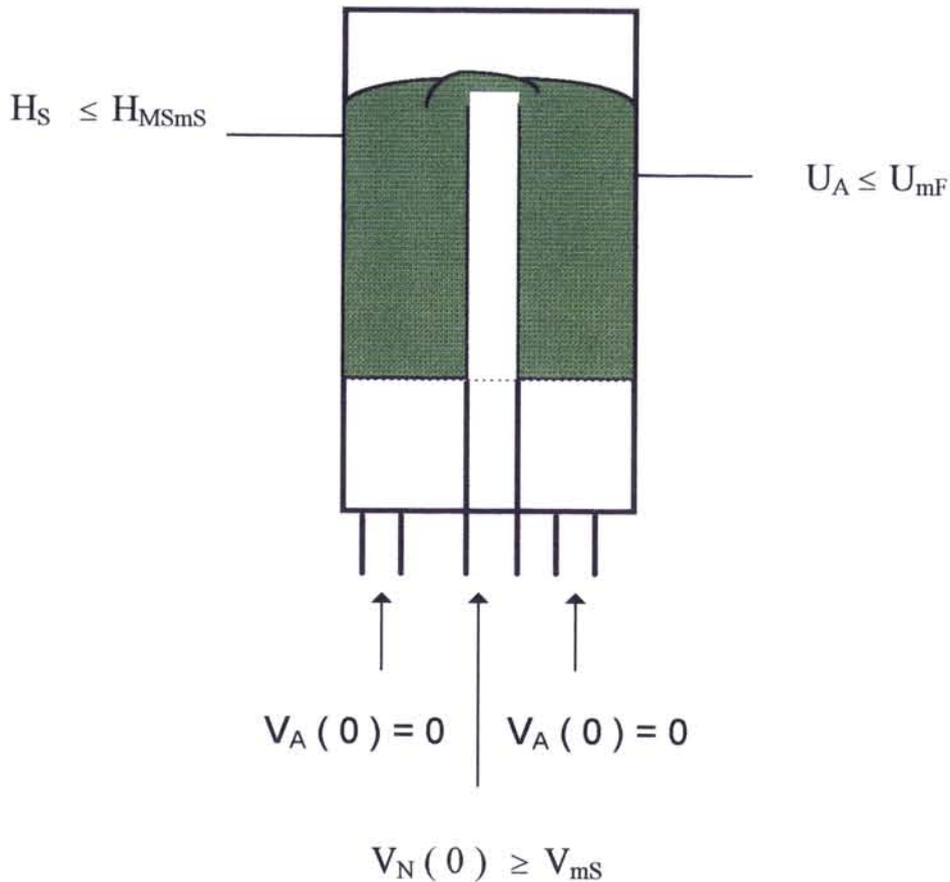


Figura 2.5 - Diagrama esquemático de um leito de jorro onde $H_S < H_{MSmS}$

Quando a vazão de ar for uniformemente distribuída pela base do leito tem-se o leito fluidizado (figura 2.6). Neste caso, a velocidade superficial do ar desde a base do leito (U_A), deve ser maior ou igual à velocidade mínima de fluidização (U_{mF}). Conseqüentemente a soma das vazões no jorro ($V_N(0)$) e das vazões auxiliares ($V_A(0)$), deve ser maior ou igual à vazão mínima de fluidização (V_{mF}). Existe ainda a necessidade da igualdade das velocidades na vazão do jorro ($U_N(0)$) e nas

vazões auxiliares ($U_A (0)$), para que ocorra uma distribuição uniforme do ar e impeça o aparecimento de uma fluidização não homogênea com a existência de canais preferenciais.

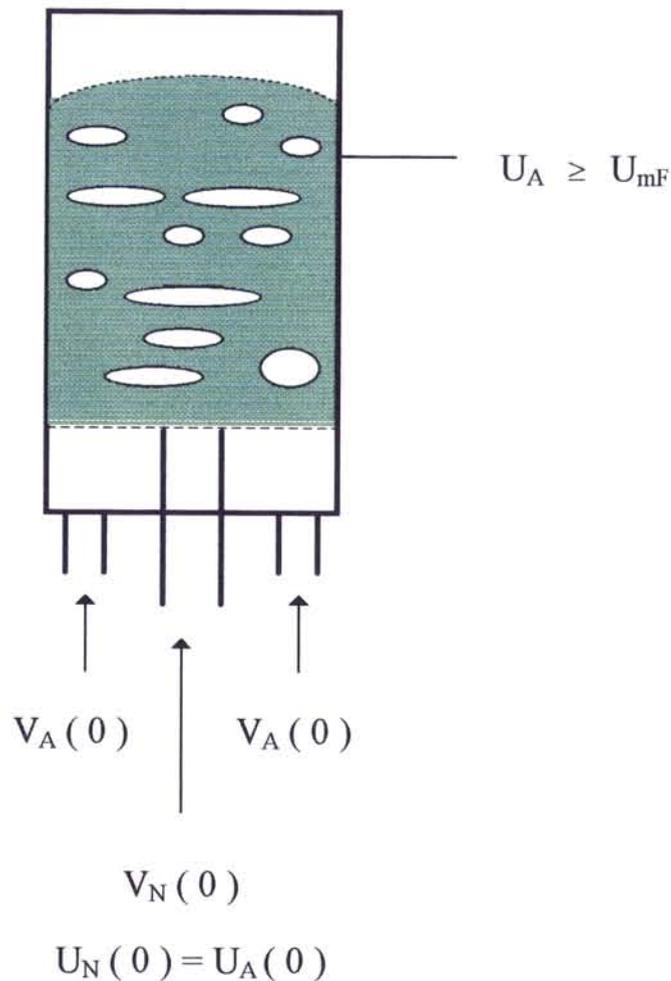


Figura 2.6 - Diagrama esquemático de um leito fluidizado

O regime denominado jorro aerado é bem descrito pela figura 2.7. O limite para a existência deste regime é a fluidização incipiente do topo do leito. Assim sendo, a velocidade no topo do ânulo U_{AH} deve ser no máximo igual à velocidade mínima de fluidização. Quando se inicia a fluidização do topo do leito estamos na transição entre o regime de jorro aerado e o regime de jorro fluidizado. Os limites impostos para a vazão no jorro e no ânulo foram determinados por VUKOVIC *et alii* (1984), a fim de garantir a existência dos diferentes regimes nos leitos.

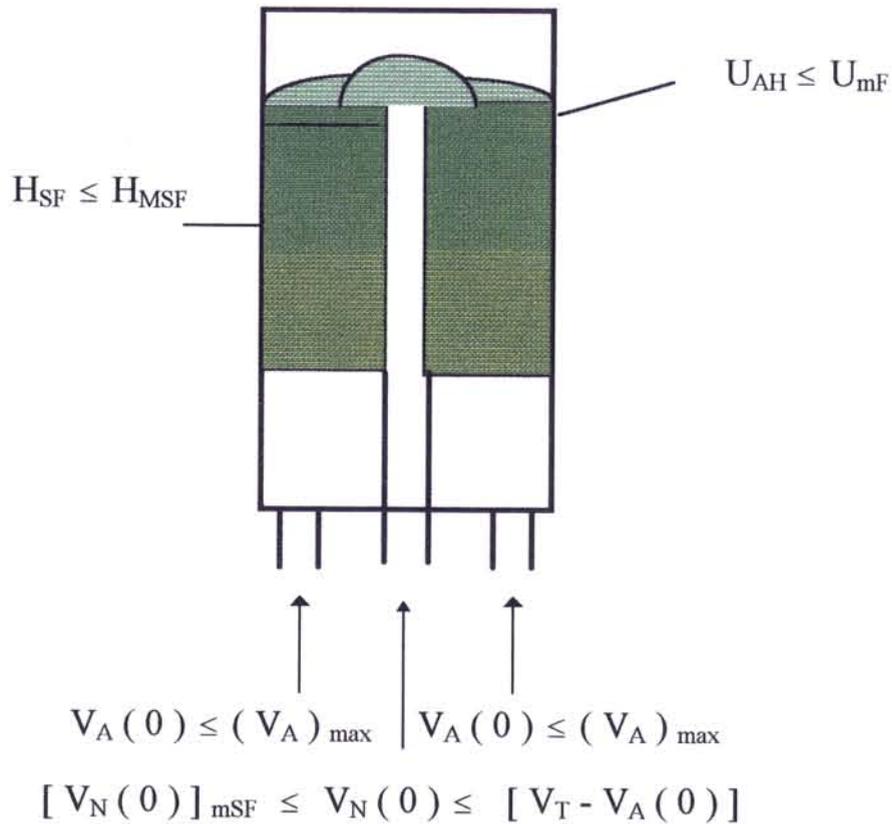


Figura 2.7 - Diagrama esquemático de leito jorro fluidizado com $H \leq H_{mSF}$
Regime 1 (Jorro Aerado)

$V_A(0)$	Vazão do fluido na entrada do ânulo (m^3/s)
$V_A(0)_{MAX}$	Vazão do fluido no ânulo capaz de fluidizar apenas o topo do leito (m^3/s)
$[V_N(0)]_{mSF}$	Vazão do fluido na entrada do jorro nas condições de mínimo jorro fluidizado (m^3/s)
$V_N(0)$	Vazão do fluido na entrada do jorro (m^3/s)
V_T	Vazão do fluido na velocidade terminal da partícula (m^3/s)

Leitos de jorro convencional no qual a altura do leito (H_S) é mais profunda que a máxima altura possível de se obter o jorro, (H_{MS}) apresentam duas regiões: um leito de jorro para alturas abaixo da máxima e um leito fluidizado para alturas acima da máxima.

O leito que encontra-se sob o regime jorro-fluidizado (figura 2.8), tem a aparência de um leito de jorro convencional com $H_S > H_{MS}$. Este regime ocasiona a

formação das duas zonas, um leito fluidizado no topo e um jorro aerado. O jorro aerado da base apresenta uma definição bastante nítida do jorro e do ânulo. O limite deste regime é a fluidização da base do leito, quando todo o ânulo encontra-se fluidizado e inicia-se o regime denominado jato em leito fluidizado.

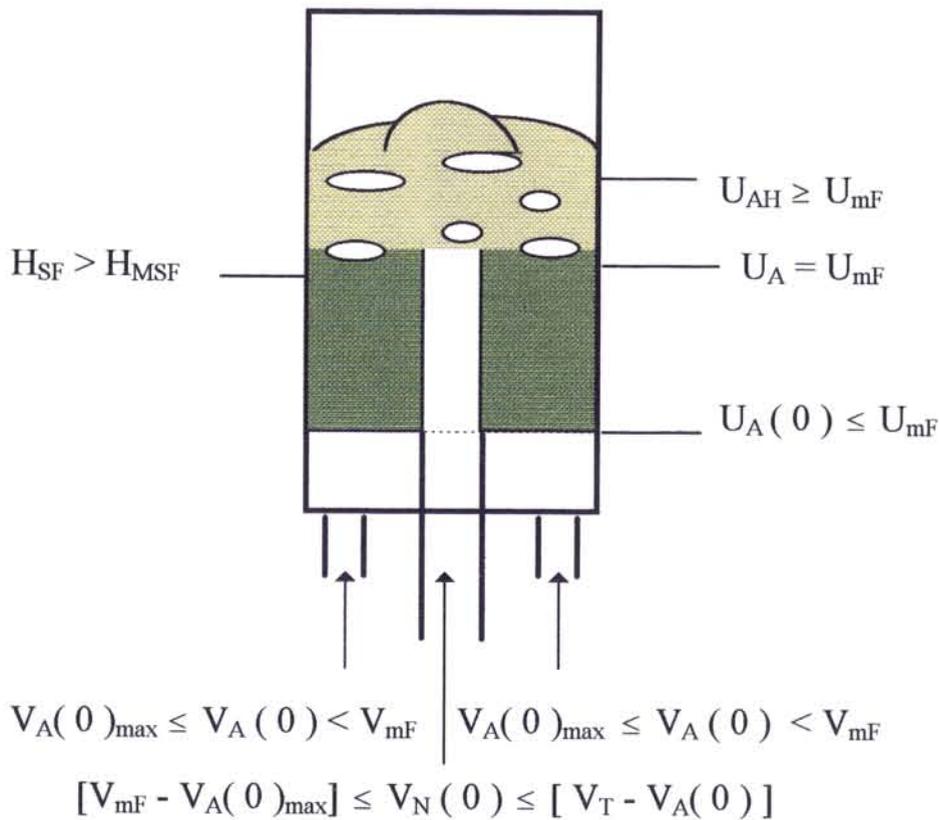


Figura 2.8 - Diagrama esquemático de leito de jorro fluidizado com $H_{SF} > H_{MSF}$
Regime 2 (Jorro-Fluidizado)

H_{MSF}	Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro fluidizado (m)
H_{SF}	Altura do leito em jorro fluidizado (m)
U_A	Velocidade superficial do ar no ânulo (m / s)
U_{AH}	Velocidade superficial do ar no topo do ânulo (m / s)
$U_A(0)$	Velocidade superficial na entrada do ânulo [$V_A(0) / A_A$] (m / s)
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização (m / s)
$V_A(0)$	Vazão do fluido na entrada do ânulo (m^3 / s)
$V_A(0)_{MAX}$	Vazão no ânulo capaz de fluidizar apenas o topo do ânulo (m^3 / s)
V_{mf}	Vazão mínima de fluidização (m^3 / s)

$V_N(0)$ Vazão do fluido na entrada do jorro (m^3/s)

V_T Vazão do fluido da velocidade terminal da partícula (m^3/s)

O último regime a ser descrito é o jato em leito fluidizado (figura 2.9). Neste regime todo o ânulo, desde a base até o topo, encontra-se fluidizado. Para que isto ocorra a velocidade do fluido no ânulo (U_A), deve ser maior que a velocidade mínima de fluidização (U_{mF}), ao longo de todo o leito. A vazão no jorro deve ser suficientemente grande para que o jato penetre totalmente no leito. O limite deste regime é a vazão no ânulo na qual começa a ocorrer a instabilidade do jorro, para uma vazão fixa do jorro ou arraste pneumático dos sólidos.

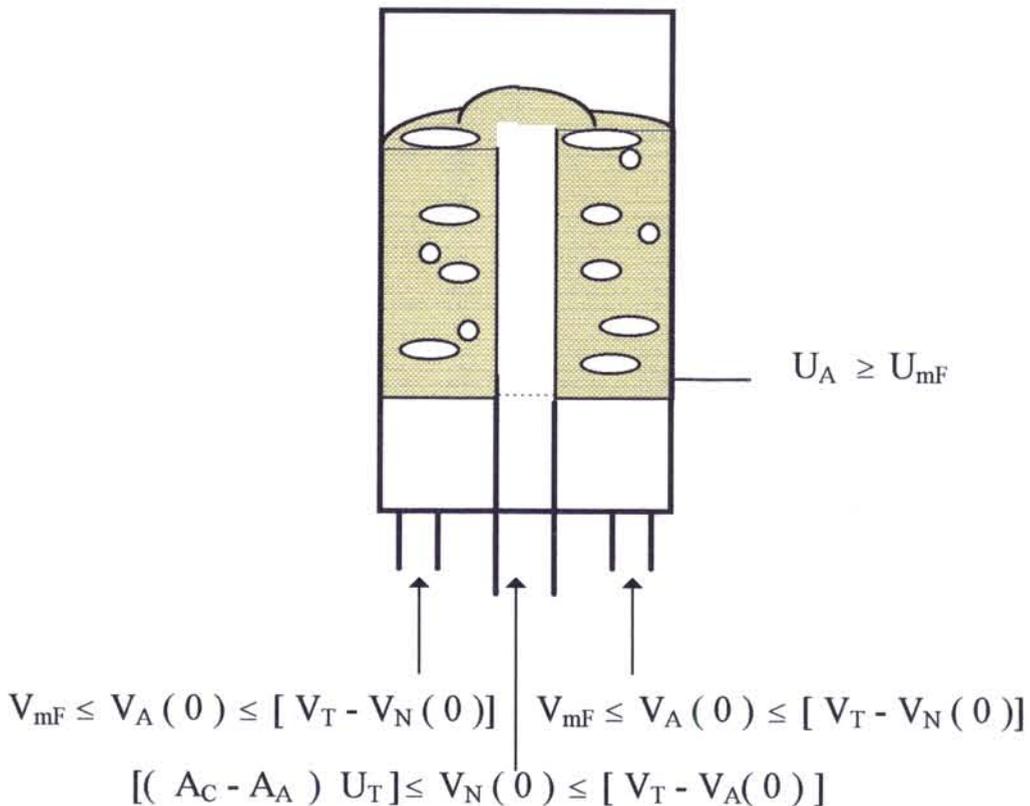


Figura 2.9 - Diagrama esquemático de um leito de jorro fluidizado
Regime 3 (Jato em leito fluidizado)

U_A Velocidade superficial do ar no ânulo (m/s)

U_{mF} Velocidade mínima de fluidização (m/s)

U_T Velocidade terminal da partícula (m/s)

- $V_A(0)$ Vazão do fluido na entrada do ânulo (m^3/s)
 V_{mF} Vazão mínima de fluidização (m^3/s)
 $V_N(0)$ Vazão do fluido na entrada do jorro (m^3/s)
 V_T Vazão do fluido da velocidade terminal da partícula (m^3/s)
 A_A Área da seção transversal do ânulo (m^2)
 A_C Área da seção transversal do leito (m^2)

Os regimes de escoamento e as transições citadas nas figuras 2.5 a 2.9 podem ser representadas quantitativamente em gráfico como mostra a figura 2.10.

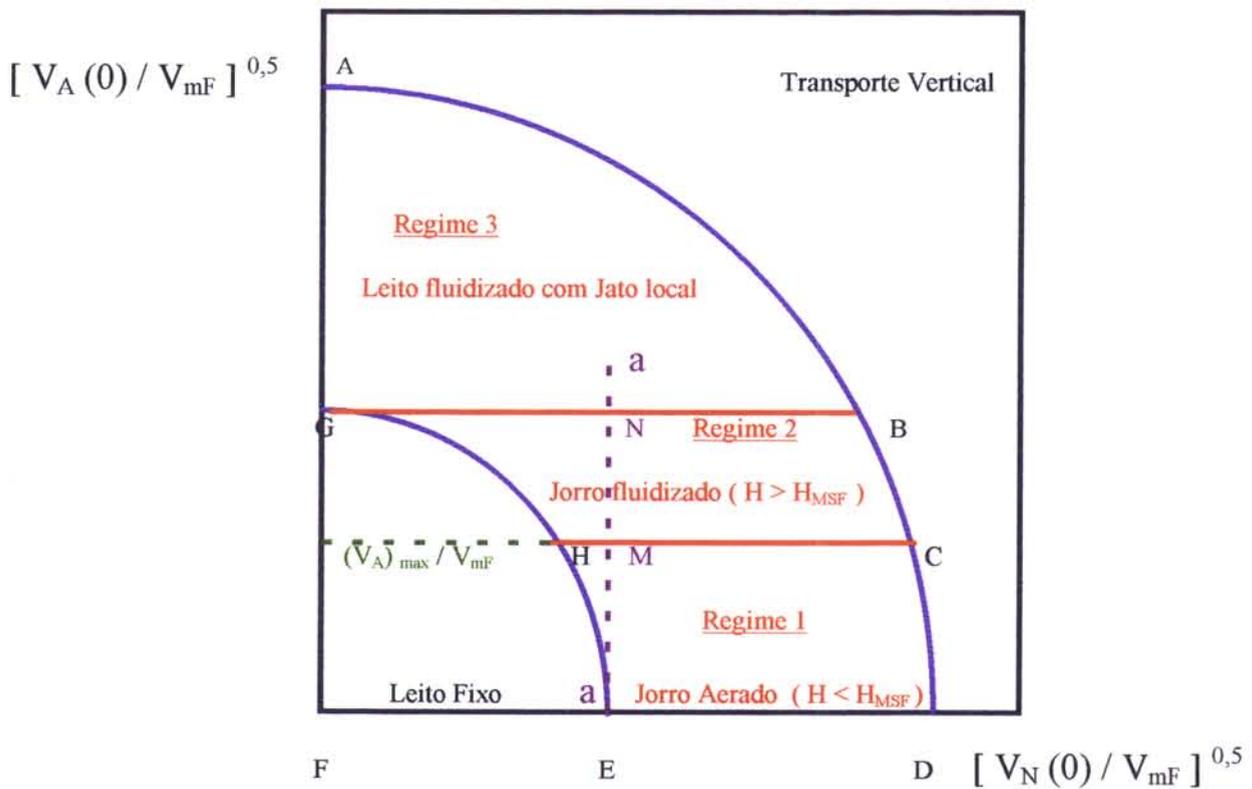


Figura 2.10 - Diagrama esquemático dos mapas dos regimes de fluxo em leito de jorro fluidizado (VUKOVIC *et alii* , 1984)

O jorro puro é obtido ao longo da linha ED e na abcissa GA tem-se o leito fluidizado puro. A curva GHE limita o leito fixo e a curva ABCD limita o transporte vertical. O contorno ABCDEHGA representa o limite aonde o jorro fluidizado existe.

A linha a-a é bastante ilustrativa dos processos de mudança de regime em leito fluidizado. A partir de uma velocidade no jorro constante $V_N(0)$ e com o aumento da velocidade no ânulo $V_A(0)$ obtém-se no princípio uma vazão no ânulo baixa e o leito atua como um jorro aerado (Regime 1). Com o aumento progressivo da vazão no ânulo atinge-se um valor que será suficiente para fluidizar apenas o topo do leito (ponto M). Este é o limite entre o jorro aerado (regime 1) e o jorro-fluidizado (regime 2). O aumento da vazão no ânulo aumenta a fluidização que se inicia em alturas cada vez menores no leito. Finalmente quando a vazão no ânulo $V_A(0)$ for igual à V_{mF} alcança-se o limite entre o jorro-fluidizado (regime 2) e o jato em leito fluidizado (regime 3) (ponto N). O leito apresenta a base do leito fluidizada incipientemente e as bolhas se originam se o fluido for um gás. É importante notar que a altura máxima do leito de jorro fluidizado H_{MSF} decresceu com o aumento da vazão no ânulo para uma vazão no jorro constante.

Uma outra linha bastante ilustrativa é a linha G-B. Nesta linha parte-se do ponto G, com vazão constante e igual à vazão mínima de fluidização. O acréscimo da vazão no jorro cria um canal preferencial, que aumenta até que com a vazão de mínimo jorro com aeração finalmente forma-se o jorro. A partir deste instante o aumento da vazão no jorro não causa mudanças no tipo de regime, existe apenas um aumento na circulação de partículas.

2.4.2 Zonas Mortas no Leito de Jorro Fluidizado

As zonas mortas são definidas como a área onde não há movimento visível de partículas (LIM & GRACE, 1987). Elas são bastante indesejáveis em aplicações com recobrimento de partículas, mistura de sólidos, pirólise de carvão e secagem de pastas ou líquidos, isto porque a zona morta diminui a área efetiva de transferência de calor e de massa.

HE *et alii* (1992) observaram que a zona morta decresce com a introdução de vazão auxiliar no ânulo de um leito de jorro. Para alguns tipos de partículas os autores verificaram que a zona morta desaparecia com apenas um pequeno acréscimo de vazão no ânulo.

2.4.3 Altura Máxima Possível para um Leito de Jorro Fluidizado

Uma vez que no leito de jorro fluidizado o ânulo não atua como um leito empacotado. Uma maior porção do ar do jorro passa através do ânulo diminuindo a

máxima altura possível de se obter o jorro. O decréscimo desta altura é uma função da quantidade de fluido que passa para o ânulo na entrada do leito nas condições de mínima fluidização.

LITTMAN *et alii* (1976) relataram que a máxima altura de jorro em leitos de jorro fluidizados (H_{MSF}), era a mesma que para o leito de jorro convencional (H_S), em um mesmo sistema. Porém o trabalho de HADZISDMAJLOVIC (1980) mostrou que $H_{MSF} \leq H_S$, a igualdade aplicava-se apenas quando não existia a fluidização no ânulo. Como H_{MSF} é um parâmetro muito importante para a predição de características do leito, HADZISDMAJLOVIC *et alii* (1983) redesenvolveram uma correlação semi-teórica apresentada por LITTMAN *et alii* (1976). BABU RAO *et alii* (1985), apresentaram uma correlação para a equação desenvolvida por HADZISDMAJLOVIC *et alii* (1983). Mais recentemente, GRBAVCIC *et alii* (1991), relataram uma nova correlação para H_{MSF} , que utiliza a razão entre H_{MSF} / H_S em função da vazão externa no ânulo e um parâmetro C, que é a razão entre a velocidade do fluido no topo do ânulo na mínima fluidização

A equação de altura máxima para jorros convencionais que BABU RAO *et alii* (1985) desenvolveram, fornece a taxa de variação entre a máxima altura do jorro fluidizado e a máxima altura do jorro padrão (H_{MSF} / H_{MS}).

$$\frac{H_{MS} - H_{MSF}}{H_{MS}} = 0,998 \left[\frac{(V_A(0))_{mSF}}{V_{mF}} \right] - 1,087 \left[\frac{(V_A(0))_{mSF}}{V_{mF}} \right] + 1,01 \left[\frac{(V_A(0))_{mSF}}{V_{mF}} \right]^3 \quad (12)$$

onde :

H_{MS} Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro convencional

H_{MSF} Altura máxima do leito capaz de produzir jorro em jorro fluidizado

$[V_A (0)]_{mSF}$ Vazão do fluido na entrada do ânulo nas condições de mínimo jorro fluidizado

V_{mF} Vazão mínima de fluidização

2.4.4 Vazão de Gás na Região Anular

A introdução de aeração suplementar através da base de um leito de jorro resulta em um acréscimo do fluxo através do ânulo, especialmente se a entrada do gás for perto da parede do leito. O jorro torna-se instável se um grande excesso de gás auxiliar for introduzido. (HADZISMAJLOVIC *et alii*, 1983)

Se a vazão auxiliar é introduzida uniformemente na base, o ânulo é fluidizado com velocidades mais baixas que as requeridas para fluidizar o leito estático. A fluidização se inicia no topo até chegar à base porque o fluxo auxiliar é aumentado progressivamente (NAGARKATTI & CHATTERJEE, 1974)

NAGARKATTI & CHATTERJEE (1974) também observaram que o fluxo externo requerido para fluidizar todo o ânulo depende sobretudo do fluxo do jorro na base. Os autores relataram que a base é a zona mais turbulenta do leito, onde os sólidos são sugados até a região do jato.

2.4.5 Perfil de Pressão no Leito

A queda de pressão ao longo do leito em função da vazão do jorro em um jorro fluidizado apresenta o mesmo tipo de comportamento que o observado em leito de jorro convencional (NAGARKATTI & CHATTERJEE, 1974). Quando se adiciona uma vazão auxiliar no ânulo, a queda de pressão ao longo do leito em condições de jorro fluidizado cresce a medida que esta vazão é adicionada. Após atingir um máximo, a queda de pressão cai para um valor constante (HADZISMAJLOVIC *et alii*, 1983)

LITTMAN *et alii* (1974) mediram a vazão mínima de jorro-fluidizado, em função da altura do leito e do diâmetro da entrada do jorro, utilizando um leito de jorro fluidizado com água. Neste trabalho os autores estudaram uma extensão da teoria de MAMURO & HATTORI (1968), para explicar a queda de pressão no leito.

LEFROY & DAVIDSON (1969) mediram a altura máxima do leito e a queda de pressão total do leito. Estes autores assumiram que a equação de Quarter Cousine, descreveria a distribuição de pressão no leito.

DAY *et alii* (1991) estudaram o perfil de pressão em leitos de jorro fluidizado e observaram que a queda de pressão radial não variou significativamente na região próxima ao topo do ânulo e apresentou uma grande variação perto da base.

