

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DISPERSÕES GÁS - LÍQUIDO EM PRATOS  
PERFURADOS SEM VERTEDOR

Autor: Sandra Lúcia da Cruz

Orientador: João A.F.R. Pereira

045/83

Tese submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

CAMPINAS - SP - BRASIL

Agosto - 1983

**UNICAMP**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**

302

À meus pais,  
Teodoro (em memória)  
e Maria

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira pela orientação e apoio prestados.

Ao aluno Antonio Sergio R. Reganati pelo auxílio prestado.

A Solange Ap. Silva Vieira pelo trabalho de datilografia.

Ao Wilton Furguim pela elaboração dos desenhos.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro que permitiu a realização deste Trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Química - UNICAMP.

Aos amigos.

RESUMO

O presente trabalho descreve a análise experimental e dimensional sobre o comportamento das dispersões gás-líquido formadas em pratos perfurados sem vertedor. A formação de dispersões gás