A distribuição de pressão em um reator cônico de leito de jorro fluidizado foi estudada por HEIL & TELS (1983). Os autores desenvolveram uma equação teórica assumindo que a equação de Navier-Stokes poderia ser aplicada para descrever o

fluxo do gás e o movimento da fase dispersa do leito. Os autores assumiram também, que o fluxo é estacionário para o gás e para a fase densa. Eles desprezaram as forças inerciais e as forças gravitacionais. Para descrever a força de interação total entre a fase gasosa e a fase densa utilizaram a lei de Darcy, que se aplica para leitos de materiais não tão grandes e para velocidades em torno da velocidade mínima de fluidização do leito.

A distribuição de pressão obtida pode ser calculada para leitos bidimensionais e para leitos cônicos. Para o leito bidimensional a distribuição de pressão é dada por:

$$P(x, z) = P(L_N, z) \quad \text{para } x < L_N \quad (13)$$

$$P(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \alpha_n z \left(\cosh \alpha_n \left(\frac{L_1}{2} - x \right) / \cosh \alpha_n \left(\frac{L_1}{2} - L_N \right) + (\eta / K_1) \right. \\ \left. x \left[\frac{V_A(0)}{2 \left(\frac{L_1}{2} - L_N \right) L_2} \right] (H_{SF} - z) \right) \quad \text{para } x \geq L_N \quad (14)$$

onde:

$$A_n = 2 H_{SF} \left\{ (\eta / K_0) V_N(0) / 2 L_N L_2 - (\eta / K_1) \left[\frac{V_A(0)}{2 \left(\frac{L_1}{2} - L_N \right) L_2} \right] / \right. \\ \left. / \alpha_n^2 H_{SF}^2 \left\{ 1 + (K_1 / K_0) (B_n / \alpha_n L_N) \right\} \right.$$

$$B_n = \tanh \left(\alpha_n \left(\frac{L_1}{2} - L_N \right) \right)$$

$$\alpha_n = (n + 1/2) \pi / H_{SF}$$

H_{SF} Altura do leito em jorro fluidizado (m)

K_0 Permeabilidade do canal do jorro

K_1 Permeabilidade da fase densa

L_1 Largura do leito bidimensional (m)

L_2 Espessura do leito bidimensional (m)

L_N Largura da entrada do jorro em leito bidimensional (m)

$V_A(0)$ Vazão do fluido na entrada do ânulo (m^3 / s)

$V_N(0)$ Vazão do fluido na entrada do jorro (m^3 / s)

x Distância horizontal no leito (m)

z	Distância vertical no leito (m)
η	Viscosidade dinâmica da fase gasosa (Ns / m^2)

2.4.6 Características da Fonte / Diâmetro e Forma do Jorro

As características da fonte mudam nos leitos de jorro fluidizados. A fonte tende a ser menor e mais concentrada à medida que o fluxo auxiliar é adicionado e o fluxo total é mantido constante. Ela decresce provavelmente porque menos fluido passa através do jorro, resultando em uma menor velocidade do gás e da partícula no topo do jorro. Também é observado que a fonte se torna maior quando o fluxo auxiliar é adicionado, mantendo-se fixa a vazão do jorro, isto porque uma vez o ânulo fluidizado a vazão excedente passa através do jorro aumentando a velocidade do fluido e da partícula no topo da fonte (HADZISMAJLOVIC *et alii*, 1983).

GRACE & MATHUR (1978) observaram que em leitos de jorro convencionais, a altura da fonte cresce à medida que cresce a velocidade do gás. A altura da fonte também cresce quando a altura dos inertes é aumentada, mantendo-se a razão entre a velocidade no jorro (U_s) e a velocidade mínima de jorro (U_{ms}) constante. Os autores observaram ainda que para U_s / U_{ms} menores que 1,2, a altura do leito estático era menor que a altura da fonte, para todas as condições estudadas.

SUTANTO *et alii* (1985), estudaram as formas típicas do jorro para diversos materiais diferentes. O leito utilizado pelos autores era cônico-cilíndrico e possibilitava a introdução de vazão auxiliar em diferentes alturas na base. As formas típicas obtidas encontram-se na figura 2.11:

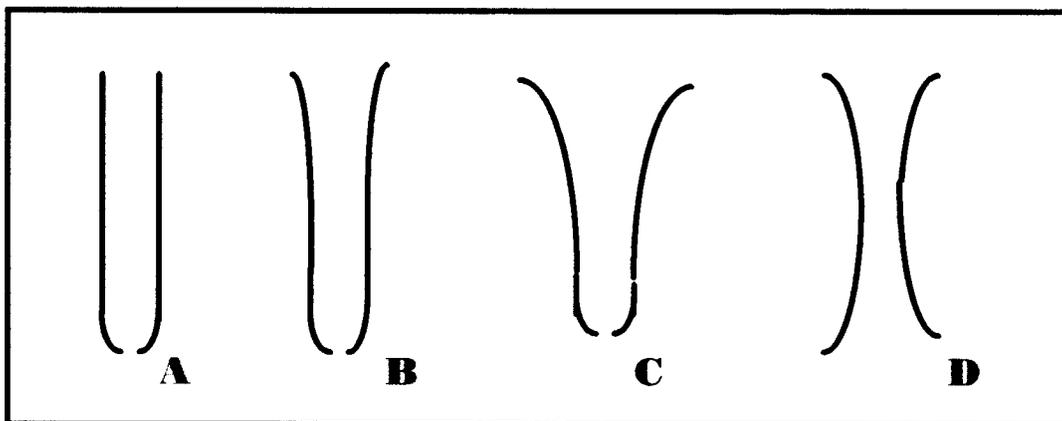


Figura 2.11- Formas típicas de jorro: **A** Milho, **B** Poliestireno, **C** Polietileno de alta densidade, **D** Poliestireno com a adição de vazão auxiliar.

A forma do jorro foi praticamente constante desde a base para o milho **A**. O jorro foi continuamente divergente para as partículas de polietileno **C**. Para o poliestireno **B**, o jorro tendeu a divergir perto da superfície do leito, principalmente se a altura do leito era maior que 0,45m com o diâmetro no jorro de 25,4 mm e com altas vazões no ânulo. A distorção no jorro mostrada na figura 2.11 **D**, foi observada quando era adicionada uma vazão no ânulo através das entradas de ar auxiliar mais baixas da base.

Não são reportadas na literatura correlações para diâmetro do jorro em leito de jorro fluidizado. Existem porém várias correlações empíricas para obter-se o diâmetro do jorro em leito convencional. Entre elas destacam-se:

$$D_s = 5,61 G^{0,433} D_c^{0,583} \mu_f^{0,133} / (\rho_b \rho_f \rho_p)^{0,283} \quad \text{WU et alii (1987) (15)}$$

$$D_s = 0,384 G^{0,5} D_c^{0,75} / (\rho_b)^{0,25} \quad \text{BRIDGWATER \& MATHUR (1972) (16)}$$

$$D_s = 2,0 G^{0,49} D_c^{0,68} / (\rho_b)^{0,41} \quad \text{MC. NAB (1972) (17)}$$

onde :

D_c Diâmetro da coluna (m)

D_s Diâmetro médio do jorro (m)

ρ_b Densidade “bulk” dos sólidos em leito livre (kg / m³)

ρ_f Densidade do fluido (kg / m³)

ρ_p Densidade da partícula (kg / m³)

μ_f Viscosidade do fluido (kg / m s)

2.4.7 Estabilidade do Leito de Jorro Fluidizado com a Adição de Líquidos

A literatura apresentou escassas informações sobre leito de jorro fluidizado com a adição de líquidos ou pastas. As informações necessárias foram então retiradas dos trabalhos em que se utilizam o leito de jorro convencional e espera-se obter na prática comportamento semelhante.

A secagem do material líquido ou pastoso sobre as partículas inertes começa com a introdução do material a ser seco no interior do secador (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1993). O material cobre as partículas com uma camada fina. Devido à evaporação há uma mudança nas propriedades físicas do material. Ao mesmo tempo, um grande número de colisões das partículas entre si, e com as paredes, causa fricção da camada do material. O pó formado é levado junto com o ar e coletado no ciclone. Portanto a cinética do processo de secagem pode ser dividida

em duas fases: cinética da secagem do material e cinética da fricção. De acordo com as propriedades do material, a taxa global é uma combinação das duas cinéticas.

2.4.7.1 Circulação das partículas sólidas em leitos úmidos

A circulação de sólidos é afetada pelas forças entre as partículas que são causadas pelas propriedades reológicas das suspensões. A adição de líquidos ou pastas causa um aumento na velocidade de jorro mínimo, devido à maior interação entre as partículas de inertes. No caso de leito de jorro convencional a operação deve ser efetuada com velocidade do gás cerca de 20% e 30% maior que a velocidade de jorro mínimo, em leito seco (SCHNEIDER & BRIDGWATER , 1993).

A formação de blocos de líquido no interior do leito ocorre devido à introdução de uma força coesiva nas partículas, que se soma à tensão superficial, causando a redução da pressão estática do leito.

A alta resistência do ânulo resulta em uma alta proporção de ar passando através do jorro. Assumindo que o diâmetro do jorro é imutável, é esperado que após a adição do líquido ocorra um aumento na altura da fonte para uma velocidade constante da vazão do jorro e da fluidização. Para obter-se a mesma altura da fonte mantendo-se a vazão da fluidização, realiza-se uma redução na velocidade do ar do jorro.

O líquido age no interior do leito como agente lubrificante ou de bloqueio, assim sendo além da circulação dos sólidos, outros fatores são afetados pela presença do líquido. Estes fatores são descritos a seguir.

2.4.7.2 Estabilidade do jorro

De acordo com SCHNEIDER & BRIDGWATER (1993), o máximo conteúdo de líquido possível em leito de jorro convencional é cerca de 0,1% do volume do leito seco para líquidos de alta viscosidade e de cerca de 4% do volume do leito seco para líquidos de baixa viscosidade. Para valores acima de 5%, apenas se consegue estabilidade em algumas ocasiões.

2.4.7.3 Velocidade do jorro U_s

SCHNEIDER & BRIDGWATER (1993) estudaram a velocidade do jorro em leitos de jorro convencionais com a adição de líquidos. Se a velocidade da partícula U_p pode ser representada pela velocidade do ar no jorro, (U_s), a taxa entre as forças inerciais (F_{in}) e as forças viscosas (F_v) torna-se:

$$F_{in} / F_v \propto \rho_p d_p U_s^{dry} / \mu_{liq} = R \quad (18)$$

com	d_p	Diâmetro médio da partícula (m)
	μ_{liq}	Viscosidade do líquido de secagem (kg / m s)
	ρ_p	Densidade da partícula (kg / m ³)
	U_s^{dry}	Velocidade superficial do ar no jorro no leito seco (m / s)

Define-se então C:

$$U_s^{wet} / U_s^{dry} = 1,0 - C (V_1 / V_b) \quad (19)$$

com	U_s^{dry}	Velocidade superficial do ar no jorro no leito seco (m / s)
	U_s^{wet}	Velocidade superficial do ar no jorro no leito úmido (m / s)
	V_b	Volume " bulk " do leito (m ³)
	V_1	Volume de líquido introduzido no leito (m ³)

O valor C é aproximadamente uma função linear de R. Para altas viscosidade C é elevado. De maneira geral, pode-se considerar que $C = -4$ é um valor único para os sistemas que envolvem a secagem, utilizando como líquidos: água $\mu_1 = 1$ mPa.s, solução de glicerol com $\mu_1 = 10$ mPa.s e suspensões de alumina.

2.4.7.4 Queda de pressão ao longo do leito úmido

A queda de pressão no leito seco depende do material do leito, profundidade, e temperatura do ar. SCHNEIDER & BRIDGWATER (1993) graficaram os valores obtidos na queda de pressão no leito (ΔP_{ASF} ou ΔP_{AS}), pela pressão dinâmica $0,5 \rho_f U_s^2$, e verificaram que esses dados se agrupavam em uma curva simples para as diversas alturas do leito e diferentes temperaturas, dependendo somente da natureza do sólido.

Com a adição do líquido, três diferentes modificações foram notadas pelos autores:

- Com um conteúdo moderado de líquido de baixa viscosidade, a curva de queda de pressão do leito seco não se alterou. A queda de pressão no jorro é reduzida concomitantemente com a pressão dinâmica do ar.
- Com a adição de líquido de alta viscosidade, ΔP_{AS}^{wet} é sempre menor ΔP_{AS}^{dry} , para a mesma velocidade de jorro U_s .
- Com um conteúdo elevado de líquido, quando a porosidade do ânulo é notadamente reduzida, ΔP_{AS}^{wet} é maior que para o mesmo leito seco com U_s idêntica. Isto

permanece quase imutável com o acréscimo do conteúdo do líquido, apesar da velocidade do ar ser mais baixa.

Experimentos realizados em leito fixo revelaram que se o ânulo do leito de jorro, pode ser descrito pelo termo viscoso da equação de Ergun, deduzindo-se o volume do líquido da porosidade do leito seco, a queda de pressão do leito será dada por:

$$\frac{\Delta P_{AS}^{wet}}{\Delta P_{AS}^{dry}} = \frac{(1 - \epsilon_A^{dry} + V_1 / V_b)^2 (\epsilon_A^{dry})^3 U_A^{wet}}{(\epsilon_A^{dry} + V_1 / V_b)^3 (1 - \epsilon_A^{dry})^2 U_A^{dry}} \quad (20)$$

onde :

ΔP_{AS}^{wet}	Queda de pressão no ânulo em jorro convencional, no leito úmido	
ΔP_{AS}^{dry}	Queda de pressão no ânulo em jorro convencional, no leito seco	
U_A^{dry}	Velocidade superficial do ar no ânulo, no leito seco (m / s)	
U_A^{wet}	Velocidade superficial do ar no ânulo, no leito úmido (m / s)	
ϵ_A^{dry}	Porosidade do leito seco (região anular)	
V_b	Volume "bulk" do leito	(m ³)
V_1	Volume de líquido adicionado ao leito	(m ³)

Existe uma vasta bibliografia sobre a hidrodinâmica dos leitos fluidizados, de jorro e de jorro fluidizado. É bastante difícil apresentar tudo o que já foi relatado em apenas um trabalho.

A bibliografia que trata de leitos de jorro úmidos relatam, em sua maioria, processos de secagem . O estudo da hidrodinâmica de leitos de jorro úmidos é muito pouco apresentado, sendo que até o momento não encontrou-se trabalhos sobre a hidrodinâmica de leitos de jorro fluidizados bidimensionais úmidos.

3 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Equipamento

Um equipamento para a secagem de líquidos e pastas do tipo jorro fluidizado bidimensional foi construído na planta piloto do Departamento de Engenharia de Alimentos, UNICAMP. Constituem esse equipamento: soprador, aquecedor de gás, linha de transporte do gás até o leito de jorro bidimensional acrescido de inertes, um atomizador para adição do líquido de secagem e a linha de transporte do líquido até o atomizador. (Figura 3.1, 3.3 e 3.4)

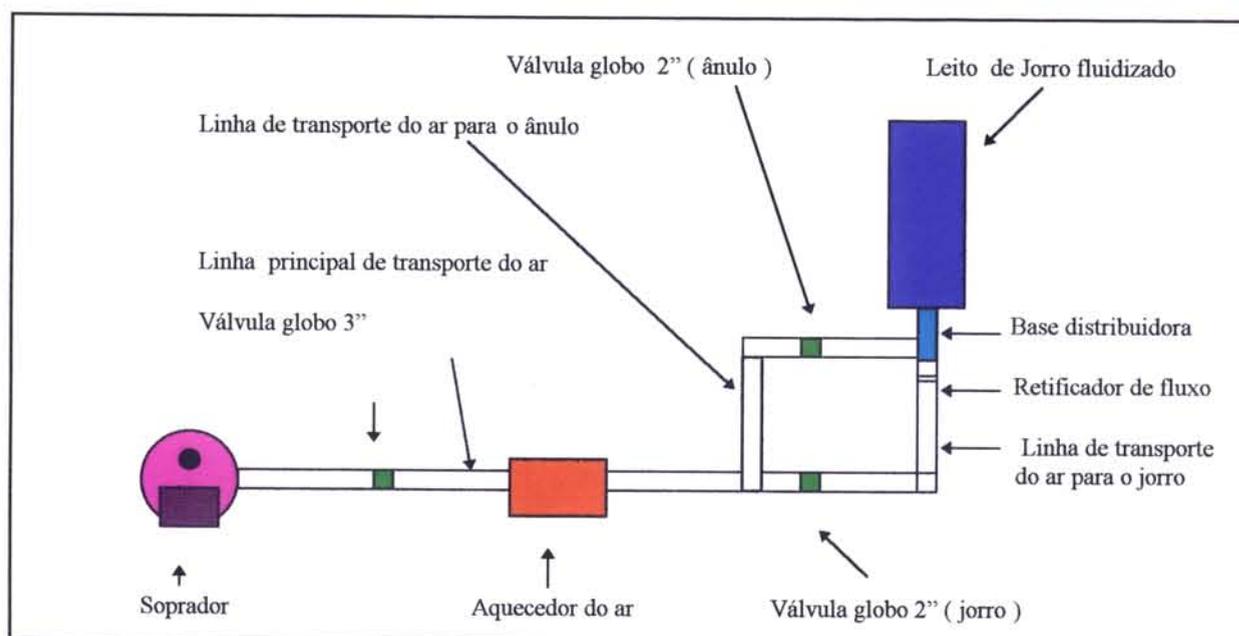


Figura 3.1 - Diagrama Esquemático do Secador de Leito de Jorro Fluidizado

O ar é fornecido ao sistema através de um ventilador de 12,5 Hp. O ventilador está instalado na parte externa do prédio. Para a proteção do equipamento existe uma construção em alvenaria que o protege da chuva, sol, etc.

As linhas de transporte do ar do jorro e da fluidização são tubulações de aço galvanizado com duas polegadas de diâmetro. A linha de transporte do ar para o jorro contém um retificador de fluxo instalado imediatamente abaixo da base distribuidora, que consiste de tubos de cobre com 3/8 de polegada de diâmetro arranjados no formato de uma colméia (figura 3.2), sendo sua função estabilizar o jorro .

O sistema possui uma válvula globo com três polegadas de diâmetro, corpo de bronze, para o controle da vazão total no sistema. O equipamento possui ainda

controle independente das vazões nas linhas que conduzem o ar para o jorro e para o ânulo, efetuado pelo uso de duas válvulas globo com 2 polegadas de diâmetro cada.

As medidas de vazão são obtidas através de medidores de placa de orifício e as medidas de pressão pelo uso de manômetros tipo U, devidamente calibrados. Para calibrar a vazão no sistema foi utilizado um “Laminar Flow Element”, modelo 50MY15-6. Para maiores detalhes consultar o apêndice A.

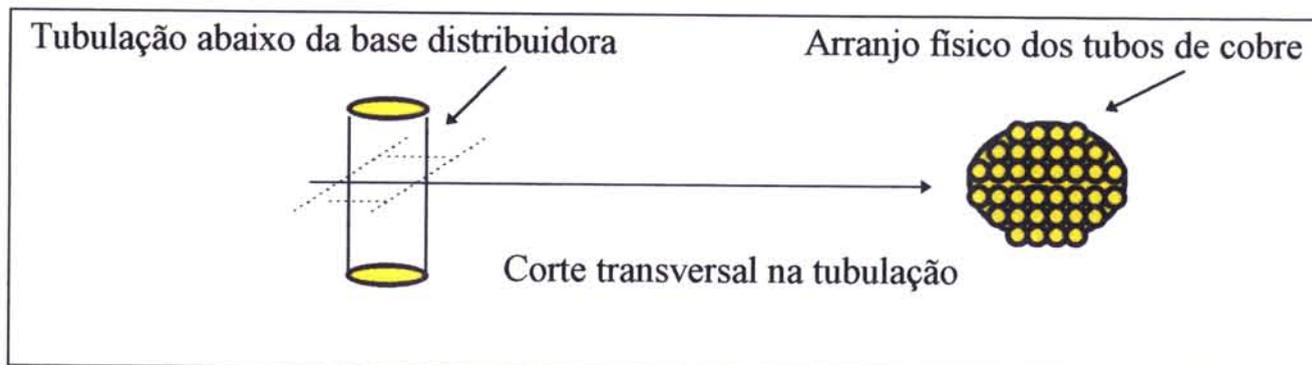


Figura 3.2 - Diagrama esquemático da distribuição dos tubos de cobre no retificador de fluxo

A base distribuidora do ar para o leito é metálica. O distribuidor do ar para o ânulo consiste de uma placa perfurada com 5 % de abertura. O ar pode entrar na base distribuidora através das duas linhas de transporte do ar, a linha do jorro e a do ânulo. As dimensões da base são 0,05 m de largura e 0,3 m de comprimento. A entrada do ar do jorro é quadrangular, centralizada na base, e possui 0,05m de aresta. Uma tela fina com abertura de 2 mm foi instalada no sistema, a fim de impedir que os inertes penetrem pela tubulação do jorro.

O leito foi construído em acrílico de 10 mm de espessura para melhor visualização dos processos. Utilizaram-se esferas de vidro como inertes para o preenchimento do leito. O diâmetro médio de partícula foi determinado por amostragem aleatória e medida direta do valor, resultando em um valor de 3.77 ± 0.26 mm. A densidade dos inertes foi determinada por picnometria, fornecendo um valor de 2516 ± 26 kg / m³. Para maiores detalhes sobre a caracterização dos inertes, consultar o apêndice B.

Os pontos de tomadas de pressão estáticas encontram-se distribuídos na base e no topo do leito. Para medidas de perfil de pressão, utilizou-se uma sonda móvel feita de cobre com 6 mm de diâmetro e 1,2 m de comprimento. A localização do orifício para tomada de pressão é perpendicular ao comprimento da sonda.

O leito em acrílico é fixado na base metálica por meio de uma flange com 12 parafusos S6. Uma placa de borracha reforçada com fios de aço foi colocada entre a

base e o leito para evitar vazamentos de ar. Esta placa permite o aperto dos parafusos até o ponto em que não ocorram vazamentos.

O sistema de fechamento da parte superior do leito consiste de uma tampa de acrílico com dois furos centralizados. Estes furos são para a passagem das mangueiras que conduzem o ar e o fluido de secagem para o aspersor. Eles têm um diâmetro tal que as mangueiras passam por dentro deles e se ajustam de maneira a não permitir o vazamento do ar ou do fluido de secagem. Para fixação da tampa ao leito utilizou-se o mesmo sistema descrito para fixar o leito à base metálica.

O aquecedor de ar consiste de 5 resistências aletadas, cada uma delas com a potência de 1 kW. Quatro resistências funcionam independentemente com a sua potência integral. A quinta resistência está ligada a um controlador de corrente elétrica Dynasense Modelo 2156 - 40 da Cole-Parmer Instrument Company. Este controlador de corrente permite o ajuste da potência dissipada pela resistência e conseqüentemente permite o ajuste fino da temperatura do gás.

Para medidas de temperatura no leito foram usados termopares tipo T, devidamente ligados a um indicador de temperatura marca SalvTerm, modelo TC - 900 tipo T (calibrado de $0 - 300 \pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$), Salvicasagrande. Como complemento do sistema de medida de temperatura utilizou-se uma chave seletora de 10 pontos marca Pyrotec Modelo Chs - 10p, Robertshaw.

Para garantir uma umidificação uniforme do leito, nos experimentos realizados com o leito úmido, utilizou-se um aspersor de dois fluidos modelo 1/8 JBC - SS + SU 13A - SS , Spraying Systems do Brasil. Uma bomba peristáltica , Masterflex Pump Controller, Modelo de cabeçote 7018 -52, Cole Parmer Instrument Company, regula a vazão do líquido. Para obter a faixa de vazão adequada e garantir a sanidade do produto a ser seco foi acoplada à bomba uma mangueira de silicone 3/4" Masterflex 6411 - 18. Um compressor de ar contínuo 1/3 Hp, Modelo SA 55 NXGTC - 4143, Merson - Motor Division, é utilizado para fornecer ar comprimido ao sistema. Para obter detalhes sobre a calibração da vazão do aspersor, consultar o apêndice C.



Figura 3.3 - Vista Frontal do Secador Bidimensional de Leito de Jorro Fluidizado

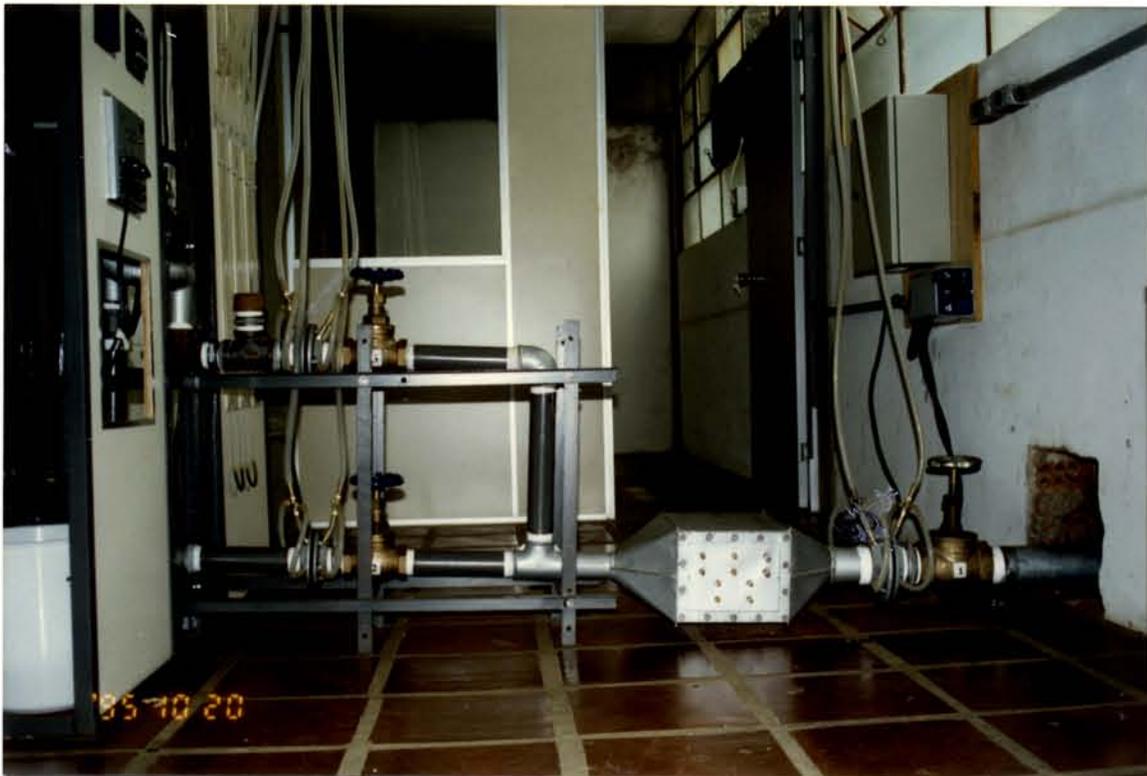


Figura 3.4 - Visão Lateral do Secador dentro da Planta Piloto da Área de Secagem na Faculdade de Engenharia de Alimentos

3.2 Operação do Equipamento

3.2.1 Procedimento de Homogeneização

Antes de se iniciar qualquer estudo no equipamento, é necessário realizar um procedimento de homogeneização do leito, a fim de evitar que o sistema parta de uma condição inicial aleatória. Este procedimento consiste em manter as 3 válvulas de regulação de vazão do equipamento fechadas. O ventilador é ligado em duas etapas com o uso de uma chave tipo estrela. A seguir abrir totalmente a válvula globo da tubulação principal, e posteriormente as válvulas controladoras das vazões no jorro e no ânulo. Após alguns minutos fechar novamente as válvulas do sistema na seguinte ordem: primeiro a controladora da vazão no ânulo, a seguir a controladora da vazão no jorro e por último a controladora da vazão total. A partir de então considera-se o sistema homogeneizado e pronto para as medidas a serem realizadas.

3.2.2 Queda de Pressão no Leito

Os valores de queda de pressão no leito foram medidos variando a vazão no jorro ou no ânulo conforme o caso em estudo. Em todos os casos as medidas foram realizadas com a vazão crescente e decrescente. Dependendo do tipo de tratamento e do experimento, os valores de queda de pressão foram medidos no jorro ou no ânulo.

A metodologia aplicada para a tomada de valores de queda de pressão ao longo do leito é a seguinte:

- Queda de pressão no ânulo em função da vazão no ânulo (Leito Seco) - O leito era carregado com as partículas até a altura determinada (17 ou 22 cm). A vazão do jorro era ou não adicionada conforme o caso em estudo. Aumentou-se a vazão no ânulo em etapas, anotando-se a cada uma delas a respectiva queda de pressão no leito. Após atingir a fluidização diminuía-se a vazão aos poucos até zero, registrando para cada fase a nova queda de pressão. Os valores de queda de pressão foram obtidos pela diferença entre as pressões na base do ânulo e no topo do leito.

- Queda de pressão no jorro em função da vazão no jorro (Leito Seco) - O leito era carregado com as partículas até a altura determinada (17 ou 22 cm). A vazão no ânulo era ou não adicionada conforme o caso em estudo. A vazão do jorro era aumentada em pequenos intervalos e depois do tempo para estabilização, os valores de queda de pressão eram coletados. Alcançadas as condições de jorro, decrescia-se a vazão e se obtinha os dados de queda de pressão para vazão

decrecente. Os valores de queda de pressão foram calculados pela diferença entre os valores na base do jorro e no topo do leito.

Nas tabelas 3.1 e 3.2 encontram-se os valores da vazões auxiliares utilizadas no jorro ou no ânulo, para os experimentos realizados em leito seco e para alguns casos de leito úmido.

No caso de estudo da queda de pressão no leito úmido, os experimentos se concentraram na queda de pressão no jorro vs. a vazão no jorro com e sem aeração complementar no ânulo. A queda de pressão em todos os casos foi realizada com uma alimentação contínua de líquido igual a 19 g / min. A metodologia neste caso foi a seguinte:

- Queda de pressão no jorro em função da vazão no jorro (Leito Úmido) - O leito era carregado com as partículas até a altura determinada (17 ou 22 cm). A vazão no ânulo era ou não adicionada conforme o caso em estudo. O sistema de aspersão do líquido era ligado de maneira a fornecer uma vazão constante e igual a 19g / min . A vazão do jorro foi aumentada aos poucos e depois do tempo necessário para a estabilização, os valores de queda de pressão eram coletados. Alcançadas as condições de jorro, diminuía-se a vazão, obtendo-se os dados de queda de pressão para vazão decrescente. Os valores de queda de pressão foram obtidos pela diferença entre os valores na base do jorro e no topo do leito.

Tabela 3.1 Valores das Diferentes Vazões Auxiliares no Jorro. Experimentos de Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo (Leito Seco)

Experimento	Vazão no Jorro (m³ / s)	Altura Inertes (cm)
1 \ 2	0	17 \ 22
3 \ 4	1,90 10 ⁻²	17 \ 22
5 \ 6	2,12 10 ⁻²	17 \ 22
7 \ 8	2,33 10 ⁻²	17 \ 22

Tabela 3.2 Valores das Diferentes Vazões Auxiliares no Ânulo . Experimentos de Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro (Leito Seco e Úmido)

Experimento	Vazão no Ânulo (m³ / s)	Altura Inertes (cm)
1 \ 2	0	17 / 22
3 \ 4	2,46 10 ⁻²	17 / 22

3.2.3 Perfil de pressão no leito

Para determinar o perfil de pressão no leito, utilizou-se uma sonda de cobre com tomada de pressão perpendicular ao seu comprimento. As tomadas dos perfis de pressão foram realizadas para duas alturas diferentes de inertes no leito (17 e 22 cm), em diferentes condições de vazão no jorro e no ânulo, a tabela 3.3 apresenta estes valores.

O perfil radial foi medido pelo movimento da sonda através de intervalos regulares, desde a interface entre o jorro e o ânulo até a parede do leito. Para as medidas longitudinais de pressão, utilizou-se o movimento longitudinal da sonda em intervalos regulares, desde a base até o topo do leito.

A reprodutibilidade nas condições da estrutura do leito são difíceis de se obter, porém as medidas de pressão no leito em fluxo estável do jorro são reprodutíveis. Flutuações nestas medidas são diminuídas tirando-se uma média dos vários valores obtidos nos diferentes experimentos.

Tabela 3.3 Valores das vazões no jorro e no ânulo usados na determinação dos perfis de pressão (altura do leito 17 e 22 cm)

Experimento	Vazão no Jorro (m³ / s)	Vazão no Ânulo (m³ / s)	Altura Inertes (cm)
1 \ 2	1,90 10 ⁻²	0	17 \ 22
3 \ 4	2,33 10 ⁻²	0	17 \ 22
5 \ 6	2,69 10 ⁻²	0	17 \ 22
7 \ 8	1,90 10 ⁻²	1,15 10 ⁻²	17 \ 22
9 \ 10	2,33 10 ⁻²	1,15 10 ⁻²	17 \ 22
11 \ 12	2,69 10 ⁻²	1,15 10 ⁻²	17 \ 22
13 \ 14	1,90 10 ⁻²	1,66 10 ⁻²	17 \ 22
15 \ 16	2,33 10 ⁻²	1,66 10 ⁻²	17 \ 22
17 \ 18	2,69 10 ⁻²	1,66 10 ⁻²	17 \ 22
19 \ 20	1,90 10 ⁻²	2,05 10 ⁻²	17 \ 22
21 \ 22	2,33 10 ⁻²	2,05 10 ⁻²	17 \ 22
23 \ 24	2,69 10 ⁻²	2,05 10 ⁻²	17 \ 22

3.2.4 Velocidade de jorro em leito úmido mantendo-se altura da fonte constante

A velocidade de jorro em leito úmido, mantendo-se a altura da fonte constante, foi obtida através de testes por batelada. Acrescentada a massa de água, foram tomados os valores da vazão no jorro em função do tempo, mantendo-se a altura da fonte constante.

As vazões auxiliares utilizadas no ânulo encontram-se na tabela 3.4

Tabela 3.4 Vazões auxiliares no ânulo utilizadas para a determinação da velocidade no jorro mantendo-se a altura de fonte constante

Experimento	Vazão no Ânulo (m³ / s)	Altura Inertes (cm)
1 \ 2	0	17 / 22
3 \ 4	1,15 10 ⁻²	17 / 22

3.2.5 Descrição das circulação das partículas e tamanho das zonas mortas

A descrição dos movimentos das partículas e os tamanhos de zonas mortas foram obtidos através da observação do leito com a altura dos inertes fixa em 17 cm. Observou-se o leito com o acréscimo da vazão no jorro ou no ânulo em diferentes condições de aeração auxiliar. A dimensão das zonas mortas foi obtida por medida direta do seu tamanho no leito

As diferentes vazões auxiliares utilizadas no jorro e no ânulo encontram-se na tabela 3.5

Tabela 3.5 Valores das vazões auxiliares no jorro e no ânulo nos experimentos de determinação de zonas mortas

Experimento	Vazão no Jorro (m³ / s)	Vazão no Ânulo (m³ / s)	Altura Inertes (cm)
1	-	0	17
2	-	2,05 10 ⁻²	17
3	2,33 10 ⁻²	-	17

3.2.6 Capacidade Evaporativa do Secador

A superfície de resposta da capacidade evaporativa do leito em função da vazão no jorro e no ânulo foram obtidas através de um planejamento experimental 2² com

complementação para o modelo quadrático ($2^2 + \text{estrela}$) (tabela 3.6). Realizou-se também experimentos comparativos da capacidade evaporativa fixando-se a vazão no jorro e variando-se a vazão no ânulo (tabela 3.7).

Tabela 3.6 Planejamento Experimental $2^2 + \text{estrela}$

Valores Codificados			Valores Decodificados		
Ensaio	Vazão Jorro (m^3/s)	Vazão Ânulo (m^3/s)	Ensaio	Vazão Jorro 10^{-2} (m^3/s)	Vazão Ânulo 10^{-2} (m^3/s)
1	-1	-1	1	0.36	0.44
2	+1	-1	2	2.12	0.44
3	-1	+1	3	0.36	2.60
4	+1	+1	4	2.12	2.60
5	0	0	5	1.24	1.52
6	-1.41	0	6	0	1.52
7	0	1.41	7	1.24	3.04
8	1.41	0	8	2.48	1.52
9	0	-1.41	9	1.24	0

Tabela 3.7 Valores das vazões no jorro e no ânulo nos experimentos de comparação da capacidade evaporativa no secador

Experimento	Vazão no Jorro (m^3 / s)	Vazão no Ânulo (m^3 / s)	Altura Inertes (cm)
1	$2,12 \cdot 10^{-2}$	0	22
2	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$0,44 \cdot 10^{-2}$	22
3	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	22
4	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$	22
5	$2,60 \cdot 10^{-2}$	0	22
6	$2,60 \cdot 10^{-2}$	$0,44 \cdot 10^{-2}$	22
7	$2,60 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	22

Os experimentos foram executados no secador com a altura do leito fixa em 22 cm. A adição de líquidos foi feita em batelada e o volume de líquido adicionado fixo em 4% do volume de inertes (133g). Com a vazão constante no jorro e no ânulo, mediu-se a temperatura do ar na entrada do secador e as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido na saída do secador em função do tempo.

4- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição da Circulação das Partículas e Tamanho das Zonas Mortas no Leito Seco

Para o estudo da descrição do movimento das partículas utilizou-se um leito com altura fixa de inertes em 17 cm, variou-se a vazão no jorro ou no ânulo de zero até o máximo permitido pelo nosso ventilador. Em alguns casos adicionou-se uma aeração suplementar, ou seja, o leito atuou algumas vezes como jorro puro e outras como jorro fluidizado.

4.1.1 Leito de Jorro Convencional

Foi analisado o comportamento do leito sem nenhuma aeração complementar, a partir do zero de vazão no jorro. Observou-se alguma alteração no leito a partir de uma vazão no jorro de $1,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (6,98 m/s). Até este valor da vazão, o gás percola entre as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. A queda de pressão no leito aumenta com o acréscimo da vazão. O aumento da vazão a partir de $1,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (6,98 m/s), produz alguma vibração na parte superior do leito e ao atingir $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, (7,58 m/s) verifica-se a formação de uma cavidade na base do jorro.

A cavidade surge devido ao fato do ar já ser capaz de deslocar algumas partículas. A cavidade alonga-se até a formação do jorro interno. A queda de pressão aumenta com o acréscimo da vazão até um máximo e em seguida diminui. Após este ponto, o incremento na vazão não altera a perda de carga do sistema que se torna constante. Mais ainda, o aumento na vazão do gás acarreta somente a elevação da fonte.

No jorro, as partículas que entram na base, sofrem um elevado impulso que as aceleram. Durante o trajeto para o topo do leito a partícula transfere parte de sua energia cinética para as outras partículas que entraram no jorro a partir do ânulo. Assim sendo, obtém-se uma aceleração média das partículas a um determinado nível. Com a perda constante de energia ao longo do leito existe uma altura na qual sua velocidade iguala-se a zero e ela retorna ao leito.

Quando o jorro está formado, a expulsão das partículas da parte central ocasiona uma considerável expansão do leito. Com uma vazão de $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, (7,58 m/s), o leito aumentou sua altura de 17 para 20 cm. A expansão do volume do leito foi praticamente igual ao volume de inertes deslocados pela formação do jorro.

Pode-se verificar isto neste estudo:

Volume do leito fixo = Volume do ânulo + Volume do jorro

$$\text{Volume do leito fixo} = (0,17 \cdot 0,05 \cdot 0,25) \text{ m}^3 + (0,05 \cdot 0,05 \cdot 0,17) \text{ m}^3$$

$$\text{Volume do leito fixo} = 2,125 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 + 4,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Volume do leito fixo} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Logo o volume do leito com o jorro formado poderia ser calculado como:

Volume do leito expandido = Volume inicial do leito + Volume inicial do jorro

$$\text{Volume do leito expandido} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 + 4,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Volume do leito expandido} = 2,975 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Experimentalmente obteve-se o seguinte valor de volume do leito com o jorro formado:

$$\text{Volume do leito expandido experimental} = (0,20 \cdot 0,05 \cdot 0,3) \text{ m}^3$$

$$\text{Volume do leito expandido experimental} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Assim sendo obtivemos uma ótima concordância entre o valor esperado e o obtido.

Conclui-se que o ânulo atua praticamente como um leito empacotado, de porosidade aproximadamente igual ao do leito fixo, com um movimento descendente das partículas. No caso de estudo do leito de jorro fluidizado, esta afirmação não é válida pois o ânulo não atua como um leito empacotado e sim como um leito fluidizado. Assim para explicar a expansão do leito é necessário somar também a expansão ocasionada pela sua fluidização.

Durante a circulação de partículas, a corrente descendente de sólidos no ânulo é igual à corrente ascendente no jorro. O jorro pode ser comparado a um elevador vertical através do qual os sólidos são transportados pela corrente do ar.

Definiu-se como zonas mortas a área onde não há movimento visível de partículas, com base em LIM & GRACE (1987). A proporção de zonas mortas foi determinada por medida direta e pode ser observada na figura 4.1.

Nota-se que o tamanho da zona morta diminui com o acréscimo da vazão no jorro, porém a partir de $2,59 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,34 \text{ m} / \text{s}$), a dimensão da zona morta permanece inalterada. Verifica-se uma pequena histerese de queda de pressão no leito

entre os valores coletados durante o acréscimo e o decréscimo da vazão, entretanto as zonas mortas foram de tamanhos iguais, em relação às zonas mortas obtidas durante o aumento da vazão.

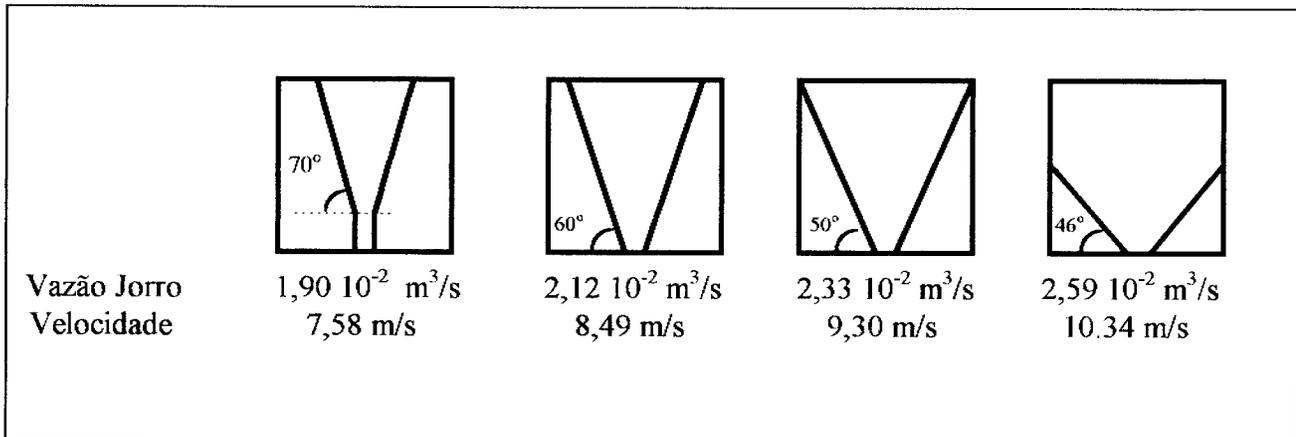


Figura 4.1 Zonas mortas no leito de jorro convencional em diferentes vazões

Não se utilizou a altura do leito igual à máxima possível, contudo a altura de 22 cm parece estar muito próxima dela. O jorro obtido com esta altura de leito nas condições de mínimo jorro estrangulava. Com base nesta observação visual, supôs-se que o mecanismo terminal do jorro seria o estrangulamento. Para confirmar esta suposição utilizou-se o parâmetro A_{2D} definido por PASSOS *et alii* (1993)

$$A_{2D} = R_{cmf} \cdot Re_T \cdot d_p / Ar \cdot L_N \quad (21)$$

Para valores de $A_{2D} < 0,044$ o mecanismo terminal do jorro é o estrangulamento do jorro e para $A_{2D} > 0,094$ a fluidização do topo do ânulo é o mecanismo que governa a instabilidade do jorro e para os valores intermediários temos uma transição entre os dois mecanismos.

Calculando o parâmetro A_{2D} para o nosso leito:

$$\phi = 1 \quad \text{logo} \quad Re_{mf}^* = Re_{mf}$$

$$Re_{mf} = \rho_f \cdot d_p \cdot \phi \cdot U_{mf} / \mu_f$$

$$Re_{mf} = 1,14 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1 \cdot 2,08 \text{ m/s} / 1,925 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} = 468$$

* Utilizou-se a velocidade mínima de fluidização experimental para leitos com 22 cm de altura de inertes

$$U_T = \left[\frac{3,1 \cdot g \cdot (\rho_f - \rho_p) \cdot d_p}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad 500 < Re_p < 200.000$$

$$U_T = \left[\frac{3,1 \cdot 9,8 \cdot (2516 - 1,14) \cdot 3,8 \cdot 10^{-3}}{1,14} \right]^{1/2} = 15,96 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad Re_p = 3592$$

$$g(\phi) = 1 \cdot (5,1 - 7,57 \cdot 1 + 4,09 \cdot 1 - 0,516) = 1,004 \cong 1$$

$$Re_T = \rho_f d_p g(\phi) U_T / \mu_f$$

$$Re_T = 1,14 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1 \cdot 15,96 \text{ m/s} / 1,925 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} = 3591$$

$$A_r = \rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$$

$$A_r = 1,14 \text{ kg/m}^3 \cdot (2516 \text{ kg/m}^3 - 1,14 \text{ kg/m}^3) \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3 / (1,925 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s})^2 = 4,14 \cdot 10^6$$

$$A_{2D} = R_{cmf} \cdot R_{eT} d_p / A_r L_N$$

$$A_{2D} = 468 \cdot 3591 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} / (4,14 \cdot 10^6 \cdot 0,05 \text{ m}) = 3,09 \cdot 10^{-2}$$

O valor de A_{2D} é de $3,09 \cdot 10^{-2}$ que é menor que 0,044. Valores baixos de A_{2D} implicam que a energia requerida para sustentar o jorro é menor que a perda friccional de energia através do jorro, acarretando no estrangulamento do jorro.

4.1.2 Leito de Jorro Fluidizado

De acordo com o diagrama de regimes apresentado por VUKOVIC *et alli*, (1984), existem situações distintas em relação à variação da vazão do jorro e do ânulo (figura 2.10, página 26). Variando-se a vazão do jorro e fixando-se a vazão no ânulo na mínima vazão de fluidização, segue-se a linha **GB** da figura 2.10. Variando-se a vazão do ânulo com a vazão do jorro fixa na vazão de mínimo jorro estamos nos baseando na linha a-a da mesma figura.

4.1.2.1 - Vazão no ânulo fixa na mínima vazão de fluidização variando a vazão do jorro, linha **GB** da figura 2.10.

No leito com a altura de inertes igual a 17 cm, foi fixada uma vazão no ânulo igual à vazão de mínima fluidização, $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (1,64 m/s) e variou-se a vazão no jorro. Observou-se o comportamento do leito partindo de uma condição já em movimento. O regime descrito pelo leito fica no limite entre o regime de jorro fluidizado e o jato em leito fluidizado, ou seja, o ânulo do leito encontra-se em uma situação de parcial fluidização, com a única exceção do ponto **G**, onde ocorre o leito fluidizado puro.

Com um pequeno acréscimo na vazão do jorro de $2,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (1,13 m/s), nota-se um sensível aumento no borbulhamento do leito, com bolhas crescendo ao longo do leito. A queda de pressão aumentou com a adição da vazão no jorro. Aumentando a vazão para $4,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (1,63 m/s), obteve-se um leito com aparência borbulhante. As bolhas se concentraram na região próxima do jorro e apesar de não existir a formação da cavidade na base do leito, as partículas

começaram a circular. Quando o jorro finalmente formou-se, a vazão no jorro era de $5,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (2,34 m/s), neste instante o borbulhamento do leito diminuiu, pois o excesso de ar introduzido na base passa através do jorro. O acréscimo de vazão no jorro até o máximo da capacidade do equipamento ($2,59 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, 10,34 m/s), não fez oscilar ou promoveu o estrangulamento do jorro, ou seja, o acréscimo de vazão no jorro não provocou instabilidade no leito.

Os tamanhos das zonas mortas podem ser observados na figura 4.2. A proporção de zonas mortas diminuiu com o acréscimo da vazão no jorro, porém a partir de uma vazão de $9,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (3,75 m/s), não ocorreu modificação nas suas dimensões. As dimensões das zonas mortas são comparativamente menores que as existentes no leito de jorro puro, indicando uma maior circulação de partículas. Durante o decréscimo da vazão a proporção obtida de zonas mortas, foi idêntica a observada no acréscimo.

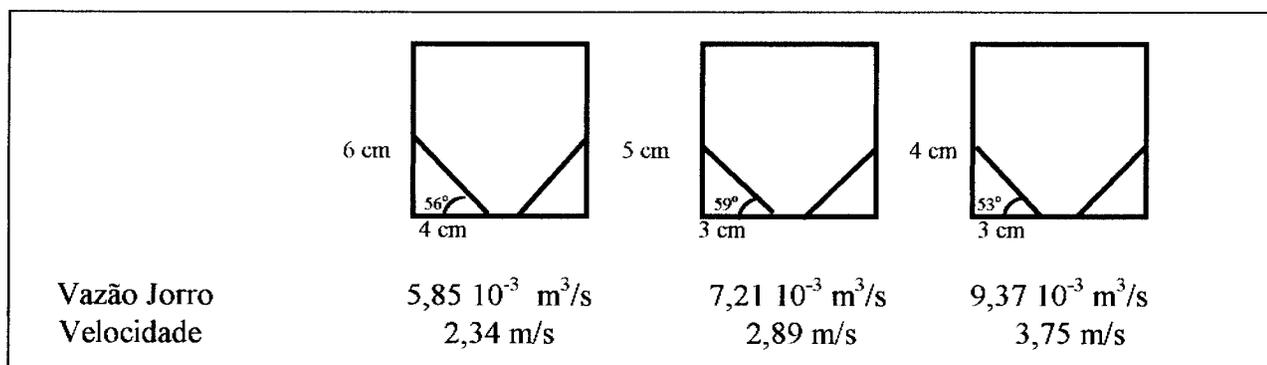


Figura 4.2 Zonas mortas no leito de jorro fluidizado com vazão no ânulo fixa em $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, (1,64 m/s), e diferentes vazões no jorro

4.1.2.2 - Queda de pressão em função da vazão na linha de fluidização

Neste caso, foi fixada uma vazão no jorro igual a $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, (9,32 m/s), e variou-se a vazão no ânulo. Mais uma vez, observa-se o comportamento do leito partindo de uma condição já em movimento e a partir do aumento da vazão no ânulo registra-se as alterações ocorridas. O regime apresentado pelo leito inicialmente é o de jorro puro, o acréscimo da vazão no ânulo muda o regime do leito para o jorro aerado até que o valor da vazão no ânulo atinja o ponto M. Após o ponto M um aumento na vazão leva o regime do leito para o jorro-fluidizado. Quando o aumento da vazão for suficiente chega-se ao ponto N (limite entre os regimes jorro-fluidizado e jato em leito fluidizado), entrando-se no regime de jato em leito fluidizado.

A circulação das partículas aumenta muito com um pequeno acréscimo da vazão no ânulo. Até uma vazão de $4,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,32 m/s), distribuída ao longo da base, o regime descrito pelo leito é o jorro aerado. Acima deste limite obtém-se o regime de jorro fluidizado. A condição de leito fluidizado permaneceu até a vazão no

ânulo de $1,27 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,02 \text{ m/s}$), quando entramos no estado de jato em leito fluidizado. Inversamente do caso anterior, esse tipo de jorro torna-se instável se um excesso de ar no setor do ânulo for adicionado (SUTANTO *et alii*, 1985). Um leito com vazão de $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($9,32 \text{ m/s}$), no jorro, apresentou instabilidade a partir de uma vazão de $2,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,95 \text{ m/s}$), de ar no ânulo.

As zonas mortas para um leito com uma vazão no jorro fixa de $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, ($9,32 \text{ m/s}$) e diferentes vazões na fluidização podem ser observadas na figura 4.3.

Conforme a figura 4.3 o tamanho da zona morta também diminui com o acréscimo da vazão de ar no leito. Foi neste caso que verificou-se visualmente a maior taxa de circulação de partículas, e conseqüentemente as menores áreas de zonas mortas relativamente aos casos anteriores. Quando a vazão auxiliar é suficientemente grande, algumas partículas são sugadas do ânulo para o jorro pela vazão suplementar na base do leito, aumentando a circulação das partículas e diminuindo as zonas mortas. HE, *et alii* (1992).

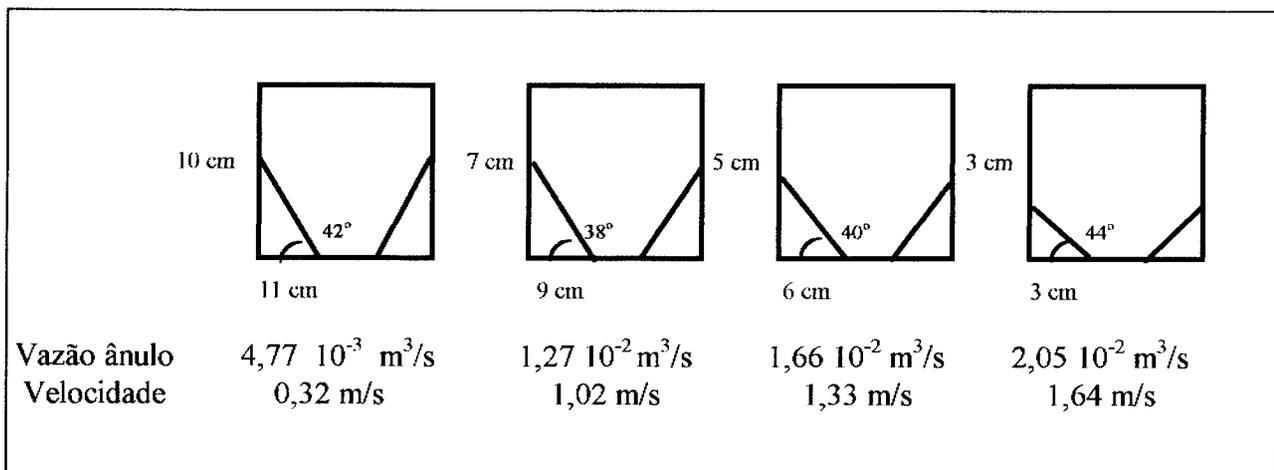


Figura 4.3 Zonas mortas no leito de jorro fluidizado com vazão no jorro fixa em $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($9,32 \text{ m/s}$), e diferentes vazões no ânulo.

Os diferentes tipos de regime foram fotografados e encontram-se nas figuras 4.4 até 4.9.



Figura 4.4 Jorro Convencional (Vazão no jorro = $2.33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,30 m / s))

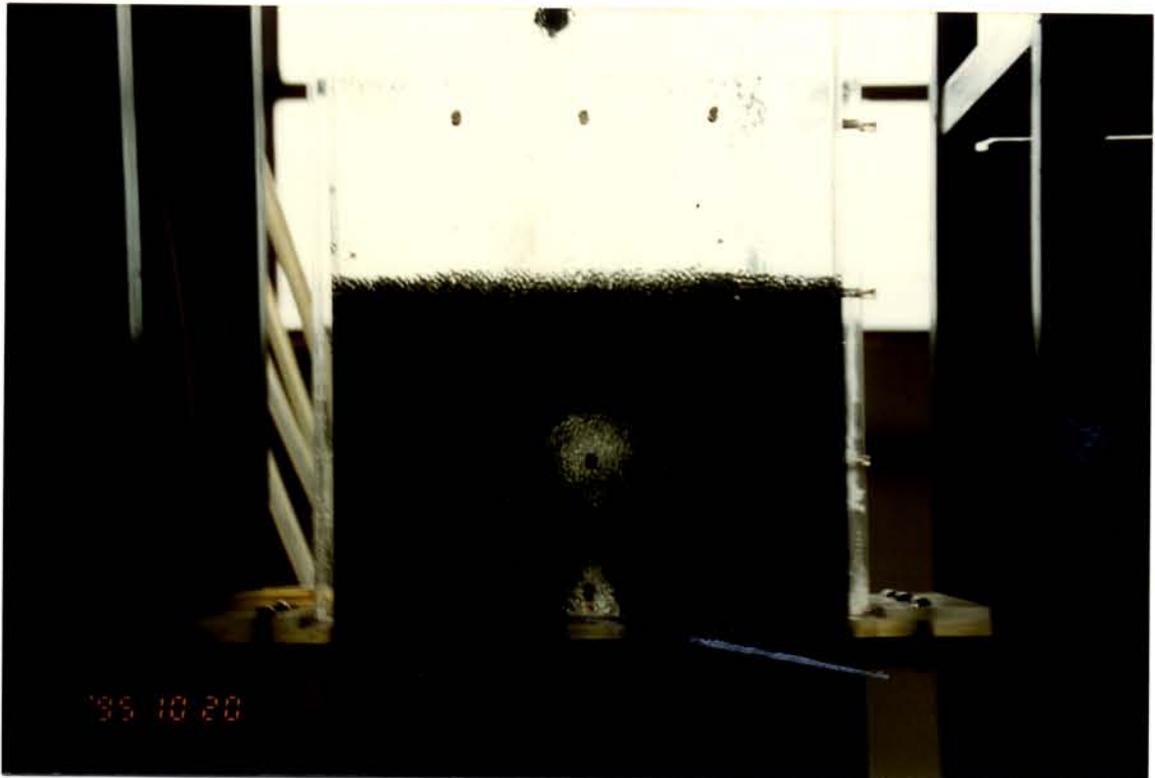


Figura 4.5 Jorro Convencional (Vazão no jorro = $2.33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,30 m / s)),
(Vazão Ânulo = $0 \text{ m}^3 / \text{s}$). Vista do canal do jorro.



Figura 4.6 Jorro Fluidizado (Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,30 m / s)),
(Vazão Ânulo = $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (0,92 m / s)).

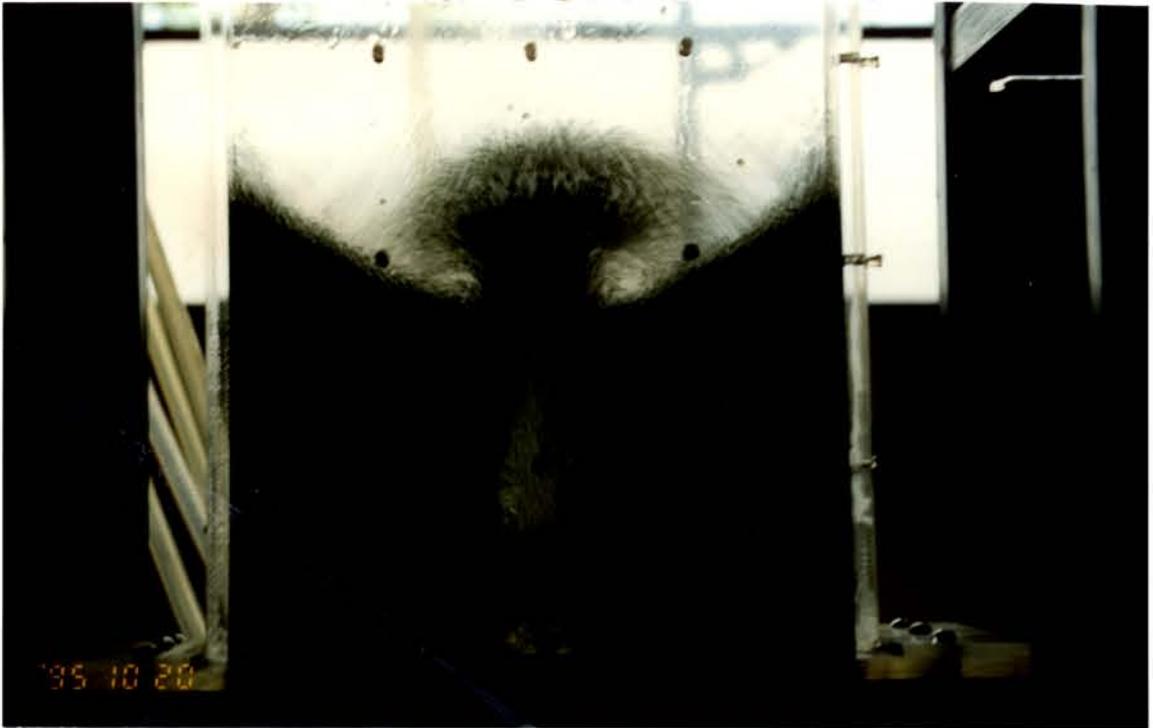


Figura 4.7 Jorro Fluidizado (Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,30 m / s)),
(Vazão Ânulo = $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (0,92 m / s)). Vista do canal do jorro.



Figura 4.8 Jato em Leito Fluidizado (Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, (9,30 m / s)),
(Vazão Ânulo = $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (1.67 m / s)).



Figura 4.9 Jato em Leito Fluidizado (Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, (9,30 m / s)),
(Vazão Ânulo = $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (1.67 m / s)), Vista do canal do jorro.

4.2 Queda de Pressão no Ânulo em Função da Vazão no Ânulo

4.2.1 Leito Fluidizado Convencional

Foi analisada em primeiro lugar a queda de pressão no ânulo em função da vazão do ânulo, sem a adição de vazão no jorro, ou seja estudou-se o comportamento do leito como se fosse um leito fluidizado padrão.

Observou-se nos experimentos que o tipo de fluidização apresentada em todos os casos foi do tipo agregada. A formação de bolhas ocorre devido à grande diferença na densidade da fase fluida e da fase densa (KUNII & LEVENSPIEL, 1969).

Calculou-se o número de Froude a fim de verificar a sua ordem de grandeza:

$$Fr_{mf} = \frac{(U_{mf})^2}{d_p \times g} = \frac{(1,67 \text{ m/s})^2}{3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 9,8 \text{ m/s}^2} = 72,2$$

* Utilizamos U_{mf} obtida experimentalmente com a altura de inertes de 17 cm

Utilizando-se a equação acima e chegamos a um valor para o número de Froude 72,2. Encontrou-se concordância com a literatura. O valor de 72,2 está bem acima do limite de 1,3 para a fluidização agregada encontrado por WILHELM & KWAIK (1948), citado por KUNII & LEVENSPIEL (1969).

Analisando os resultados obtidos para os experimentos com 17 e 22 cm de altura de inertes observar-se que o comportamento da queda de pressão no ânulo vs. vazão no ânulo foi típico de leitos fluidizados convencionais. Os experimentos foram reprodutíveis e apresenta-se nas figuras 4.10 e 4.11 um exemplo dos dados de queda de pressão no ânulo em função da vazão do ânulo crescente e decrescente. Em ambos os casos após um pico de queda de pressão, um pequeno acréscimo na vazão resulta em um decréscimo da queda de pressão no leito e este valor se torna estável (Figuras 4.10 e 4.11).

Na comparação dos resultados obtidos para leitos de alturas diferentes verifica-se que para alturas de leitos diferentes obtém-se velocidades mínimas de fluidização diferentes. (Figura 4.12)

Para o cálculo da velocidade mínima de fluidização é utilizado o valor de vazão na curva do decréscimo de vazão, a partir do qual ocorre mudança na queda de pressão do leito. Na figura 4.10, para um leito com altura de inertes igual a 17 cm, pode-se notar que começa a ocorrer queda na pressão do leito, durante o decréscimo

da vazão, para um valor menor que $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$. Tomando esta vazão de $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ e dividindo-se este valor pela área transversal do leito correspondente à fluidização ($0,0125 \text{ m}^2$), obtém-se a velocidade mínima de fluidização $U_{mf} = 1,64 \text{ m/s}$. Realizando o mesmo procedimento com a figura 4.11, para um leito com altura de inertes igual a 22 cm, encontra-se uma vazão mínima de fluidização igual à $2,60 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ que corresponde a uma velocidade de 2,08 m/s.

Os leitos com 17 cm e 22 cm de altura dos inertes fornecem diferentes valores para a velocidade mínima de fluidização. Em nosso caso, a velocidade mínima de fluidização é proporcional ao peso efetivo do leito.

LEWIS *et alii* (1949) estudaram leitos com diferentes diâmetros de coluna e chegaram a conclusão que a queda de pressão é proporcional ao peso do leito para equipamentos com H / D_c pequenos . Para os leitos com H / D_c grandes verifica-se um aumento considerável da queda de pressão e da velocidade mínima de fluidização, isto pode ser explicado pelo atrito das partículas com a parede ou efeitos estáticos.

No caso do equipamento bidimensional a dimensão característica é o comprimento do leito, que vale 0,3 m . O leito com altura de 17 cm possui uma massa de 6,41 kg e um H / L_1 igual a 0,57, o leito de altura 22 cm possui uma massa de 8,30 kg e um H / L_1 igual à 0,73, em ambos os casos o valor de H / L_1 é pequeno.

Podemos ainda notar que a massa aumentou de 6,41 kg para 8,30 kg (29 %) e a velocidade aumentou de 1,64 m/s para 2,08 m/s (27 %), verificando-se para estes dois pontos uma dependência praticamente linear da velocidade mínima de fluidização com a massa do leito.

Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo

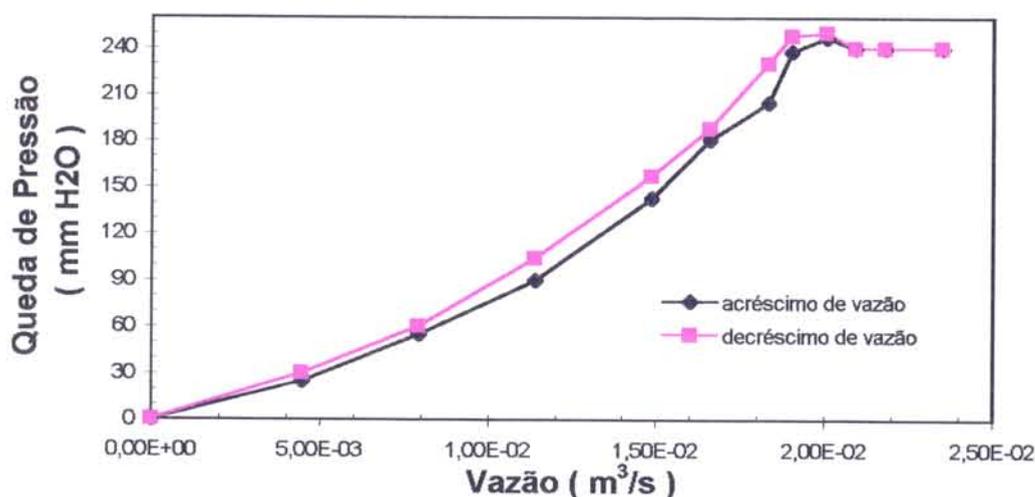


Figura 4.10 - Gráfico da Queda de Pressão no Ânulo vs. Vazão no Ânulo, altura fixa de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 cm.

Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo

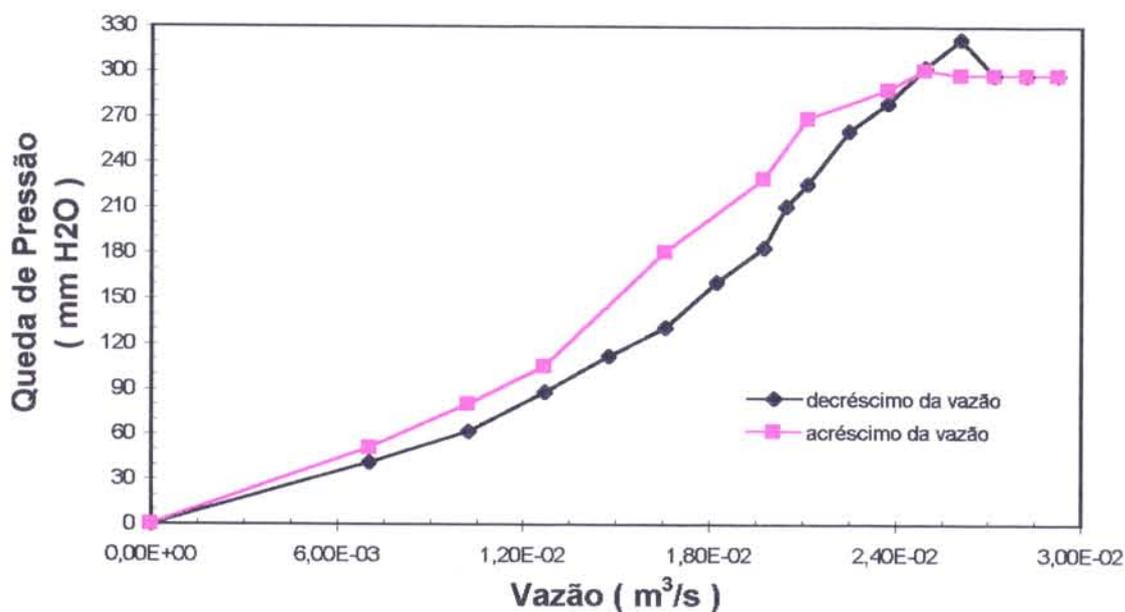


Figura 4.11- Gráfico da Queda de Pressão no Ânulo vs. Vazão no Ânulo, altura fixa de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 22 cm.

Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo

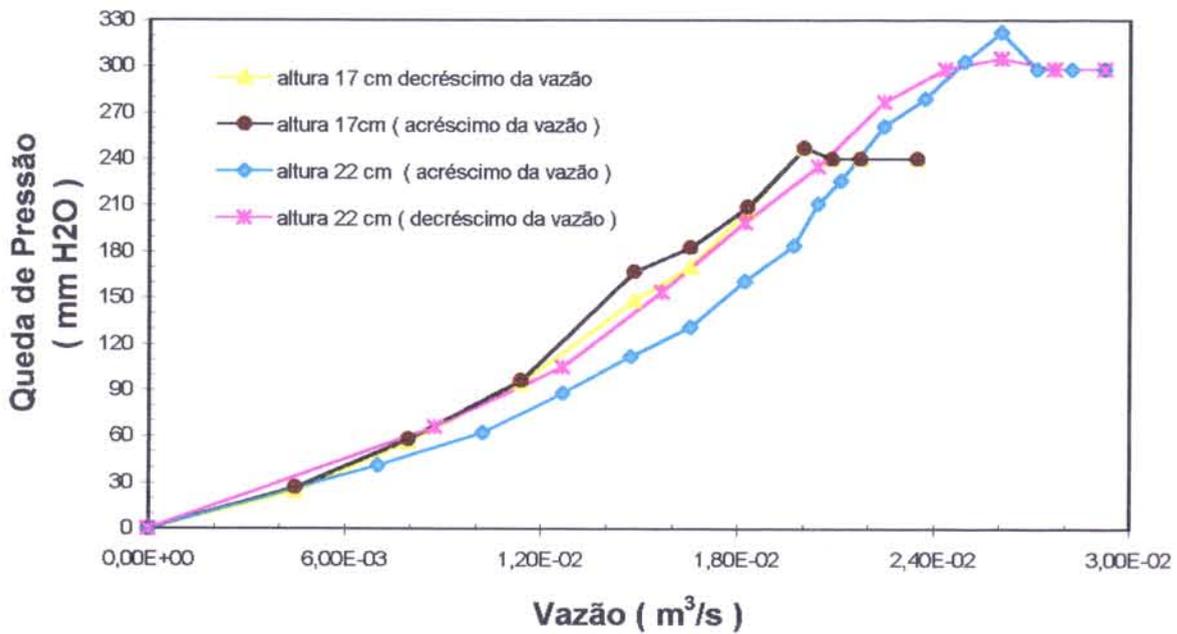


Figura 4.12 - Gráfico da Queda de Pressão no Ânulo vs. Vazão no Ânulo e altura de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 e 22 cm

4.2.2 Leito Fluidizado com Vazão Adicional no Jorro

Será avaliada agora a queda de pressão no ânulo em função da vazão no ânulo com uma vazão auxiliar no jorro. Este estudo foi executado para o leito com altura de inertes de 17 cm e de 22 cm. Em ambos os casos, utiliza-se as seguintes vazões auxiliares no jorro: $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($7,6 \text{ m/s}$); $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($8,5 \text{ m/s}$); e $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($9,3 \text{ m/s}$). O valor de $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, corresponde à vazão mínima de jorro para o sistema com 17 cm de altura dos inertes, e a vazão de $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, corresponde à vazão mínima de jorro para um leito com 22 cm de altura dos inertes. Para as 3 vazões diferentes no jorro e com a vazão no ânulo variando de zero até a fluidização, o comportamento dos experimentos foi semelhante.

Para a execução dos experimentos a vazão do jorro foi acrescida até o valor determinado. A vazão no ânulo foi acrescida em passos, anotando a cada uma delas a respectiva queda de pressão no leito. Após atingir a fluidização diminuí-se a vazão em etapas até zero, registra-se para cada fase a nova queda de pressão. Os valores de queda de pressão foram obtidos pela diferença entre as pressões na base do ânulo e no topo do leito. Grificando-se os valores de queda de pressão do leito vs. a vazão no ânulo obteve-se as figuras 4.13 e 4.14.

Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo com e sem Vazão no Jorro

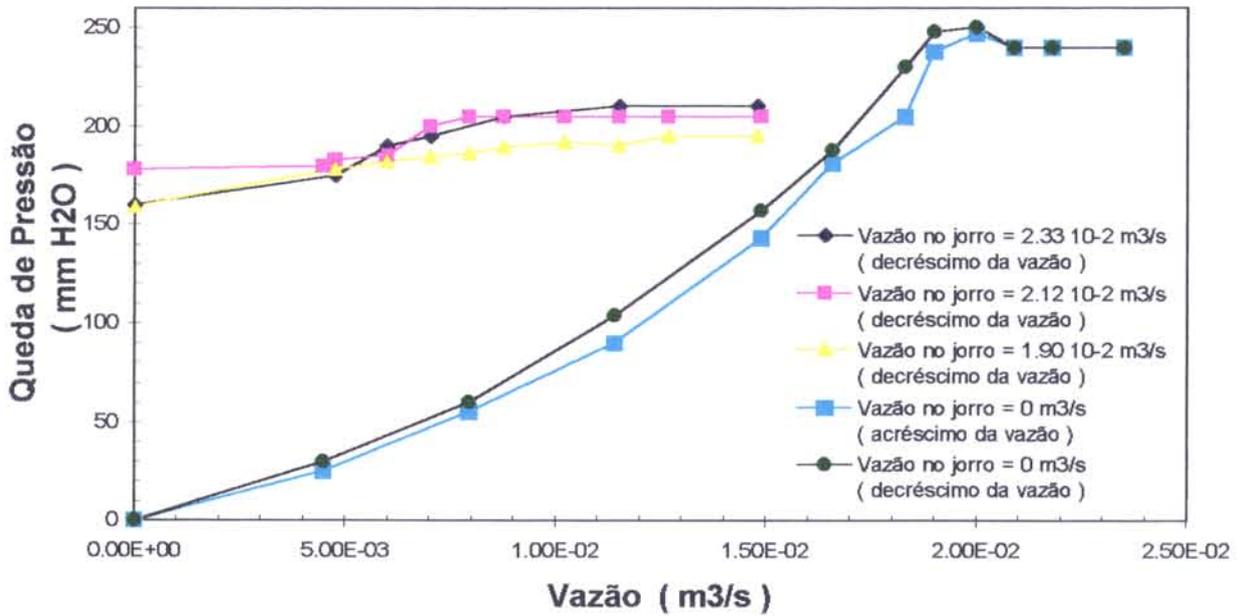


Figura 4.13 Queda de pressão no ânulo vs. vazão no ânulo com e sem vazão auxiliar no jorro - altura do leito dos inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 cm

Queda de Pressão no Ânulo vs Vazão no Ânulo com e sem Vazão Auxiliar no Jorro

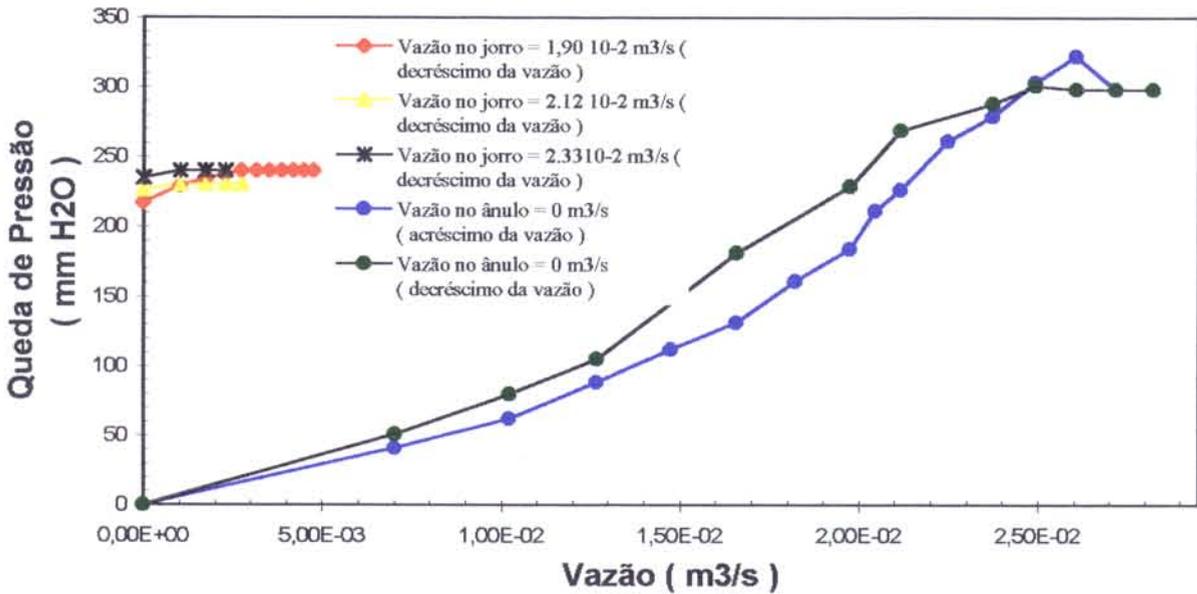


Figura 4.14 Queda de pressão no ânulo vs. vazão no ânulo com e sem vazão auxiliar no jorro - altura do leito dos inertes, (esferas de vidro $d_p 3,8$ mm), de 22 cm.

Nos dois sistemas (com 17 e 22 cm de altura dos inertes), existe uma dependência entre o valor da vazão necessária para fluidizar o ânulo inteiro e a vazão que parte do jorro para a base do leito. Em ambos os casos a vazão foi acrescida em etapas e a fluidização ocorreu primeiro no topo e depois na base.

Analisando as figuras 4.13 e 4.14, percebe-se que a vazão necessária para promover a fluidização do leito com a adição da vazão no jorro é muito mais baixa do que o valor necessário sem a vazão suplementar no jorro.

Na tabela 4.1 e 4.2 apresentam-se os valores das vazões e velocidades mínimas de fluidização nos casos estudados.

Tabela 4.1 Vazões e Velocidades mínimas de fluidização para um leito com altura de inertes igual à 17 cm

Obs. : Vazão mínima de jorro = $1.90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (7.6 m/s)

Experi- mento	Vazão (Velocidade) média na entrada do Jorro (m^3/s)	Vazão (Velocidade) média na entrada do Ânulo necessária para obter a mínima fluidização (m^3/s)	Vazão (Velocidade) média total na entrada do Leito necessária para obter a mínima fluidização (m^3/s)
1	0 (0 m/s)	$2,05 \cdot 10^{-2}$ (1,64 m/s)	$2,05 \cdot 10^{-2}$ (1,64 m/s)
2	$1,90 \cdot 10^{-2}$ (7,6 m/s)	$8 \cdot 10^{-3}$ (0,64 m/s)	$2,7 \cdot 10^{-2}$ (1,8 m/s)
3	$2,12 \cdot 10^{-2}$ (8,48 m/s)	$8 \cdot 10^{-3}$ (0,64 m/s)	$2,92 \cdot 10^{-2}$ (1,95 m/s)
4	$2,33 \cdot 10^{-2}$ (9,32 m/s)	$8 \cdot 10^{-3}$ (0,64 m/s)	$3,13 \cdot 10^{-2}$ (2,09 m/s)

Tabela 4.2 Vazões e Velocidades mínimas de fluidização para um leito com altura de inertes igual à 22 cm

Obs. : Vazão mínima de jorro = $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (8,48 m/s)

Experi- mento	Vazão (Velocidade) média na entrada do Jorro (m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média na entrada do Ânulo necessária para obter a mínima fluidização(m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média total na entrada do Leito necessária para obter a mínima fluidização (m^3 / s)
1	0 (0 m/s)	$2,60 \cdot 10^{-2}$ (2,08 m/s)	$2,60 \cdot 10^{-2}$ (2,08 m/s)
2	$1,90 \cdot 10^{-2}$ (7,6 m/s)	$2,8 \cdot 10^{-3}$ (0,22 m/s)	$2,18 \cdot 10^{-2}$ (1,45 m/s)
3	$2,12 \cdot 10^{-2}$ (8,48 m/s)	$1 \cdot 10^{-3}$ (0,08 m/s)	$2,22 \cdot 10^{-2}$ (1,48 m/s)
4	$2,33 \cdot 10^{-2}$ (9,32 m/s)	$1 \cdot 10^{-3}$ (0,08 m/s)	$2,43 \cdot 10^{-2}$ (1,62 m/s)

A vazão mínima de fluidização é constante para leitos onde a vazão no jorro é maior ou igual à vazão mínima de jorro. Isto é explicado pelo fato de que com vazões no jorro maiores que a mínima de jorro, o excesso de ar introduzido no ânulo passa através do jorro, não afetando portanto a vazão mínima de fluidização (THORELY *et alli* , 1959).

A vazão total no leito com altura dos inertes igual a 17 cm, foi sempre maior que a vazão mínima de fluidização do leito fluidizado puro. É possível observar pela tabela 4.1 que quanto maior a vazão no jorro maior é a vazão total do sistema.

Já para o caso do leito com altura dos inertes igual a 22 cm, obteve-se um comportamento diverso, a vazão total do sistema foi sempre menor que a vazão mínima de fluidização. Provavelmente no leito de 22 cm o efeito de H / L_1 pequeno é minimizado pela adição da vazão no jorro, promovendo a fluidização no leito com vazões totais mais baixas que no caso do leito fluidizado convencional.

Comparando-se as figuras 4.13 e 4.14, percebe-se ainda que para uma mesma vazão no jorro um leito mais profundo necessita de uma menor vazão no ânulo para fluidizá-lo completamente. No caso do leito com altura de 22 cm ,observa-se que para uma vazão no jorro maior que $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão mínima de jorro), o ânulo encontra-se praticamente fluidizado antes mesmo da adição de qualquer vazão no ânulo. Isto ocorre porque com o acréscimo da altura do leito uma porção maior do fluido passa do jorro para o ânulo requerendo uma menor vazão para fluidizá-lo.

4.3 Queda de Pressão no Jorro em Função da Vazão no Jorro

4.3.1 Leito de Jorro Convencional

Estudou-se o leito atuando como um jorro puro ou jorro padrão. A vazão do jorro foi acrescida aos poucos, após a estabilização medimos a queda de pressão no leito. O procedimento foi executado até a obtenção do jorro estável. Após a obtenção do jorro a vazão foi diminuída em passos até zero. As medidas de queda de pressão foram obtidas pela diferença entre os valores na entrada do jorro e no topo do leito. A queda de pressão no leito, medida da entrada do jorro ao topo do leito e da entrada do ânulo ao topo do leito não são a mesma devido ao gradiente radial de pressão perto da base distribuidora, (GRBAVIIC *et alli*, 1976). O nível dos líquidos dos manômetros flutuava quando bolhas de ar movimentam-se pelo leito, e a média dos valores lidos foi tomada para calcular a pressão no leito e a sua velocidade. A pressão no leito desta maneira obtida dá uma idéia qualitativa aproximada com respeito a distribuição do fluxo.

Analisando os resultados obtidos para os experimentos com 17 e 22 cm de altura de inertes observa-se que o comportamento da queda de pressão no jorro vs. vazão no jorro descreveu o mesmo comportamento que nos jorros convencionais em coluna cilíndrica. Inicialmente, com pequenas vazões, o gás apenas percola entre as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento do fluxo, surge nas proximidades do orifício de entrada do gás, uma cavidade devido à ação do jato que já é suficiente para deslocar algumas partículas. Esta cavidade vai se alongando dando origem ao jorro interno, sempre com um aumento de perda de pressão até um pico. Um incremento na vazão após este estágio ocasiona uma queda brusca de pressão e neste instante o jorro aflora na superfície. Neste ponto a perda de pressão torna-se constante e um aumento no fluxo do gás acarreta somente elevação da fonte.

No processo inverso, com a redução no fluxo do gás, o jorro mantém-se estável até o ponto correspondente ao jorro mínimo. No jorro mínimo temos a menor vazão de gás com que se pode obter o jorro estável. A partir daí a queda de pressão decresce à medida que se processa a redução da vazão de gás. Definiu-se como vazão mínima de jorro a vazão na qual um pequeno decréscimo de seu valor ocasiona o colapso do jorro (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

A queda de pressão no processo inverso não apresentou um pico acentuado como durante o acréscimo da vazão, porque a perda de carga é devida somente à interação gás-sólido, não havendo mais a ação de ruptura do jorro através do leito. A diminuição da vazão a partir do jorro mínimo produziu redução na queda de pressão do leito, ocasionando uma pequena histerese entre os valores.

Mais uma vez os experimentos foram reprodutíveis e os valores de queda de pressão no jorro em função da vazão no jorro para um leito com altura de inertes de 17 e 22 cm foram colocados na forma de gráfico (figura 4.15 e 4.16).

Para o cálculo da velocidade mínima de jorro, toma-se o valor de vazão na curva do decréscimo a partir do qual ocorre mudança na queda de pressão do leito. Na figura 4.15, para um leito com altura de inertes igual a 17 cm, pode-se notar que começa a ocorrer queda na pressão do leito, durante o decréscimo da vazão, para um valor menor que $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$. A vazão de $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ dividida pela área transversal do leito correspondente ao jorro, ($0,025 \text{ m}^2$), fornece a velocidade mínima de jorro ($7,6 \text{ m/s}$). Realizando-se o mesmo procedimento com a figura 4.16, para um leito com altura de inertes de 22 cm, encontra-se uma vazão mínima de jorro igual a $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ que corresponde a uma velocidade de $8,48 \text{ m/s}$.

Diferentes valores para a velocidade mínima de jorro foram obtidas para leitos com alturas diferentes, (figura 4.17). Neste caso, a vazão mínima de jorro não é função linear da massa de inertes do leito. Para um aumento na altura do leito de 17 cm para 22 cm, que corresponde a um aumento na massa leito de 6,41 kg para 8,30 kg (29 %), a vazão mínima de jorro aumentou de 7,6 para 8,48 m/s um aumento de 11 %.

Quando observamos a figura 4.17, observa-se que o leito mais profundo produz picos de queda de pressão maiores e também este leito apresenta uma queda de pressão maior no leito após o estabelecimento do jorro. Isto é bastante lógico, uma vez que ambas as grandezas (picos de queda de pressão e queda de pressão no leito) dependem da quantidade de partículas do leito.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro

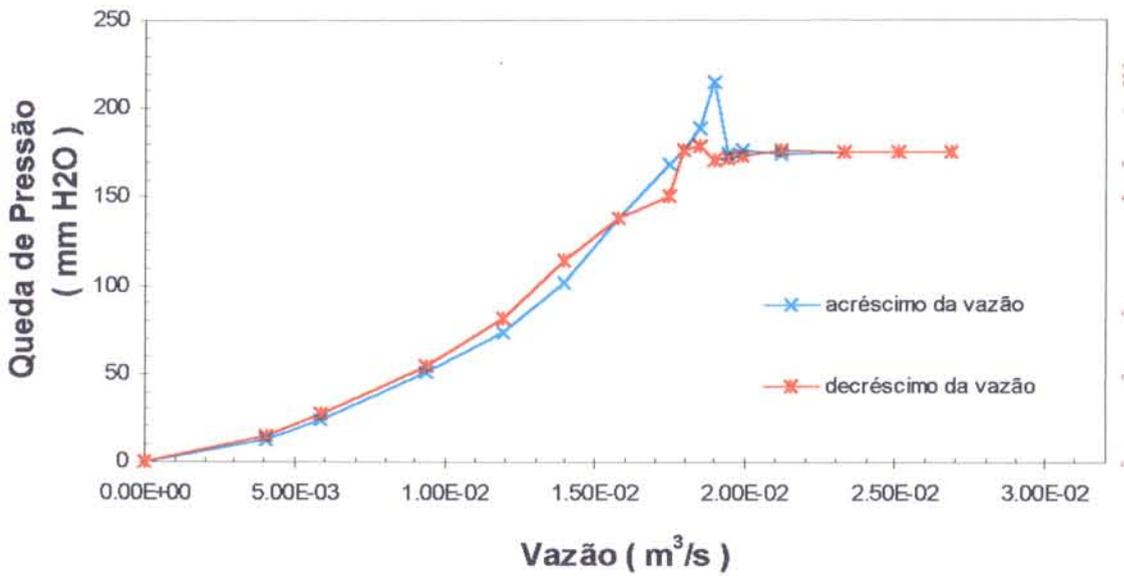


Figura 4.15 - Gráfico da Queda de Pressão no Jorro vs. Vazão no Jorro. Altura fixa de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 cm.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro

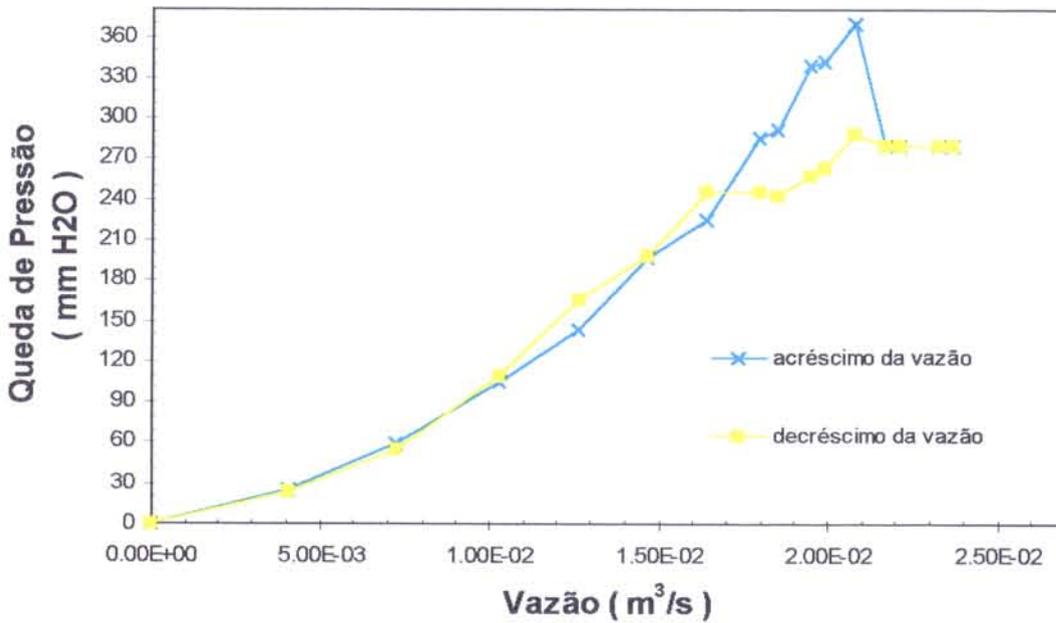


Figura 4.16 - Gráfico da Queda de Pressão no Jorro vs. Vazão no Jorro. Altura fixa de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 22 cm.

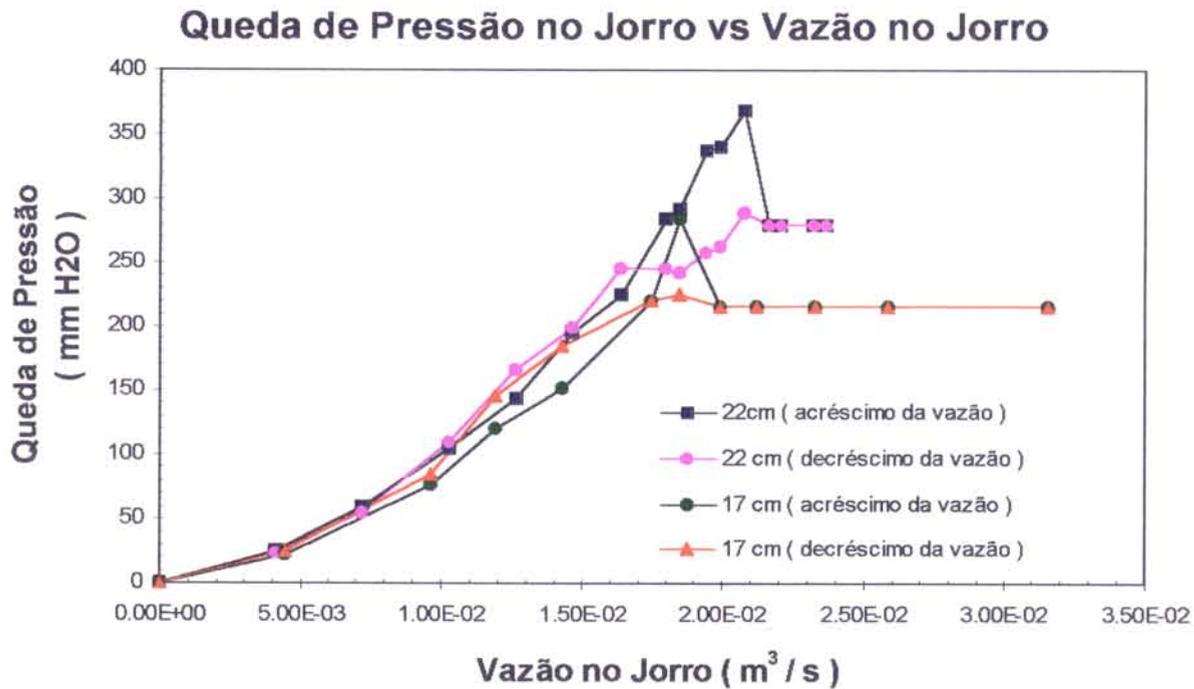


Figura 4.17 - Gráfico da Queda de Pressão no Jorro vs. Vazão no Jorro . Altura fixa de inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 e 22 cm.

4.3.2 Leito de Jorro com Vazão Adicional no Ânulo

As alturas de inertes foram as mesmas utilizadas nos experimentos anteriores e analisou-se a queda de pressão no jorro em função da vazão no jorro com uma vazão auxiliar no ânulo. Para o leito de 17 cm de altura utilizou-se uma vazão auxiliar no ânulo igual a vazão mínima de fluidização para este leito, ($2,05 m^3 / s$ correspondendo a $1,64 m / s$). Para o caso de um leito com 22 cm de altura utilizou-se as seguintes vazões auxiliares: $1,66 \cdot 10^{-2} m^3 / s$ ($1,33 m / s$); $2,05 \cdot 10^{-2} m^3 / s$ ($1,64 m / s$); $2,37 \cdot 10^{-2} m^3 / s$ ($1,90 m / s$). Todas estas vazões estão abaixo da vazão mínima de fluidização. O comportamento dos experimentos foi semelhante para as 3 vazões diferentes no ânulo variando-se a vazão no jorro de zero até o jorro estável.

Para a execução dos experimentos a vazão do ânulo foi acrescida até o valor determinado. Aos poucos aumentou-se a vazão no jorro, anotando a respectiva queda de pressão no leito. Após atingir o jorro estabilizado diminuiu-se a vazão em etapas até zero, registrando para cada fase a nova queda de pressão. Os valores de queda de pressão foram obtidos pela diferença entre as pressões na base do jorro e no topo do leito. Graficando os valores de queda de pressão do leito vs. a vazão no ânulo obtém-se as figuras 4.18 e 4.19.

Analisando as figuras 4.18 e 4.19 verifica-se que as vazões mínimas de jorro e a vazão total de cada sistema é diferente em cada caso. Nas tabelas 4.3. e 4.4 nota-se os valores das vazões e das velocidades mínimas de jorro nos casos estudados.

Tabela 4.18 Vazões e Velocidades mínimas de jorro para um leito com altura de inertes de à 17 cm

Obs. : Vazão mínima de fluidização = $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (1,64m/s)

Experi- mento	Vazão (Velocidade) média na entrada do Ânulo (m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média na entrada do Jorro necessária para obter o mínimo jorro (m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média total na entrada do Leito necessária para obter o mínimo jorro (m^3 / s)
1	0 (0 m/s)	$1,90 \cdot 10^{-2}$ (7,60 m/s)	$1,90 \cdot 10^{-2}$
2	$2,05 \cdot 10^{-2}$ (1,64 m/s)	$5,87 \cdot 10^{-3}$ (2,34m/s)	$2,64 \cdot 10^{-2}$

Tabela 4.4 Vazões e Velocidades mínimas de fluidização para um leito com altura de inertes de 22 cm

Obs. : Vazão mínima de fluidização = $2,60 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (2,08 m / s)

Experi- mento	Vazão (Velocidade) média na entrada do Ânulo (m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média na entrada do Jorro necessária para obter o mínimo jorro(m^3 / s)	Vazão (Velocidade) média total na entrada do Leito necessária para obter o mínimo jorro (m^3 / s)
1	0 (0 m/s)	$2,12 \cdot 10^{-2}$ (8,48 m/s)	$2,12 \cdot 10^{-2}$
2	$1,66 \cdot 10^{-2}$ (1,33 m/s)	$7,3 \cdot 10^{-3}$ (2,92 m/s)	$2,39 \cdot 10^{-2}$
3	$2,05 \cdot 10^{-2}$ (1,64 m/s)	$4,7 \cdot 10^{-3}$ (1,88 m/s)	$2,52 \cdot 10^{-2}$
4	$2,37 \cdot 10^{-2}$ (1,90m/s)	$2,3 \cdot 10^{-3}$ (0,92 m/s)	$2,60 \cdot 10^{-2}$

HE *et alii* (1992) observaram em uma coluna de 0,91m de diâmetro que a vazão total do jorro com aeração sempre excedia a vazão mínima de jorro. Houve concordância com os dados da literatura pois para as duas alturas do leito a vazão total no sistema foi maior que a respectiva vazão de mínimo jorro puro. Nota-se na tabela 4.4 que para o leito com 22 cm de altura onde trabalhamos com 3 vazões diferentes no ânulo, que quanto maior a vazão no ânulo menor a vazão mínima de jorro e maior a vazão total no sistema.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro com e sem Vazão no Ânulo

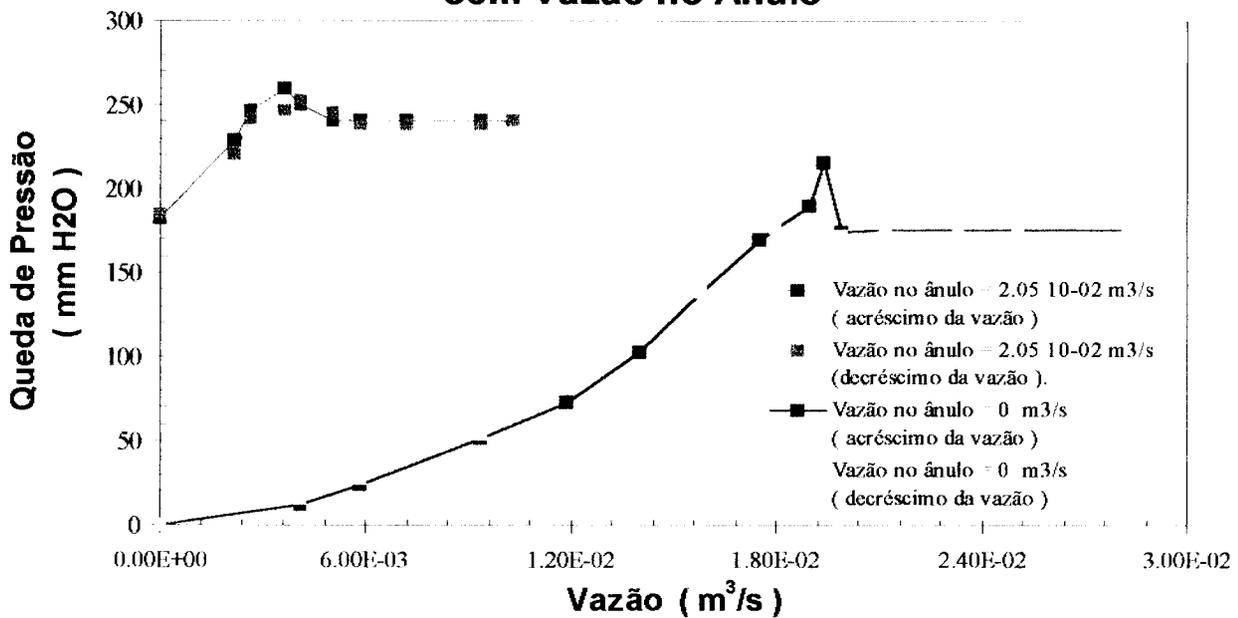


Figura 4.18 - Queda de Pressão no Jorro com e sem vazão auxiliar no ânulo. Altura do leito dos inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 17 cm.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro com e sem Vazão no Ânulo

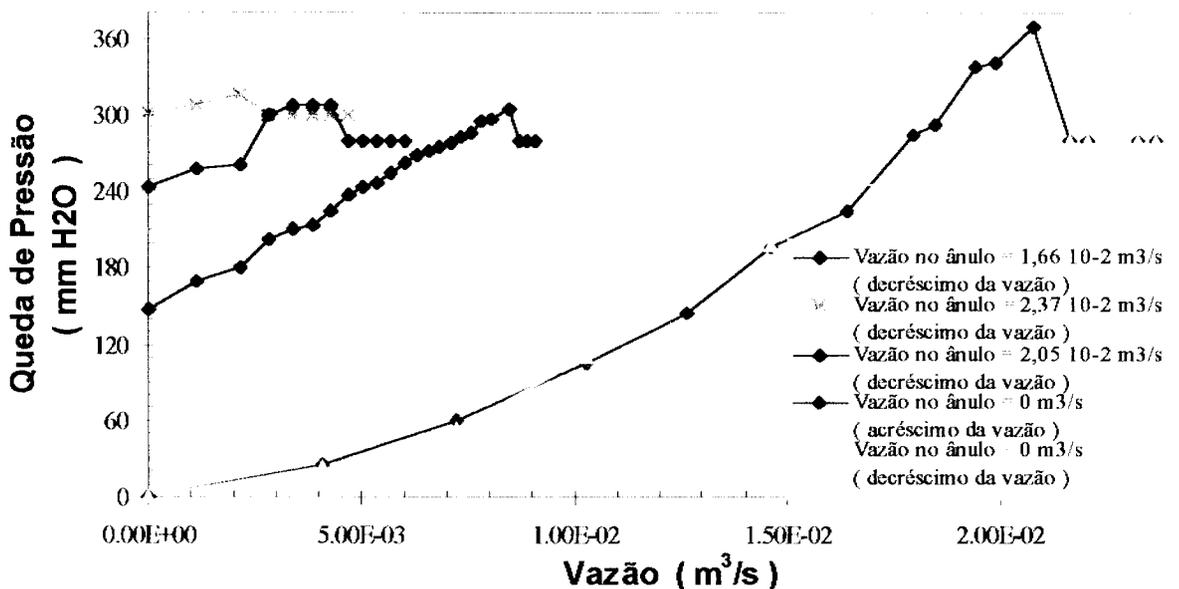


Figura 4.19 - Queda de Pressão no Jorro com e sem vazão auxiliar no ânulo. Altura do leito dos inertes, (esferas de vidro $d_p = 3,8$ mm), de 22 cm.

Observando a figuras 4.18 e 4.19, percebe-se que para o leito menos profundo o pico e o patamar de queda de pressão são maiores no jorro com vazão suplementar no ânulo do que no jorro convencional, isto indica uma maior porcentagem de leito suspenso para o primeiro caso.

No leito com 22 cm de altura o pico de queda de pressão do jorro convencional foi bem maior que os picos do jorro fluidizado. Para valores menores que o vazão mínima de fluidização $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}$ (1,33 m/s); e $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}$ (1,64 m/s); o patamar da queda de pressão foi o mesmo obtido no jorro puro. A vazão no ânulo neste caso contribuiu para a diminuição do pico de queda de pressão e pouco afetou a porcentagem de leito suspenso. A vazão de $2,37 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}$, (1,90 m/s); bem mais próxima da vazão mínima de fluidização, forneceu o mesmo valor do pico de queda de pressão que os outros leitos com vazão suplementar, porém o patamar de queda de pressão após estabelecido o jorro foi maior. Portanto neste caso uma maior porcentagem de leito suspenso foi obtida e espera-se que esta porcentagem aumente no caso de se utilizar o valor da vazão mínima de fluidização $2,60 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (2,08 m/s) na aeração complementar no ânulo.

4.4 Perfil de Pressão no Leito Seco

Os perfis de pressão do leito foram obtidos através do uso de uma sonda, utilizou-se as duas alturas do leito já citadas nos experimentos anteriores (17 e 22 cm). Trabalhou-se com diferentes vazões no jorro e no ânulo e os valores encontrados para a pressão encontram-se nas páginas 70 a 77.

Os perfis de pressão foram determinados em meio leito, onde a posição longitudinal igual à zero está localizada no centro do jorro. O leito se expande bastante durante o jorro e desta forma é possível obter valores de pressão a 20 cm de altura para o leito com apenas 17 cm de altura de inertes em repouso.

De uma maneira geral o perfil longitudinal mostrou uma uniformidade de pressão no topo do leito e na base verificou-se um decréscimo da pressão a medida que aumentamos a distância radial.

A adição de uma vazão auxiliar promoveu uma distribuição mais uniforme da pressão radialmente. O gradiente de pressão na direção vertical foi substancialmente mais alto que o sem aeração suplementar.

Observou-se em alguns casos, que para leitos de 22 cm de profundidade e com alturas maiores que a altura de metade do leito, ($z / H > 0,5$), existe uniformidade de pressão longitudinal. (THORLEY *et alli* , 1959).

Analisando cada caso separadamente pode-se ter uma melhor compreensão dos fatos.

4.4.1 Jorro puro (17 cm altura)

Nas condições de mínimo jorro (vazão no jorro de $1,90 \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)), o gradiente de pressão formado no interior do leito é maior que o obtido com maiores vazões no jorro. Nas demais vazões, após estabelecido o jorro, o perfil de pressão não mudou significativamente. À medida que aumentou-se a vazão no jorro ocorre apenas um pequeno decréscimo nos valores absolutos.

De maneira geral o perfil longitudinal mostra uniformidade de pressão no topo e a base apresenta um decréscimo de pressão a medida que aumenta a distância longitudinal.

4.4.2 Jorro fluidizado (17 cm de altura)

O perfil de pressão não foi fortemente alterado quando a vazão no ânulo é fixa e a vazão no jorro variável.

A adição de uma vazão auxiliar promoveu uma distribuição de pressão mais uniforme na base do leito. O gradiente de pressão na direção vertical foi substancialmente mais alto que o sem aeração. Esta adição da vazão auxiliar promoveu um aumento do gradiente de pressão vertical e longitudinal, quando comparado com o leito sem nenhuma aeração suplementar. O aumento da vazão auxiliar acarretou um aumento global dos valores encontrados para a pressão ao longo do leito.

Quando os valores de vazão no ânulo foram maiores que $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, observou-se uma zona de baixa pressão na região central do ânulo, ($7,5 \text{ cm}$ do centro). Provavelmente esta zona ocorre devido a uma má distribuição do ar através da placa perfurada. Apesar do cuidado, na construção do secador, de se utilizar uma placa distribuidora simétrica, parece existir um escoamento preferencial pela parte central da placa, quando utiliza-se vazões elevadas. Quando utilizou-se vazões no ânulo mais baixas ($1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ - $0,92 \text{ m} / \text{s}$), tal fato não ocorreu.

4.4.3 Jorro puro (22 cm de altura)

O valor da vazão no jorro abaixo da mínima vazão do jorro, promoveu o maior gradiente de pressão observado. Com o aumento da vazão, uma diminuição no valor absoluto das pressões ao longo do leito é percebido. Para a vazão de $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$

(10,75 m/s), observou-se que para alturas maiores que a altura de metade do leito, ($z / H > 0,5$), o gradiente de pressão é nulo na direção radial. (THORLEY *et alli* , 1959)

4.4.4 Jorro fluidizado (22 cm de altura)

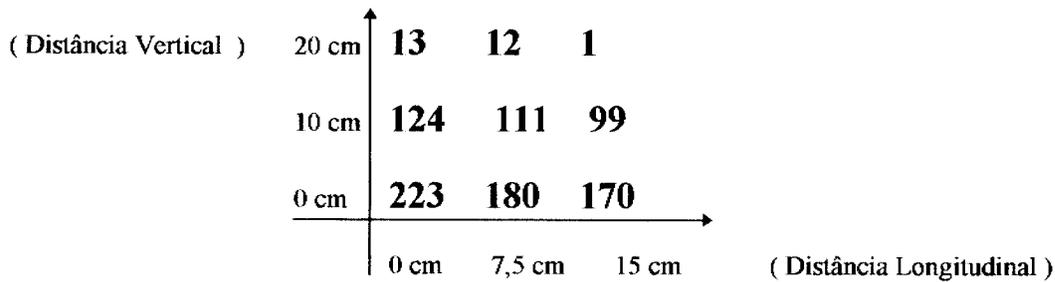
Para a vazão no ânulo fixa e a vazão no jorro variável, observou-se que os valores de pressão são aproximadamente constantes. Quando adiciona-se a vazão auxiliar consegue-se um perfil de pressão longitudinal mais uniforme.

Um pequeno acréscimo na vazão auxiliar no ânulo no valor de $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, (0,92 m/s), ocasionou um gradiente de pressão na base mais uniforme . Obtivemos uniformidade na pressão longitudinal para $z / H > 0,5$ quando a vazão no jorro era de $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, (7, 60 m/s). O aumento da vazão auxiliar para $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$, (1,33 m/s), gerou uniformidade da pressão longitudinal para $z / H > 0,5$ utilizando-se o valor da vazão no jorro de $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (7, 60 m/s). Mais uma vez o alto valor de vazão auxiliar promoveu uma zona de baixa pressão na região central do ânulo, (7,5 cm do centro).

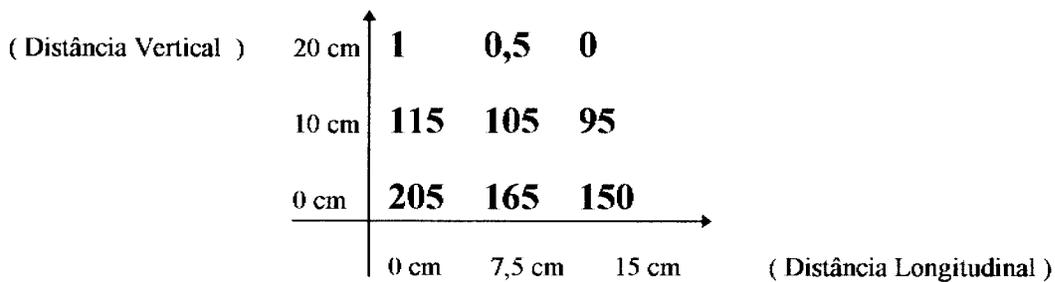
Distribuição de Pressão Manométrica no Leito (mm H₂O)
 (Altura do leito dos inertes 17 cm)

Jorro Puro (Sem adição de vazão no ânulo)

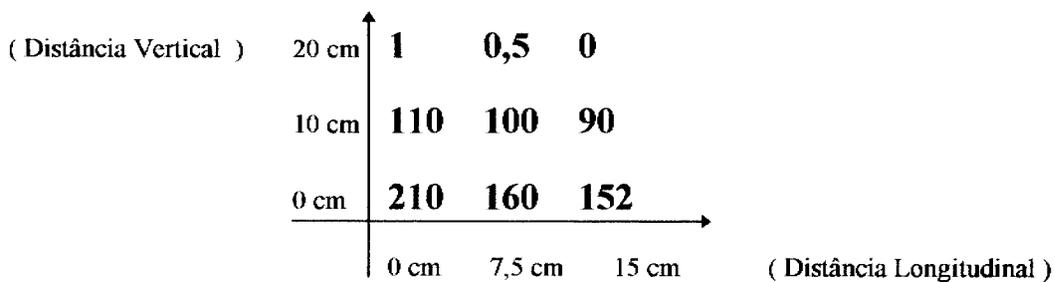
Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (7,60 m / s)



Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,32 m / s)

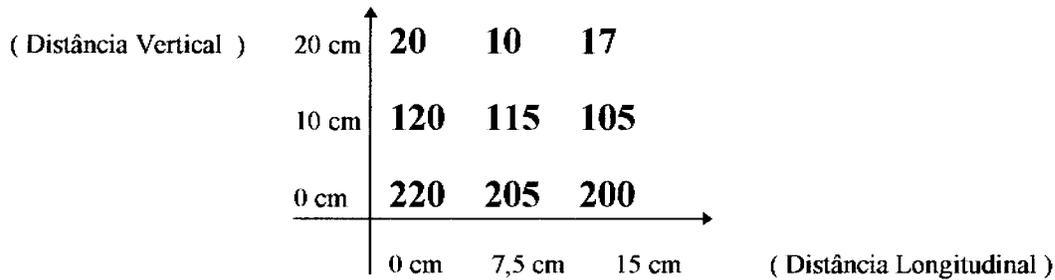


Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (10,76 m / s)

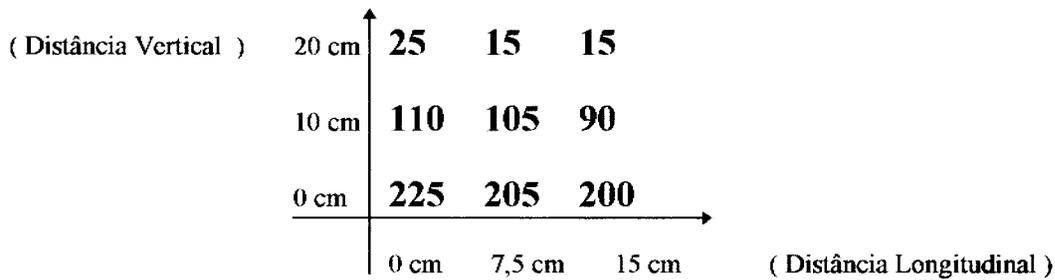


Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 0,92 \text{ m} / \text{s}$)

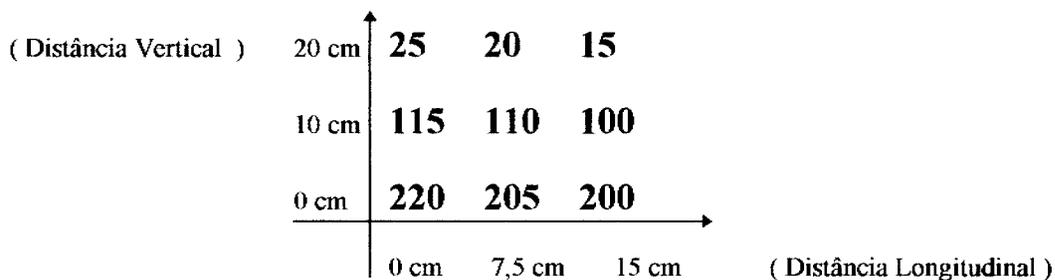
Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)

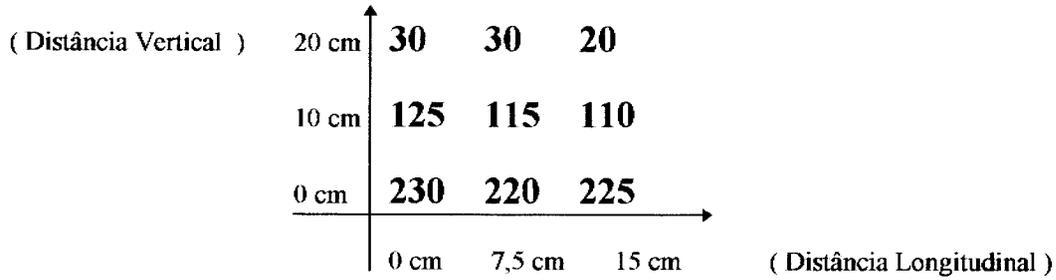


Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,76 \text{ m} / \text{s}$)

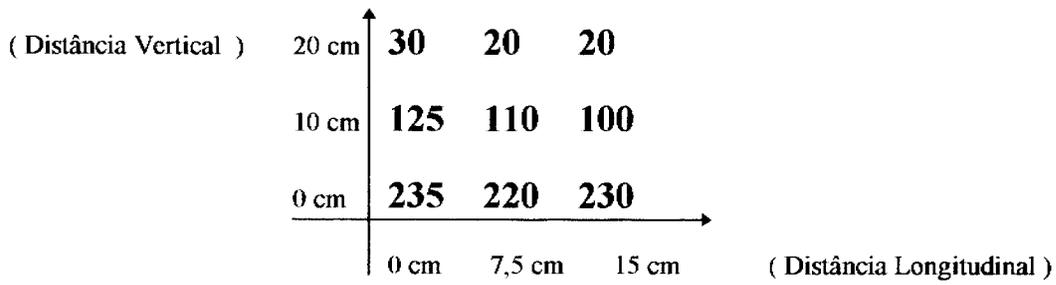


Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 1.33 \text{ m} / \text{s}$)

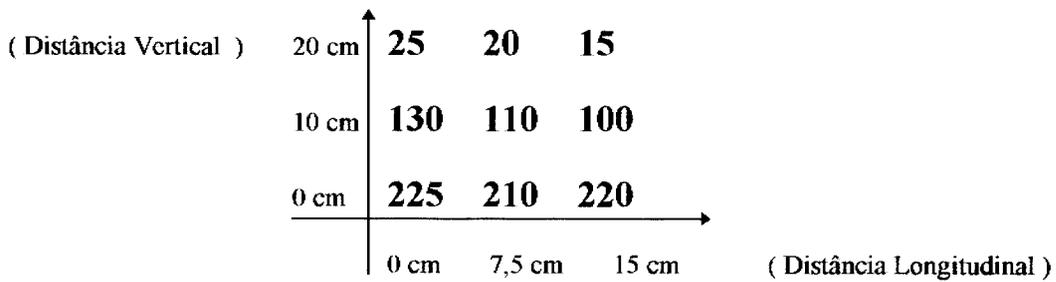
Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)

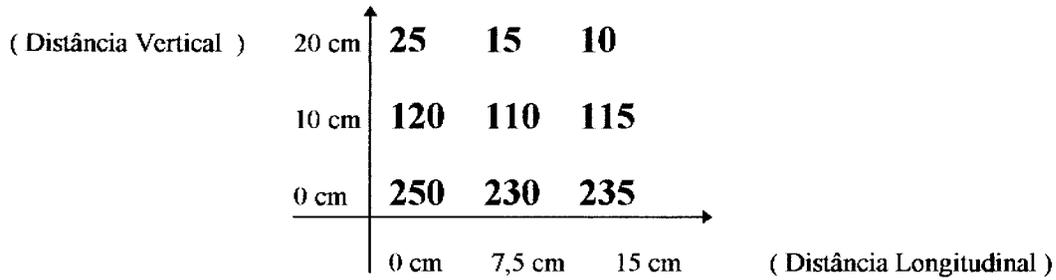


Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,76 \text{ m} / \text{s}$)

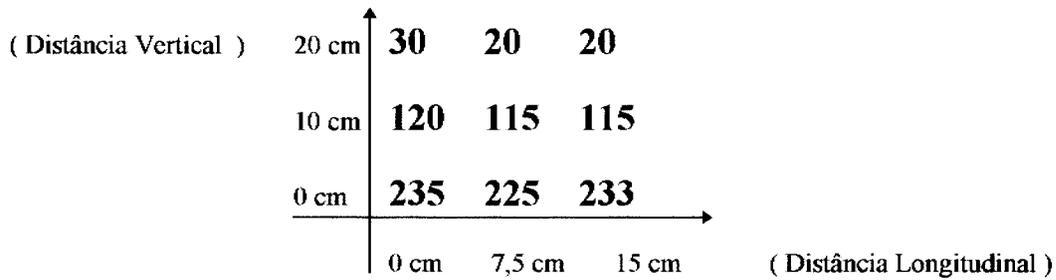


Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 1,64 \text{ m} / \text{s}$)

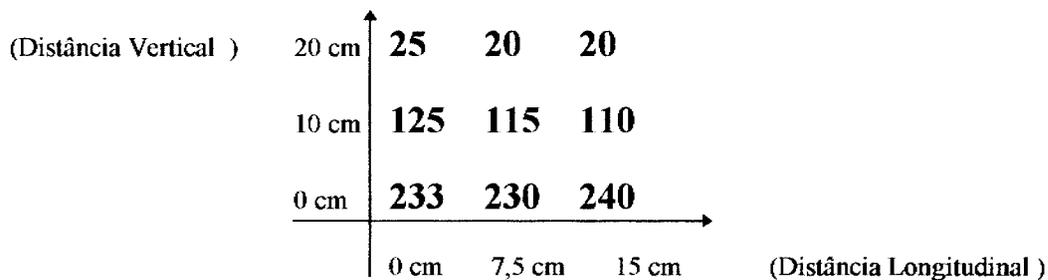
Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,76 \text{ m} / \text{s}$)



Distribuição de Pressão Manométrica no Leito (mm H₂O)
 (Altura do leito dos inertes 22 cm)

Jorro Puro (Sem adição de vazão no ânulo)

Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (7,60 m / s)

(Distância Vertical)	22 cm	0	0	0	
	20 cm	40	37	31	
	10 cm	176	161	151	
	0 cm	315	248	231	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (9,32 m / s)

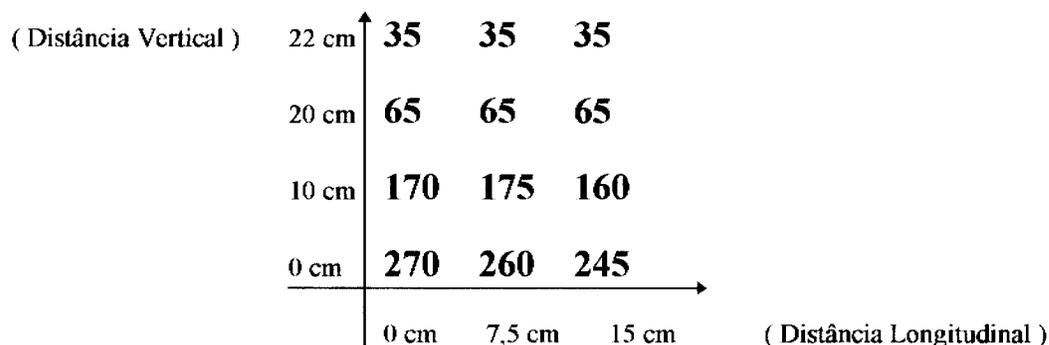
(Distância Vertical)	22 cm	30	30	24	
	20 cm	90	63	50	
	10 cm	190	180	170	
	0 cm	285	230	220	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ (10,76 m / s)

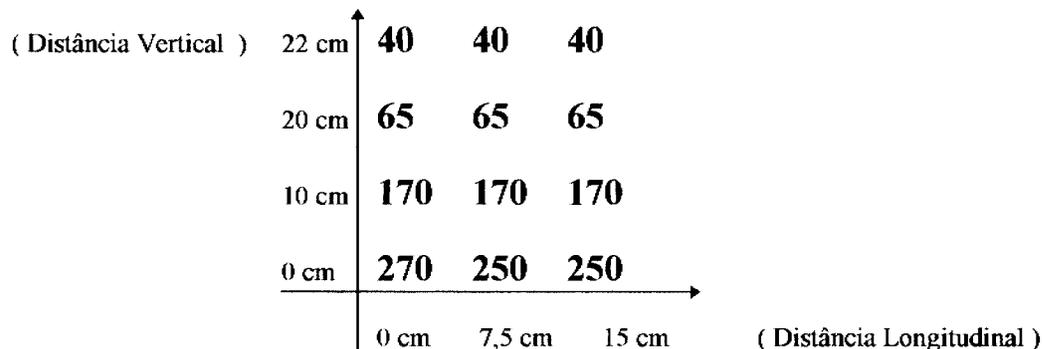
(Distância Vertical)	22 cm	30	30	30	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	180	160	145	
	0 cm	260	220	215	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 0,92 \text{ m} / \text{s}$)

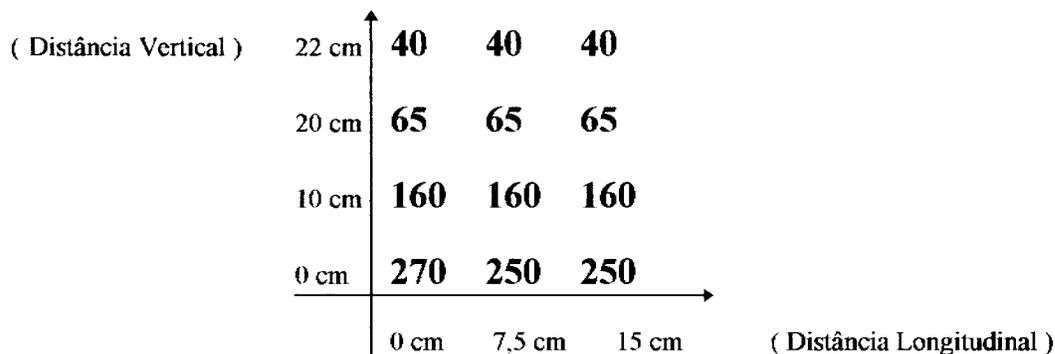
Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)



Vazão no jorro = $2,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,76 \text{ m} / \text{s}$)



Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 1,33 \text{ m} / \text{s}$)

Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	45	45	45	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	170	160	160	
	0 cm	280	260	270	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	40	40	40	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	160	160	160	
	0 cm	280	260	270	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($10,48 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	40	40	40	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	160	160	160	
	0 cm	290	280	280	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Jorro Fluidizado (Com a adição de vazão no ânulo $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} - 1,64 \text{ m} / \text{s}$)

Vazão no jorro = $1,90 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($7,60 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	40	40	40	
	20 cm	70	70	70	
	10 cm	170	170	170	
	0 cm	285	270	280	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($9,32 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	40	40	40	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	160	160	160	
	0 cm	290	280	280	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

Vazão no jorro = $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ ($8,48 \text{ m} / \text{s}$)

(Distância Vertical)	22 cm	35	35	35	
	20 cm	60	60	60	
	10 cm	160	160	160	
	0 cm	270	250	260	
		0 cm	7,5 cm	15 cm	(Distância Longitudinal)

4.5 Queda de Pressão no Jorro em Função da Vazão no Jorro em Leito Úmido

4.5.1 Manutenção da altura da fonte em leitos úmidos

Em secadores industriais é necessário que a altura da fonte seja constante devido ao tamanho limitado do leito, (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1993). Quando um líquido é adicionado no interior do secador é necessário ajustar a velocidade de modo a continuar obtendo a mesma altura da fonte. Quando o leito está em funcionamento e adiciona-se a água, a velocidade do ar tem de ser drasticamente reduzida de maneira a obter o tamanho de fonte constante. A introdução do líquido diminui a porosidade do ânulo, uma maior porção de ar passa através do jorro, aumentando a velocidade das partículas e conseqüentemente a altura da fonte. Com a secagem do leito, a porosidade do leito aumenta, com parte do ar voltando a passar através do ânulo e a velocidade do jorro cresce linearmente com o tempo. Imediatamente antes do leito estar seco, um máximo na velocidade é observado. Quanto maior a quantidade de líquido adicionada no leito, maior a redução na porosidade do ânulo e na velocidade do leito e também é maior o tempo necessário para o jorro atingir novamente a sua velocidade inicial. Na figura 4.20 são mostradas as experiências de secagem em batelada para um leito de altura de inertes igual a 17 cm atuando como um jorro convencional.

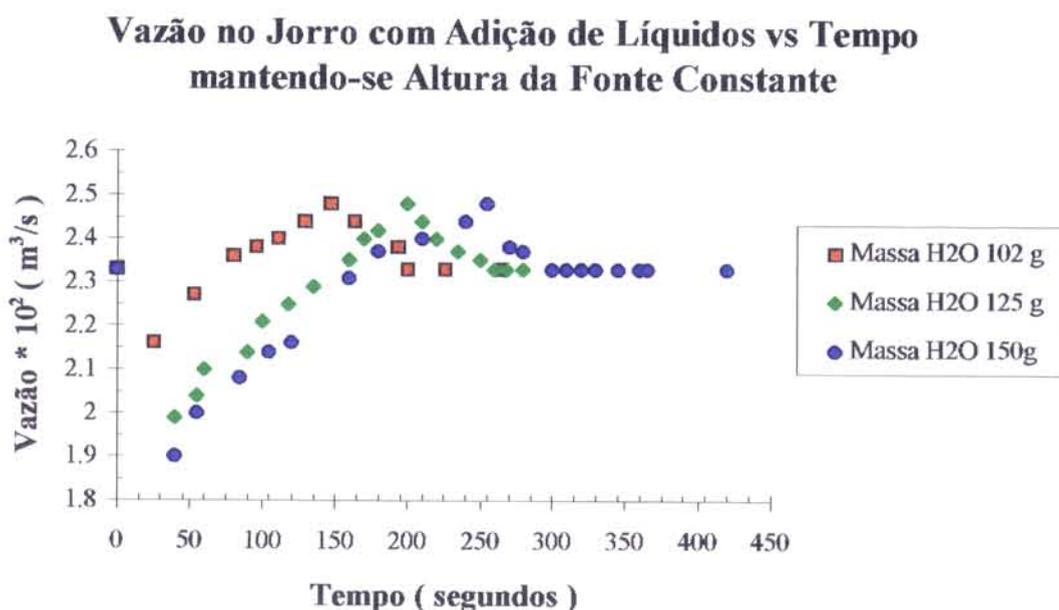


Figura 4.20 - Gráfico da vazão no jorro vs. tempo, mantendo-se a altura da fonte constante, em um leito de 17 cm de altura de inertes atuando como jorro convencional.

Nas experiências em jorro fluidizado realizadas, estudou-se os diferentes casos com uma vazão fixa no ânulo em um valor pouco abaixo da vazão mínima de fluidização $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,92 \text{ m/s}$). A velocidade obtida no jorro fluidizado para a manutenção da altura da fonte é mais baixa que a mostrada no jorro puro, para uma mesma quantidade de líquido. A vazão total durante o tempo é superior a do respectivo jorro puro. Mais uma vez, quanto maior a quantidade de líquido adicionada no leito maior a redução na velocidade do leito e maior o tempo necessário para o jorro atingir novamente a sua velocidade inicial (Figura 4.21).

Vazão no Jorro vs Tempo mantendo-se Altura da Fonte constante

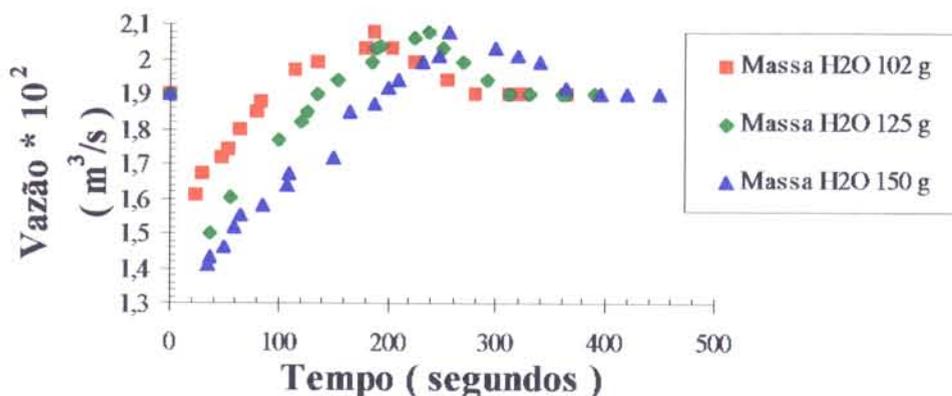


Figura 4.21 - Gráfico da vazão no jorro vs. tempo, mantendo-se a altura da fonte constante, em um leito de 17 cm de altura de inertes atuando como jorro fluidizado.

4.5.2 Jorro Convencional

A queda de pressão no leito úmido foi estudada com alimentação contínua de líquido em 19 g/min e altura do leito fixa no leito de 17 e 22 cm. O leito úmido apresentou a mesma tendência característica entre a vazão do ar e a queda de pressão no leito já descrita anteriormente. Um exemplo é mostrado na figura 4.22 . Com um pequeno aumento na vazão do jorro a queda de pressão sobe. O aumento na velocidade do ar desenvolve um leito empacotado com uma cavidade interna. Depois de um valor de pico na queda de pressão, ela cai até um nível constante e o leito se expande com a formação da fonte.

Os valores de queda de pressão são bem mais elevados para o caso do leito úmido do que do leito seco com qualquer altura de inertes (Figuras 4.22 e 4.23). Isto acontece porque o líquido aumenta as forças coesivas entre os inertes, o jorro apresenta uma maior concentração de partículas com uma menor porosidade e

conseqüentemente uma maior queda de pressão é observada nos canais internos do leito.

Para o leito com 17 cm de altura dos inertes a redução do ar manteve a queda de pressão constante até o valor de $1,89 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (7,58 m/s). A partir deste ponto uma diminuição na vazão ocasionou o colapso do jorro. Este é então o valor adotado como vazão mínima de jorro para este leito. Não foi verificada uma histerese significativa entre os valores medidos.

No caso do leito com 22 cm de altura de inertes, o leito úmido apresentou uma velocidade apenas um pouco superior àquela que seria a velocidade mínima de jorro no leito seco. A diferença está dentro da faixa de erro experimental de 10 %.

Embora a pressão no leito se mantenha maior que no leito seco a vazão mínima de jorro é a mesma, ou seja, não foi necessário uma maior vazão para obter o jorro estável adicionando líquidos em seu interior.

Na comparação do leito seco com o úmido, percebe-se que a diferença entre os picos de pressão e os patamares de queda de pressão alcançados foram maiores para o leito com 17 cm (figuras 4.22 e 4.23). A presença do líquido afetou mais profundamente o leito com menor altura, provavelmente isto se deve ao fato da vazão de água ser a mesma nos dois casos, gerando uma proporção líquido / volume de inertes maior para o leito de 17 cm do que o com 22 cm, interferindo mais profundamente nas forças coesivas entre as partículas e nos canais internos de pressão do leito.

Quando comparamos os resultados obtidos para leitos úmidos com diferentes alturas de leito, podemos notar que no jorro convencional o pico de queda de pressão é acentuadamente maior para o leito com 22 cm, (cerca de 30 % maior), e o patamar de queda de pressão após atingido o jorro estável é aproximadamente 37 % maior para o outro leito estudado (Figura 4.24).

4.5.3 Jorro Fluidizado

A queda de pressão em leitos de jorro fluidizado úmido, tanto para o leito com 17 cm quanto para o leito com 22 cm, foi obtida para uma vazão fixa no ânulo em $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (1,64 m/s). Esta vazão corresponde à vazão de mínima fluidização para o leito de 17 cm de altura dos inertes. A vazão do líquido foi fixada em 19 g/min. O comportamento do leito de jorro fluidizado úmido foi muito semelhante ao do leito seco com as mesmas condições de vazão no ânulo. O fato do leito já estar em movimento, leva a uma penetração de parte do ar do jorro no ânulo promovendo a sua aeração.

Comparando-se o leito seco com o úmido para uma mesma altura, agora com a adição da vazão auxiliar. No caso do leito com 17 cm de altura a adição de líquidos promoveu uma diferença bastante pequena na queda de pressão do leito em relação ao leito seco, figura 4.22. No caso do leito com 22 cm de altura a diferença foi maior, figura 4.23. Esta diferença deve ter ocorrido pelo fato da vazão auxiliar nos dois leitos ser a mesma e para o leito de 17 cm de altura esta vazão corresponde à vazão de mínima fluidização e o leito parte de uma condição inicial em movimento com parte de seu leito já suspenso. Para o leito de 22 cm de altura a vazão de $2,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (1,64 m/s), está abaixo da fluidização e o leito parte de uma condição de aeração. A aeração neste caso auxilia muito na ruptura do jorro interno, não ocasionando o pico acentuado de queda de pressão. Esta aeração porém não coloca o leito em movimento e ocasiona a maior diferença entre a quantidade de leito suspenso nos dois casos (Figura 4.23).

Na comparação dos dois leitos úmidos com alturas diferentes, percebe-se uma sensível diferença entre os patamares alcançados. No caso do leito com 22 cm de altura o patamar é cerca de 40 % maior que o leito com 17 cm de altura de inertes. Em ambos os casos os patamares obtidos são maiores que o obtido no seu respectivo jorro convencional úmido, figura 4.24. Isto é muito bom pois não existe a necessidade passar pelo pico de queda de pressão do leito (bastante elevado para leitos de jorro convencionais úmidos), e obtém-se uma maior porcentagem de leito suspenso.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro (Leitos Úmido e Seco)

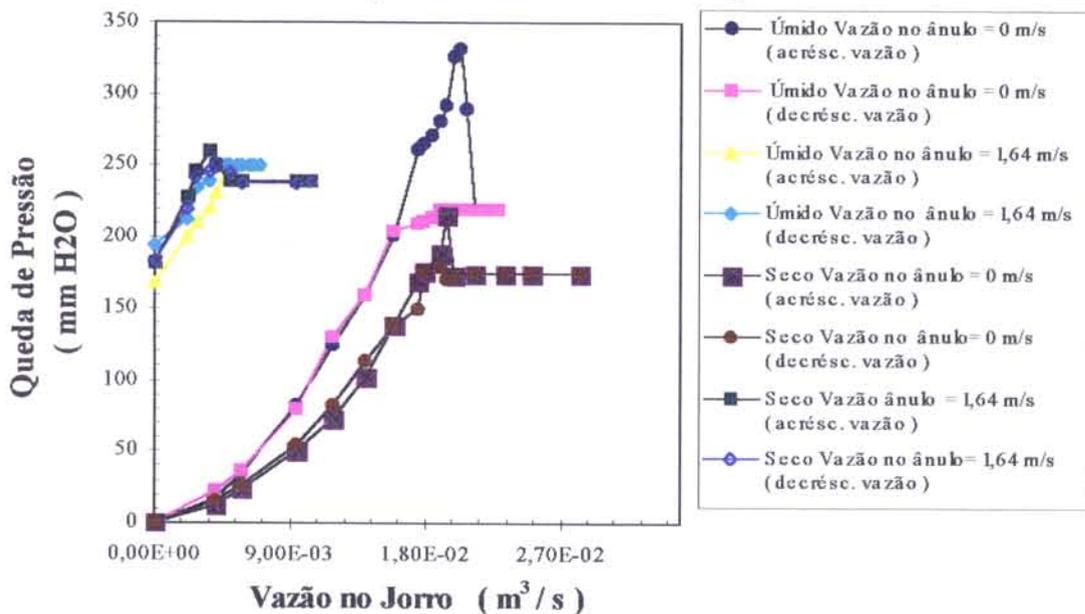


Figura 4.22 - Gráfico da Queda de pressão no leito úmido com uma altura fixa de inertes de 17 cm, atuando como leito de jorro convencional e fluidizado.

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro (Leitos Úmido e Seco)

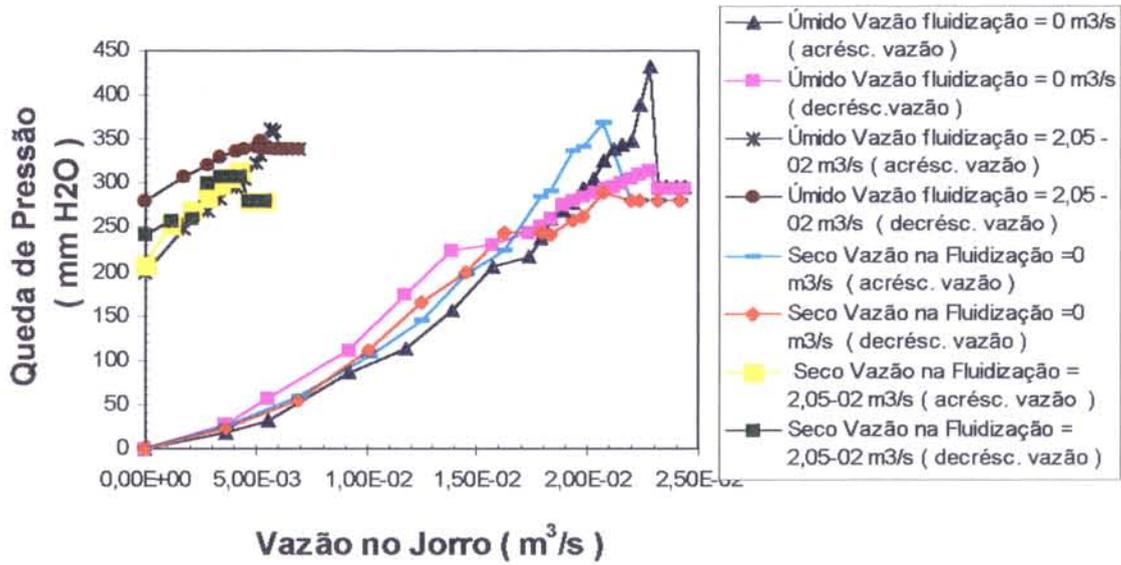


Figura 4.23 - Gráfico da Queda de pressão no leito úmido e seco com uma altura fixa de inertes de 22 cm, atuando como leito de jorro convencional e fluidizado

Queda de Pressão no Jorro vs Vazão no Jorro (Leito Úmido)

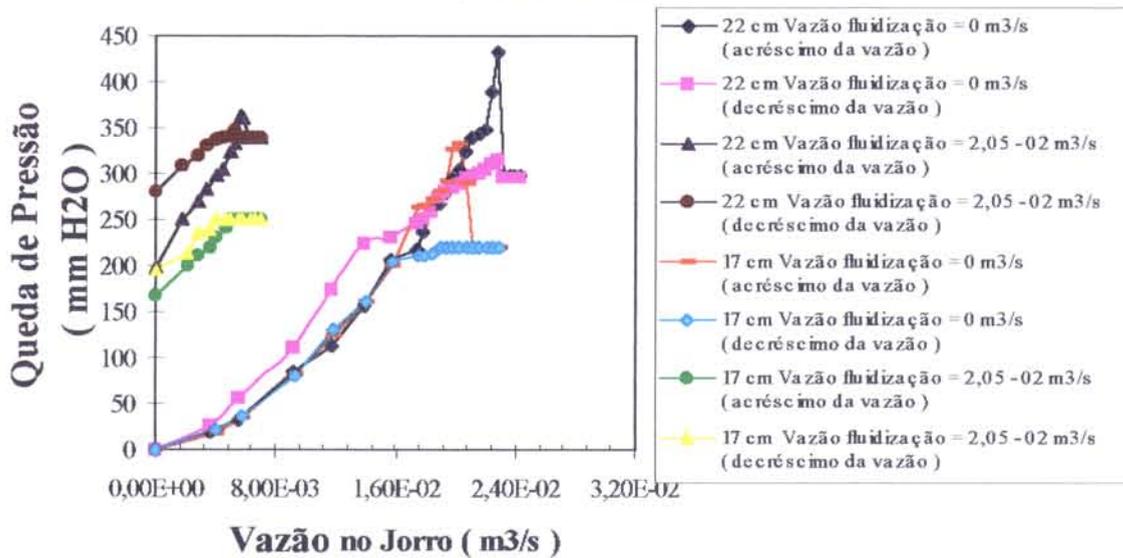


Figura 4.24 - Gráfico da Queda de pressão no leito úmido com alturas de inertes de 17 e 22 cm, atuando como leito de jorro convencional e fluidizado

4.6 Capacidade Evaporativa do Secador

4.6.1 Comparação da capacidade evaporativa par duas vazões fixas no jorro variando-se a vazão no ânulo

A capacidade evaporativa foi obtida mantendo-se a vazão no jorro e no ânulo fixa. Acrescentou-se em batelada o volume de água igual a 4 % do volume do leito de inertes. Foram tomados, em função do tempo, os valores da temperatura do ar de entrada no secador e os valores de temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido no saída do secador.

Através do balanço entálpico calculou-se a capacidade evaporativa do secador:

$$V \rho_{\text{ar}} C_{\text{par}} (T_{\text{are}} - T_{\text{ars}}) = h_{\text{fg}} \text{ Capacidade evaporativa}$$

C_{par}	Calor específico do ar	(kcal / kg s)
h_{fg}	Entalpia de vaporização da água	(kcal / kg)
V	Vazão volumétrica do fluido	(m ³ / s)
T_{are}	Temperatura do ar na entrada do secador	(°C)
T_{ars}	Temperatura do ar na saída do secador	(°C)
ρ_{ar}	Densidade do ar	(kg / m ³)

As figuras 4.25 e 4.26 mostram sua variação com o tempo.

No gráfico 4.25 temos a vazão no jorro fixa em $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão no ânulo variando de 0 até $2,60 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$. Quando a vazão no ânulo é zero, o leito está na condição de mínimo jorro. O acréscimo do volume de líquido ocasionou o colapso do jorro e o leito comportou-se como um leito fixo. Quando se trabalhou com as demais vazões no ânulo, não se verificou o colapso no jorro e o leito atuou como um jorro fluidizado.

Em todos os casos os gráficos mostraram que com até aproximadamente 120 segundos, a capacidade evaporativa cresce. Após esse período atingir-se um patamar, onde este valor é constante. Ele corresponde ao período em que o ar de saída possui a temperatura de bulbo seco igual a de bulbo úmido, ou seja o ar está saturado. Quando a capacidade evaporativa do secador começa a cair, é sinal que a evaporação é controlado pela baixa quantidade de água no interior do secador. Outra observação importante é que a taxa de evaporação apresentou um crescimento proporcional à quantidade de ar que passa através do secador.

Taxa de Evaporação
(Vazão no Jorro Fixa em $2.12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$)

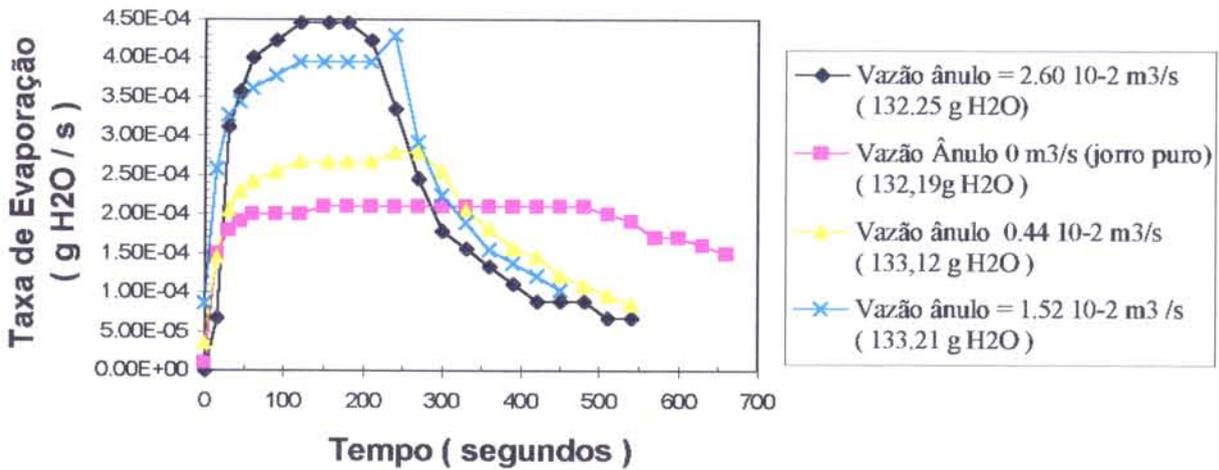


Figura 4.25 Capacidade evaporativa em função do tempo com vazão no jorro fixa em $2.12 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ e diversas vazões no ânulo.

Taxa de Evaporação
(Vazão no jorro constante igual à $2.48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$)

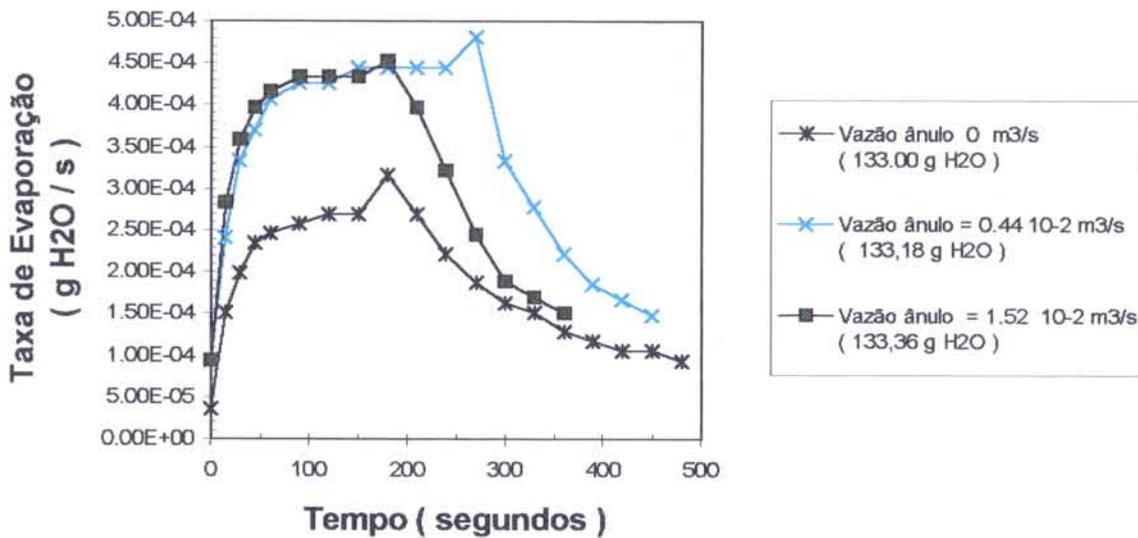


Figura 4.26 Capacidade evaporativa em função do tempo com vazão no jorro fixa em $2.48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ e diversas vazões no ânulo.

No gráfico 4.26 a vazão do jorro foi fixa em $2,48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$ e a vazão no ânulo variou de zero até $1,52 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}$. A adição de líquido não promoveu o colapso do jorro em nenhuma situação. Observou-se um crescimento da capacidade evaporativa com um tempo de até 80 segundos. A seguir o período em que o ar de saída possui a temperatura de bulbo seco igual a de bulbo úmido, ou seja o ar está saturado, e a seguir, a taxa de evaporação decresce com o tempo.

Percebe-se que o jorro com adição da vazão no ânulo apresentou a mesma taxa de evaporação tanto com $0,44 \text{ m}^3 / \text{s}$, quanto com $1,52 \text{ m}^3 / \text{s}$. É claro que no caso da vazão de $1,52 \text{ m}^3 / \text{s}$ o leito secou mais rapidamente que no experimento com menor vazão.

A fim de se verificar se a capacidade evaporativa é função apenas da vazão total do ar que passa através do leito e não da proporção entre as vazões no jorro e no ânulo, traçamos um gráfico de kg água evaporada / kg ar no secador em função do tempo. (figura 4.27)

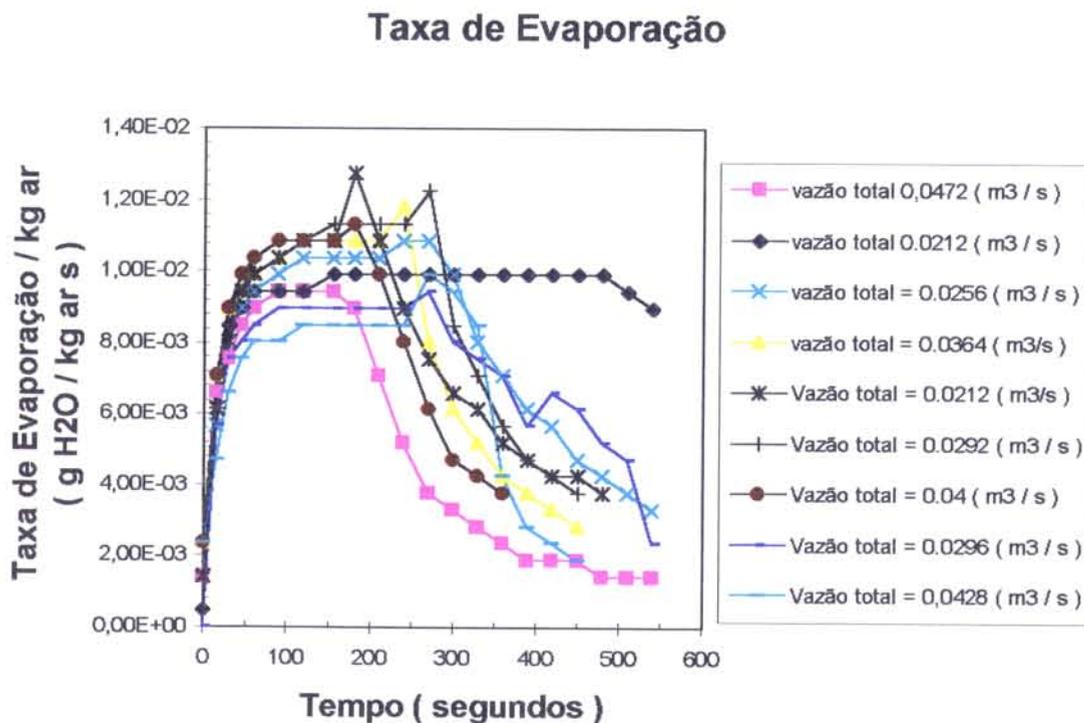


Figura 4.27 Quantidade de água evaporada por kg ar em função do tempo.

No gráfico temos uma variância da taxa de evaporação de 13 % entre os valores observados durante o período em que o ar sai saturado do leito. Esta variação está bem próxima do erro experimental de 10 %.

4.6.2 Superfície de Resposta da Capacidade Evaporativa em função da vazão no jorro e no ânulo.

Um planejamento fatorial 2^2 e 2^2 com complementação para o modelo quadrático, (2^2 + estrela), foi utilizado para avaliar o modelo linear e o modelo quadrático da superfície.

A estimativa dos efeitos principais e secundários foram realizados pelo pacote estatístico contido em NETO *et alii* (1995). O programa realiza a estimativa dos efeitos utilizando o algoritmo de Yates e fornece os modelos linear e quadrático através da modelagem por mínimos quadráticos com a respectiva tabela de análise de variância para cada modelo.

Os efeito calculados são:

Média = 2,4589 (média da capacidade evaporativa nos ensaios realizados)

Efeito principal da vazão no jorro = 2,1923

Efeito principal da vazão no ânulo = 2,1823

Efeito secundário Vazão no jorro / Vazão no ânulo = -0,3923

O efeito principal indica a importância da variável na resposta a ser analisada. O efeito secundário indica o efeito de interação entre as variáveis estudadas na resposta analisada. Quanto maior seu valor maior a importância. Valores positivos indicam efeitos sinérgicos e valores negativos indicam efeitos antagônicos.

Quando se varia a vazão do jorro ou do ânulo do nível (-1) para o nível (+1) obteve-se um aumento na capacidade evaporativa de 2,1923 e de 2,1823 respectivamente (tabela 3.6, página 44). Pode-se notar que estes valores são bastante próximos, indicando que a vazão no jorro exerce o mesmo tipo de influência que a vazão no ânulo na taxa de evaporação.

O efeito secundário da vazão no jorro com a vazão no ânulo confirma que não existe um efeito sinérgico da vazão no jorro com a vazão no ânulo. O valor de -0,3923 indica um efeito antagônico muito pequeno entre as vazões.

O modelo linear e quadrático calculados pelo pacote encontram-se a seguir. Para o uso do modelo codificado utilizam-se os valores das variáveis em seu formato codificado. Para o modelo decodificado utilizam-se os valores decodificados (tabela 3.6, página 44).

Modelo Linear

Codificado $1.0961 V_N(0) + 1.0911 V_A(0) + 2.5151$

Decodificado $124.5597 V_N(0) + 101.0301 V_A(0) - 0.5651$

Modelo Quadrático

Codificado $1.3131 V_N(0) + 1.0320 V_A(0) - 0.1102 V_N(0)^2 - 0.4934 V_A(0)^2 - 0.1961 V_N(0) V_A(0) + 2.7321$

Decodificado $215.2508 V_N(0) + 249.6339 V_A(0) - 1396.2810 V_N(0)^2 - 4223.6530 V_A(0)^2 - 2063.5860 V_N(0) V_A(0) - 2.1553$

Na tabela 4.5 encontram-se os resultados da Análise de variância calculados pelo pacote estatístico já mencionado.

Tabela 4.5 Análise de Variância para os modelos da Capacidade Evaporativa

Fonte de Variação	SQ Soma Quadrática		MSQ Média Quadrática		Graus de Liberdade		Teste F		R ² (%) Variância Máxima Explicável	
	Linear	Quadr.	Linear	Quadr.	Linear	Quadr.	Linear	Quadr.	Linear	Quadr.
Regressão	9.5682	23.3038	4.7841	4.6608	2	5	-	-	97.7815	94.7770
Resíduos	0.2171	1.2842	0.1085	0.4281	2	3	44.0751	10.8877	-	-
Total	9.7853	24.5880	-	-	4	8	-	-	-	-

Linear $F_{0,95, 2,2} = 19.00$

Quadrático $F_{0,95,5,3} = 9.01$

Quanto maior o valor de F calculado em relação ao valor de F tabelado mais confiável torna-se o ajuste do modelo. Um bom modelo deve apresentar um valor de F calculado de duas a três vezes maior que o F tabelado.

A tabela de análise de variância mostra que o modelo linear é o mais adequado, possui um valor de F calculado maior que o F tabelado em 2,3 vezes e uma porcentagem de variância explicável maior. As superfícies de resposta encontram-se nas figuras 4.28 e 4.29.

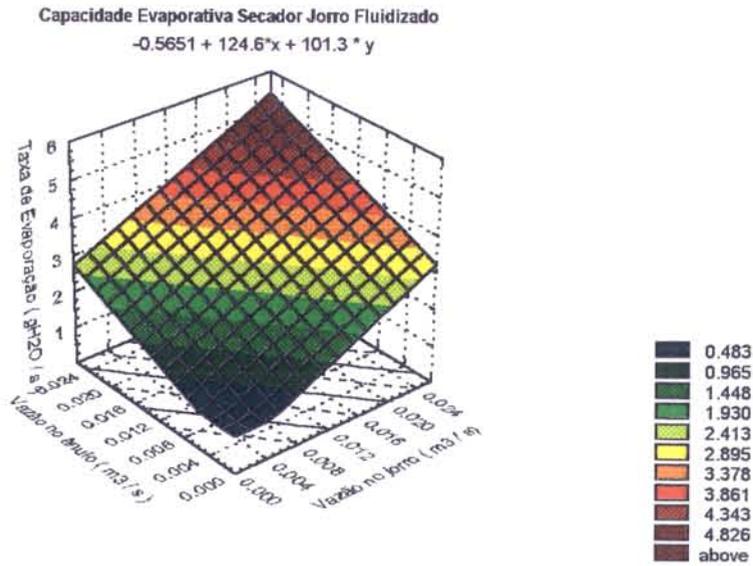


Figura 4.28 Superfície de resposta modelo linear

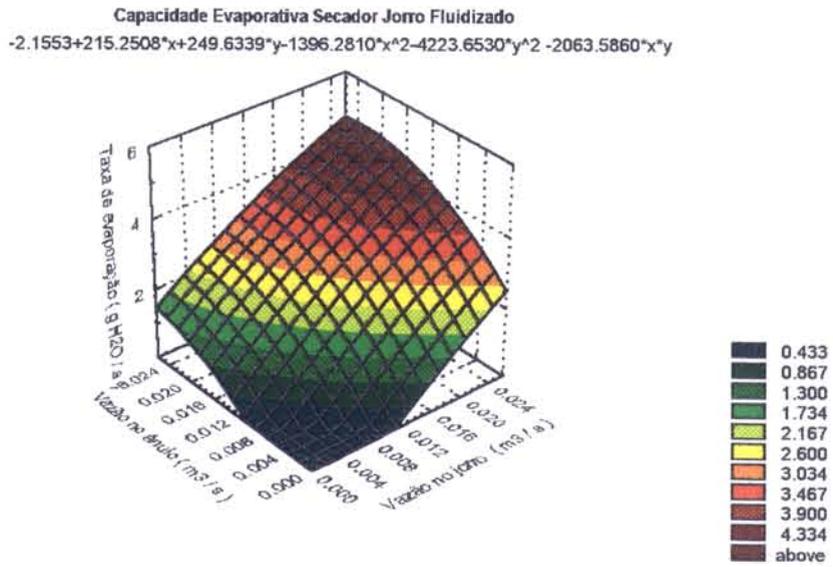


Figura 4.29 Superfície de resposta modelo quadrático

5 CONCLUSÃO

5.1 Circulação das Partículas e Tamanho das Zonas Mortas

A circulação das partículas nos leitos de jorro convencionais é fortemente afetada pela vazão do jorro. Quanto maior a vazão no jorro menor é o tamanho da zona morta. Existe, porém, uma vazão máxima a partir da qual o incremento da vazão não gera alterações no tamanho das zonas mortas.

Para o jorro convencional com a altura de 17 cm de inertes o volume do leito expandido é igual ao volume do leito estático somado ao volume deslocado pelo jorro. O mecanismo terminal do jorro observado visualmente é o estrangulamento. Este fato é confirmado pelo uso do parâmetro A_{2D} .

No caso dos leitos de jorro com vazão auxiliar, o acréscimo da vazão auxiliar promoveu uma diminuição acentuada no tamanho das zonas mortas. Quando um excesso de vazão no ânulo é acrescentado acontece instabilidade no jorro.

5.2 Queda de pressão no ânulo em função da Vazão no Ânulo

Quando o leito atua como um leito fluidizado convencional, observa-se uma fluidização do tipo agregada confirmado pelo número de Froude. Neste caso, a queda de pressão em função da vazão gera um gráfico típico para um leito fluidizado. A velocidade mínima de fluidização sofreu um aumento linear com o aumento da massa de inertes.

Quando se acrescenta vazão ao jorro, obtém-se a fluidização no leito em valores bem menores no ânulo. A velocidade mínima de fluidização é constante para leitos onde a vazão no jorro é maior que a vazão de mínimo jorro.

Comparando-se as vazões totais mínimas de fluidização, percebem-se dois comportamentos distintos:

* No leito com 17 cm de altura dos inertes, obteve-se a vazão do ânulo necessária para mínima de fluidização sempre menor que a vazão de fluidização do leito fluidizado convencional correspondente. A vazão total (jorro mais ânulo), é sempre superior à vazão total do leito fluidizado puro.

* No leito com 22 cm de altura dos inertes as vazões utilizadas no jorro são: uma menor, uma igual e a terceira maior que a de mínimo jorro. Como no caso anterior, a vazão do ânulo necessária para mínima de fluidização sempre é menor que a vazão de fluidização do leito fluidizado convencional. Neste caso porém a vazão total (jorro mais ânulo), é sempre inferior à vazão do leito fluidizado convencional.

5.3 Queda de Pressão no Jorro em função da Vazão no Jorro

Quando se trabalha no leito de jorro bidimensional atuando como um leito de jorro convencional, obtém-se um gráfico de queda de pressão no leito em função da vazão, igual ao modelo típico obtido com leitos de jorro convencionais de coluna cilíndrica. A velocidade mínima de jorro aumentou com o crescimento da massa de inertes no interior do leito. Este aumento não é linear como no caso do leito fluidizado um aumento na massa dos inertes na ordem de 29% gera um aumento na velocidade mínima de jorro na ordem de 11%.

Uma vazão adicional no ânulo gera uma vazão mínima no jorro menor que a do leito de jorro convencional e quanto maior o valor desta vazão adicional no ânulo menor a vazão do jorro necessária para obter-se o jorro estável. Em todos os casos a vazão total (ânulo mais jorro), no jorro com a vazão adicional é maior que a vazão total do jorro convencional.

5.4 Perfil de Pressão no Leito

De uma maneira geral o perfil de pressão mostrou uma uniformidade de pressão no topo do leito e na base verifica-se um decréscimo de pressão a medida que aumentamos a distância longitudinal.

A adição de uma vazão auxiliar no ânulo promove uma distribuição mais uniforme da pressão longitudinalmente. O gradiente de pressão na direção vertical é substancialmente mais alto que o sem aeração suplementar. Para valores elevados de vazão no ânulo, cria-se uma zona de baixa pressão no centro do ânulo, gerada por problemas na distribuição da vazão através da placa perfurada.

Em leitos com 22 cm de altura é notada uma uniformidade na pressão radial para quando a altura do leito z é maior que a metade do leito ($z / H > 0,5$).

5.5 Queda de Pressão no Leito Úmido

A introdução de água no interior do leito promove a necessidade de uma diminuição na vazão do jorro, a fim de manter a altura da fonte constante. Quanto maior o volume de líquido adicionado maior a redução na vazão do jorro e maior o tempo necessário para se restabelecer a vazão inicial. Com o jorro fluidizado, a redução da vazão no jorro é bem maior devido à maior porção de ar desviada do ânulo que atravessa o jorro.

A curva de queda de pressão é substancialmente mais alta para o caso do leito úmido. A queda de pressão no leito úmido é maior para uma mesma velocidade no jorro em um leito com alto conteúdo de líquido.

A velocidade mínima de jorro foi a mesma, tanto para o leito seco quanto para o úmido. A diferença observada no caso do leito com 22 cm de altura encontra-se dentro do erro experimental de 10 %.

Quando utilizamos a vazão auxiliar notamos uma diminuição acentuada do pico de queda de pressão. A vazão de mínimo jorro foi um pouco maior para o leito úmido e este aumento é da ordem de 3%, valor que também está dentro da margem de erro experimental.

5.6 Capacidade Evaporativa do Leito Úmido

A capacidade evaporativa mostrou-se proporcional à vazão total que percorre o leito, saindo o gás do secador praticamente saturado em todos os casos . Portanto trabalhando com água, a secagem tanto nos leitos de jorro convencionais como nos de jorro fluidizados, forneceu altos coeficientes de transferência de calor e massa , não se observando diferenças no comportamento dos mesmos.

5.7 Sugestões de Trabalhos Futuros

Uma infinidade de aplicações na secagem de diferentes produtos surge com o equipamento construído na planta piloto da Engenharia de Alimentos.

Como estudos futuros sugere-se:

1 - O uso de diferentes materiais com diferentes alturas de leito para estimar-se correlações de altura máxima do leito (H_{MAX}), Velocidade mínima de jorro (U_{ms}) e de jorro fluidizado (U_{mSF}), hoje ainda inexistentes para um leito de jorro bidimensional com $A_{2D} < 0,044$.

2 - O estudo da taxa de secagem de produtos ou soluções testes com diferentes viscosidades e de diversas adesividades, com diversos conteúdos de sólidos no secador.

3 - O estudo da influência da proporção entre as vazões no jorro e no ânulo na qualidade do produto seco, na proporção de sólidos retida no leito, na umidade do sólido coletado, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABU RAO, K.; HUSAIN, A.; DURGAPRASADA, R.Ch. Prediction of the maximum spoutable height in spout- fluid beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.63, p. 690 - 692, agosto, 1985.
- BARRET, N.; FANE, A. Drying of liquid material in spouted beds. In:International Drying Symposium, 1988, Versailles. Proceedings. França: IDS, 1988. op 107
- BECKER, H.A. An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. Chemical Engineering Science, v.13, p 245 - 262, 1961.
- BRIDGWATER, J. Spouted Beds. In: DAVIDSON, J.F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. Fluidization. 2 edição. London: Academic Press, 1985. p 201-224.
- BRIDGWATER, J.; MATHUR, K.B. Prediction of Spout Diameter in a Spouted Bed - A Theoretical Model. Powder Technology, v. 6, p. 183, 1972.
- CHATTERJEE, A. Spout Fluid Bed Technique. Industrial Engineering Chemical Process Design and Development, n. 9, p. 340 - 341, 1970.
- COUDERC, J.P. Incipient fluidization and particulate systems. In: DAVIDSON, J.F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. Fluidization. 2 edição. London: Academic Press, 1985. p. 1 - 46.
- DAVIDSON, J. F.; HARRISON, D.; GUEDES DE CARVALHO, J.R.F. On the liquid like behaviour of fluidized beds. Annual Reviews of Fluid Mechanics, n. 9 , p. 55 - 86, 1977.
- DAY, J.Y.; LITTMAN, H.; MORGAN, M.H.; GRBAVIIC, Z.B. ; HADZISMAJLOVIC, DZ.E.; VUKOVIC, D.V. An axisymetric model for fluid flow in the annulus of a spout - fluid bed. Chemical Engineering Science, v.46, n. 3 , p 773 - 779, 1991.
- DUMITRESCU, C. In: 7th International Congress Chemical Engineering, 1981, Praha. Proceedings. Thecoslováquia: CHISA 81, 1981. J 323.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Spouting of particulate solids. In: FAYED, M.E. AND OTTEN, L. Handbook of powder science and technology. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1984. p 507 - 536 .
- ERGUN, S. Fluid flow through packed column. Chemical Engineering Progress, v. 48, n.2 , p. 89 - 94, 1952

- FANE, A.G.; MITCHELL, R.A. Minimum spouting velocity of scale-up beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.62, p. 437 - 439, 1984.
- GEALDART, D. Types of gas fluidization. Powder Technology, v. 7, p. 285 - 292, 1973.
- GRACE, J.R.; MATHUR, K.B. Height and structure of the fountain region above spouted beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.56, p.533 - 537, 1978.
- GRBAVIIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; ZDANSKI, F.K.; LITTMAN, H. Prediction of the maximum spoutable bed height in spout - fluid beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.54, p.33 - 42, fevereiro / abril, 1976.
- GRBAVIIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; HADZISMAJLOVIC, DZ.E.; GARIC, R. V. Prediction of the maximum spoutable bed height in spout - fluid beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.69, p. 386 - 389, fevereiro, 1991.
- GRBAVIIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; JONANOVIC, S.DJ.; GARIC, R. V.; HADZISMAJLOVIC, DZ.E.; LITTMAN, H.; MORGAN, M.H. Fluid flow pattern and solids circulation rate in a liquid phase spout- fluid bed with draft tube. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.70, p. 895 - 904, 1992.
- HADZISMAJLOVIC, DZ.E. First order isothermal catalytic reaction in a spout-fluid bed. Yugoslavia, 1980. Ph.D. Thesis - University of Belgrade.
- HADZISMAJLOVIC, DZ.E.; GRBAVIIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; LITTMAN, H. The Mechanics of spout-fluid beds at minimum spout- fluid flowrate. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.61, p. 343 - 348, Junho, 1983.
- HE, Y-L.; LIM, C.J.; GRACE, J.R. Spouted Bed and Spout-fluid bed Behaviour in Column of Diameter 0,91 m. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.70, p. 848 - 857, outubro, 1992.
- HEIL, C.; TELS, M. Pressure distribution in spout - fluid bed reactors. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.61, p. 331 - 342, junho, 1983.
- KONO, H. Granulation of small granules from fine powder in spouted fluidized bed granulators. In: International Symposium. Proceedings Powder Technology. 1981, Kyoto. s.n.t.

- KUDRA, T.; PALLAI, E.; BARTTCZAK, Z.; PETER, M. Drying of paste like materials in screw type spouted beds and spin-flash dryers. Drying Technology, v.7, n. 3, p 583-597, 1989.
- KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. Fluidization Engineering. New York: John Willey and Sons Eds, 1962. 534 p.
- LEFROY, G.A.; DAVIDSON, J.F. The Mechanics of Spouted Beds. Transactions. Institucional Chemical Engineering., v. 47, T120,1969. s.n.t.
- LIM, C.J.; GRACE, J.R. Spouted Bed Hydrodynamics in a 0,91 m Diameter Vessel. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.65, p. 366 - 372, junho, 1987.
- LIMAS BALLESTEROS, R.; RIBA, J.P.; COURDEC, J.P. Expansion of non-esferical particles in liquid fluidized beds. Entropie, v. 18, n.106, p 37 - 45, 1982.
- LITTMAN, H.; VUKOVIC, D.V.; ZDANSKI, F.K.; GRBAVCIC, Z.B. Pressure Drop and Flowrate Characteristics of a Liquid Phase Spout-Fluid Bed at the Minimum Spout-Fluid Flowrate. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.52, p. 174 - 179, agosto, 1974.
- LITTMAN, H.; VUKOVIC, D.V.; ZDANSKI, F.K.; GRBAVCIC, Z.B. Basic relation for the liquid phase spout fluid bed at minimum spout-fluid flowrate. In: KEAIRNS, D.L. Fluidization Technology. Washington, D.C: Hemisphere. v.1, p. 373 - 386.
- LITTMAN, H.; MORGAN, M.H.; VUKOVIC, D.V.; ZDANSKI, F.K.; GRBAVIC, Z.B. Predicition of the maximum spoutable height and the average spout to inlet tube diameter ratio in spouted beds of spherical particles. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.57, p. 684 - 687, dezembro, 1979.
- LITTMAN, H.; MORGAN, M. H.; A general correlation for the minimum spouting velocity. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.61, p. 269 - 273, junho, 1983.
- LITTMAN, H.; MORGAN, M. H. The mensurment, prediction and correlation of the minimum spouting velocity, pressure drop, maximum spoutable bed height and spout diameter in spouted beds of coarse particles. In: DORAISWAMY, L. K. & MUJUMDAR, A.S. Amsterdam: Elsevier, 1988. p 287 - 315. s.n.t.
- MADONNA, L.A.; BOORNAZIAN, L.; BENCEL B.K.; GEVEKE, D. Some characteristics of spout-fluid beds. International Conference on Alternative Energy Sources. Verziroglou, Ed., v. 6, n. 3 , p 257 - 282, 1980. s.n.t

- MAMURO, T. & HATTORI, H. Flow pattern of fluid in spouted beds. Journal of Chemical Engineering Japan, v. 1, n. 1, p 1 - 5, 1968.
- MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. A Technique for contacting gases with coarse solids particles. Academic International Chemical Engineering Journal, v. 1, n.. 2, p 157 -164, 1955.
- MATTHUR,K.B.; EPSTEIN,N. Dynamics of Spouted Beds. In: Advances in Chemical Engineering, New York: Academic Press, 1974. s.n.t.
- MCKAY,G.; MCLAIN, H. The fluidization of cuboid particles. Transactions of The Institute of Chemical Engineers, v.58, p 107 - 115, 1980. s.n.t.
- MC. NAB, G.S. Prediction of spout diameter. British Chemical Engineering Process Technologie, v. 17, p 532, 1972. s.n.t.
- MC. NAB, G.S.; BRIDGWATER, J. In: Particle Technology Nuremberg Conference. Nuremberg: 1977. Preprints II, p. 62. s.n.t.
- MINCHEV, A.D.; ROMANKOV, P.C.; RASHKOVSKAYA, N.B. Zh. Prinklkhim, v. 41, n.6, p 1249, 1968 . s.n.t.
- MINCHEV, A.D.; ROMANKOV, P.C.; RASHKOVSKAYA, N.B. Zh. Prinklkhim, v. 42, n.5, p 1092, 1969 . s.n.t..
- MINCHEV, A.D.; ROMANKOV, P.C.; RASHKOVSKAYA, N.B. Zh. Prinklkhim, v. 42, n.9, p 2150, 1969 b . s.n.t.
- MORGAN, M.H.; LITTMAN, H. Predicting the maximum spoutable height in spouted beds of irregularly shaped particles Industrial Engineering Chemical Fundamentals, v. 21, p. 23 - 26, 1982. s.n.t.
- MUJUMDAR, A.S. Spouted Bed Technology - A Brief Review. In: Anais do X Encontro sobre Escoamento de Meios Porosos, São Carlos: 1982.v 2. s.n.t.
- MUJUMDAR, A.S. Advances In Drying. In: Drying 84, 1984, New York: Hemisphere Mc Graw Hill. 1984. V.4. s.n.t.
- NAGARKATTI, A.; CHATTERJEE, A. Pressure and Flow Characteristics of a Gas Phase Spout-Fluid Bed and the Minimum Spout-Fluid Condition. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.52, p. 185 - 195, abril, 1974.
- NETO,B.B.; SCARMINIO,I.S.; BRUNS,R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. 195 p.

- ORMOS, Z.; BLICKLE, T. Drying of pastes in fluidized bed. In: A.S.MUJUMDAR. Drying 80. New York: Hemisphere, 1980. p 200-204.
- PASSOS, M.L. Flow characteristics of two-dimensional spouted and spout-fluidized beds of particles. Montreal, 1991. PhD Thesis - Mc Gill University. s.n.t.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A. S.; MASSARANI, G. Scale-up of spouted beds dryers: criteria and applications. Drying Technology, v.12, n 1/2, p 351 - 391, 1994.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, V. S. G. Desing parameters for a two dimensional spouted bed. In: Third International Symposium on Spouted Beds, 1991. Vancouver. s.n.t.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, V. S. G. Prediction of the maximum spoutable bed heigt in two dimensionaol spouted bed. Powder Technology, v. 74, p 97 - 105, 1993.
- PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. Manual do Engenheiro Químico. 5^a edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara2, 1980. s.n.t.
- PHAM, Q.T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.61, p. 426 - 434, 1983.
- PORENOVIC, D.S. ; GRBAVIIC, Z.B. ; HADZISMAJLOVIC, DZ.E. ; VUKOVIC, D.V. ; LITTMAN, H. A drying of thermo-sensitive suspension in the draft tube spout-fluid bed System. In: International Drying Symposium, 1990. Prague: CONGRESS CHISA, Preprint n 880. s.n.t.
- RE, M.I.; FREIRE, J.T. Drying of paste liquid material in spouted beds. In: International Drying Simposium ,1988. Versailles: op 119. s.n.t.
- REGER, E.O.; ROMANKOV, P.C.; RASHKOVSKAYA, N.B. Zh. Prinklkhim, v. 40 n.5, p 2276, 1967 . s.n.t..
- RIBA, J.P.; ROUKE, R.; COURDEC, J.P. Minima condition for fluidization by a liquid. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.56, n. 1, p. 26-30, 1978.
- RICHARDSON, J.F. Incipient fluidization and particulate systems. In: DAVIDSON, J.F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. Fluidization. 2 edição. London: Academic Press, 1985. p. 1 - 46.

- ROCHA, S.C.S.; TARANTO, O.P.; AYUB, G.E. Aerodynamics and Heat transfer during coating of tablets in two-dimensional Spouted Bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.73, p.308 - 312, 1995.
- ROMANKOV, P.C.; RASHKASKAY A. Fluidization In: DAVIDSON, J.F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. Drying, 2 edição. London: Academic Press, 1971.p.569.n.s.t.
- SHILTON, N.C.; NIRANJAM, K.; Fluidization and its applications to food processing. Food Structure, v. 12, n. 3, p 199 - 215, 1993 .
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The Stability of Wet Spouted Beds. Drying Technology , v.11, n. 2, p 277 - 301, 1993.
- SOUZA, C. C. Computer program for optimization of spouted bed grain dryers. Belo Horizonte, 1993. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. s.n.t.
- SUTANTO, W.; EPSTEIN, N.; GRACE, J.R In: 8 th International Congress Chemical Engineering, 1981, Praha. Proceedings. Thecoslováquia: CHISA 84, 1984.G 6.5. s.n.t.
- SUTANTO, W.; EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Hidrodynamics of Spout-Fluid Beds. Powder Technology, v. 44, p 205 - 212, 1985.
- TANNOUS, K. Contribution a l'etude hydrodynamique des lits fluidises de grosses particules. Toulouse, 1993.145 p. PhD. Tesis. - Institut National Polytechnique de Toulouse.
- THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. Vitesse minimale de fluidisation e et expansion des couches fluidisées par un gaz", Powder Technology, v. 38, p 233 - 253, 1984.
- THORELY, B.; SOUNBY, J.B.; MATHUR, K.B.; OSBERG, G.L. An Analyses of Air and Solid Flow in a Spouted Wheat Bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.37, p.184 - 192, 1959.
- VUKOVIC, D.V. ; HADZISMAJLOVIC, DZ.E. ; GRBAVIIC, Z.B. ; GARIC, R. V. ; LITTMAN, H. Regimes maps for two -phase fluid solids mobile beds in a vertical column with nozzle and anular flow. In: 2nd Int. Symp. on Spouted Beds, 1982, Vancouver. Proceedings. Vancouver, 1982. p 93 - 102.
- VUKOVIC, D.V. ; HADZISMAJLOVIC, DZ.E. ; GRBAVIIC, Z.B. ; GARIC, R. V. ; LITTMAN, H. Flow Regimes for spout - fluid beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.62, p.825 - 829, 1984.

WU, S.W.M.; LIM,C.J., EPSTEIN,N. Hydorodynamics of spouted beds at elevated temperatures. Chemical Engineering Communications, v. 62 , p 251-268, 1987.

YE, B. Combustion performance and hight tamperature hydrodynamics in a spouted and spout-fluid bed. Columbia, 1988. M.A.SC. DISSERTATION, Univ.of British Columbia. s.n.t.

YE, B.; LIM, C.J; GRACE, J.R . Hydrodynamics of Spouted and Spout-Fluidized Beds at High Temperatura. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.70, p.840 - 847, 1992.

APÊNDICE A

CALIBRAÇÃO DAS PLACAS DE ORIFÍCIO

A.1 Introdução

Neste equipamento é necessário medir a vazão do ar em três situações: a vazão total do sistema, a vazão no jorro e a vazão no ânulo do leito. Para a determinação da vazão do ar nos três pontos acima citados, foi escolhido o uso de três medidores de orifício. Apesar deste tipo de medidor produzir uma alta perda de pressão permanente e conseqüentemente requerer um maior custo no bombeamento o seu uso se justifica neste caso, pois alia a simplicidade de construção e instalação, facilidade de operação e o baixo custo.

Uma placa de orifício consiste de uma chapa plana com um orifício esquadriado central, instalada perpendicularmente à direção do escoamento. A variação da energia cinética e a perda de carga provocadas pelo estrangulamento ao ser forçado pelo orifício, resulta em redução da pressão do fluido que pode ser determinada por um manômetro.

A perda de pressão através da placa de orifício pode ser relacionada com a vazão do fluido pela seguinte equação:

$$V = C_o \cdot A_o \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P}{\rho_{ar} (1-\beta^4)}} = C_o \cdot A_o \sqrt{\frac{2 \rho_{man} g \cdot \Delta h}{\rho_{ar} (1-\beta^4)}} \quad (A.1)$$

onde: $V =$ Vazão volumétrica (m^3 / s)

$C_o =$ Coeficiente de descarga

$A_o =$ Área do orifício (m^2)

$\Delta P =$ Perda de pressão (N / m^2)

$\rho_{ar} =$ Densidade do ar (kg / m^3)

$g =$ Aceleração da gravidade (m / s^2)

$\rho_{man} =$ Densidade do líquido manométrico (kg / m^3)

$\Delta h =$ Diferença de altura na coluna de líquido manométrico (m)

$$\beta = \frac{D_o}{D_i} = \text{razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno da}$$

tubulação

A diferença de pressão é medida entre tomadas instaladas a jusante e a montante da placa. A vazão de gás é então determinada a partir da curva característica da placa (vazão em função da perda de carga no orifício).

A.2 Construção e calibração da placa de orifício

Os medidores de orifício foram construídos com as seguintes dimensões físicas:

	Diâmetro da Placa (cm)	Diâmetro Orifício (cm)	β
Medidor da vazão total (válvula globo 1)	8,45	3.47	0,411
Medidor da vazão no jorro (válvula globo 2)	5,66	2.68	0,473
Medidor da vazão no ânulo (válvula globo 3)	5,66	2.68	0,473

As tomadas de pressão são furos feitos um a montante e outro a jusante, com as aberturas tão perto quanto possível da placa (tomadas de canto). As tomadas de canto apresentam a vantagem, às vezes considerável, de poderem ser feitas na própria placa de orifício. Assim, o dispositivo completo pode ser rapidamente inserido em uma tubulação, em qualquer junta flangeada, sem necessitar de furar a tubulação.

Para a calibração da placa de orifício utilizou-se um medidor de fluxo de ar já calibrado, Merian Laminar Flow Element (Modelo 50 MY 20 - 2). O medidor foi colocado em série na saída de ar do secador, obedecendo as normas do fabricante (mínimo de 10 diâmetros do tubo antes do Merian , para evitar perturbações no fluxo que possam alterar a leitura). Para cada uma das placas realizou-se o seguinte procedimento: Mediu-se para cada vazão de ar a perda de pressão na placa, no Merian. A vazão volumétrica lida no Merian sofria duas correções, uma devido à pressão e outra devido à temperatura, obtendo-se seu valor nas condições padrão do medidor (21,1 °C e 760 mmHg). A relação entre a vazão padrão e a perda de pressão na placa de orifício é a curva característica desejada. Esta relação pode ser linearizada, traçando-se o gráfico da vazão em função da raiz quadrada da perda de carga. Isto porque, na faixa empregada, os coeficientes de descarga mantêm-se essencialmente constantes. Estes dados, juntamente com os valores de vazão já padronizados e de perda de pressão obtidos encontram-se nas tabelas A.1, A.2 e A.3.

As equações obtidas por regressão linear dos pontos de vazão em função de Δh encontram-se na tabela abaixo:

Placa de Orifício 1 $V (m^3 / s) = - 7,58 \cdot 10^{-4} + 2,16 \cdot 10^{-3} \sqrt{mmH_2O}$ (A.2)
coeficiente de correlação = 0,994

Placa de Orifício 2 $V (m^3 / s) = - 2,22 \cdot 10^{-4} + 1,36 \cdot 10^{-3} \sqrt{mmH_2O}$ (A.3)
coeficiente de correlação = 0,999

Placa de Orifício 3 $V (m^3 / s) = - 6,99 \cdot 10^{-4} + 1,72 \cdot 10^{-3} \sqrt{mmH_2O}$ (A.4)
coeficiente de correlação = 0,999

As equações acima dão o valor da vazão padrão. A vazão real de cada experimento é obtida por:

$$V_{\text{real}} (m^3 / s) = V \left(\frac{273 + T_{\text{amb}}}{273 + 21,1} \right) \frac{760}{P_{\text{bar}}} \quad (A.5)$$

onde: T_{amb} = Temperatura ambiente (°C)

P_{bar} = Pressão barométrica (mmHg)

V_{real} = Vazão à T_{amb} e P_{bar} (m^3 / s)

Tabela A.1 Curva de calibração da placa de orifício da válvula 1

Número da medida	Δh (mm H ₂ O)	Vazão x 10 ³ (m ³ / s)	Reynolds	C _o *
1	0	0	0	/
2	1	1.28	3405	0.64
3	2	1.73	4602	0.63
4	3	2.99	7954	0.63
5	5	3.97	10561	0.63
6	10	6.34	16866	0.62
7	20	8.54	22718	0.62
8	29	10.9	28996	0.61
9	46	13.7	36445	0.61
10	59	15.8	42032	0.61
11	73	17.7	47086	0.61
12	89	19.8	52672	0.61
13	105	21.8	57993	0.61
14	137	24.4	64910	0.61

* Ref : (PERRY & CHILTON, 1980)

Tabela A.2 Curva de calibração da placa de orifício da válvula 2

Número da medida	Δh (mm H ₂ O)	Vazão x 10 ³ (m ³ / s)	Reynolds	C _o *
1	0	0	0	/
2	1	1.28	5708	0.64
3	2	1.73	7715	0.64
4	5	2.99	13335	0.63
5	9	3.97	17705	0.63
6	23	6.34	28275	0.62
7	49	8.54	38086	0.61
8	65	10.9	48611	0.61
9	114	13.7	61098	0.61
10	145	15.8	70464	0.61
11	171	17.7	78937	0.61
12	205	19.8	88303	0.61
13	254	21.8	97222	0.61
14	324	24.4	108817	0.61

* Ref : (PERRY & CHILTON, 1980)

Tabela A.3 Curva de calibração da placa de orifício da válvula 3

Número da medida	Δh (mm H ₂ O)	Vazão x 10 ³ (m ³ / s)	Reynolds	C _o *
1	0	0	0	/
2	1	1.28	5708	0.64
3	5	3.36	14985	0.63
4	15	6.15	27427	0.62
5	31	8.40	37462	0.61
6	47	10.6	47273	0.61
7	75	13.0	57976	0.61
8	103	15.8	70464	0.61
9	124	17.4	77599	0.61
10	154	23.2	103466	0.61
11	200	15.0	111493	0.61
12	244	26.8	119521	0.61

* Ref: (PERRY & CHILTON, 1980)

APÊNDICE B

CARACTERIZAÇÃO DOS INERTES

B. 1 Introdução

Para realizar o estudo da fluidodinâmica dos inertes em nosso leito precisamos recheá-lo com um material conhecido. Optou-se por esferas de vidro pois este é um elemento bastante estável, inerte em nossas condições de trabalho, apresenta uma geometria fácil para estudos e produz uma perda de pressão razoavelmente grande para ser determinada em manômetros tipo U comuns. Para uma identificação completa dos inertes utilizados, determinou-se o seu tamanho e a sua densidade.

B.2 Tamanho dos Inertes

Para a determinação do tamanho das esferas de vidro utilizadas optou-se por utilizar o método de medida direta. Tomou-se uma amostra aleatória de 100 unidades e mediu-se, com o uso de um paquímetro, diretamente o diâmetro dos inertes. Os dados obtidos encontram-se na tabela B.1.

Analisando estes dados estatisticamente, obtivemos o seguinte valor médio:

$$d_p = 3,8 \pm 0,3 \text{ mm}$$

Na figura B1 encontra-se o histograma da distribuição de tamanho obtida experimentalmente comparado com a distribuição do tipo normal.

B.3 Densidade dos Inertes

A densidade das esferas de vidro foi determinada por picnometria. Utilizou-se para isto picnomêtros devidamente calibrados em laboratório. Esta calibração foi realizada em ambiente com temperatura controlada e igual à 20 °C. Para medir a massa utilizamos uma balança analítica digital marca Sartorius modelo A 200 S - * * A, devidamente ligada a um estabilizador automático de voltagem marca Kron.

Foram realizados 16 experimentos cujos valores encontram-se na tabela B.2. A análise estatística dos dados nos forneceu o seguinte valor médio para a densidade:

$$\rho_p = 2516 \pm 26 \text{ kg / m}^3$$

Na figura B2 encontra-se o histograma da distribuição de densidade obtida experimentalmente comparado com a distribuição do tipo normal.

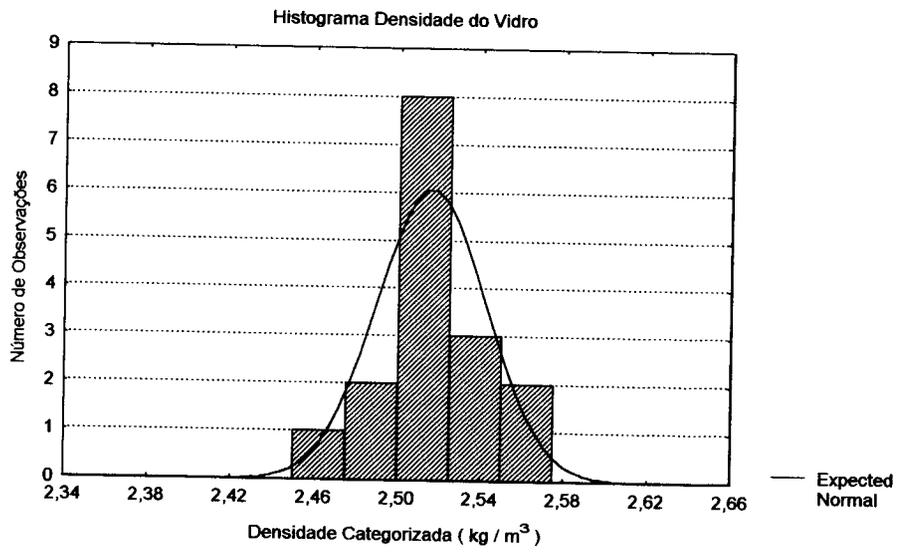


Figura B.2 - Histograma de distribuição da densidade das esferas de vidro utilizadas como inertes.

APÊNDICE C

CALIBRAÇÃO DA VAZÃO DO ASPERSOR

C.1 Introdução

Os estudos realizados com o leito úmido com o regime de alimentação do líquido de forma permanente, necessitavam do conhecimento da vazão do aspersor de dois fluidos. Para o conhecimento da vazão do aspersor realizou-se a calibração do sistema. Uma pressão fixa do ar foi fornecida pelo compressor e variou-se em 4 níveis a vazão do líquido fornecida pela bomba peristáltica.

O coeficiente de transferência de calor e de massa foram considerados bastante grandes de maneira que a limitação de evaporação de água do sistema ficaria limitada a capacidade de saturação do ar de secagem. O ar entra no secador a uma temperatura média de 45°C e sai do secador a 25°C, uma análise na carta psicrométrica da cidade de Campinas informa que a capacidade evaporativa do ar no secador ficaria em torno de 19 g / min.

C.2 Calibração da Vazão

O aspersor utilizado em nosso equipamento possui a seguinte faixa de trabalho para a pressão do ar : 10 - 22 psi. Em nossos experimentos utilizou-se uma pressão constante e igual à 15 psi. Esta pressão está dentro da faixa indicada de trabalho do aspersor e é um valor adequado para o uso em nosso compressor.

O procedimento experimental foi o seguinte: Fixou-se a pressão do ar fornecida pelo compressor em 15 psi. A bomba peristáltica foi regulada em uma dada vazão, durante um minuto recolhíamos em um béquer de massa conhecida, a massa de água fornecida pelo sistema em operação. Após um minuto obtínhamos a massa do conjunto béquer mais água e por diferença obtinha-se a vazão por minuto.

As faixas de vazão utilizadas na bomba peristáltica vão de 5 a 35 gramas por minuto. Para esta faixa de vazão de 19 g/min foi realizado um maior número de experimentos, pois esta é a vazão crítica para o sistema e é necessário assegurar uma boa média. Os dados obtidos nos experimentos encontram-se na tabela C.1.

Tabela C.1 - Vazões em gramas por minuto para 4 diferentes vazões na bomba peristáltica

Experimento	Indicador de vazão em 1.8	Indicador de vazão em 1.9	Indicador de vazão em 2.0	Indicador de vazão em 2.5
1	5.16	9.55	19.55	35.95
2	4.92	9.79	18.67	35.28
3	5.16	9.05	19.86	32.00
4	5.10	9.23	19.27	35.54
5			19.45	
MÉDIA	5.08	9.41	19.36	34.69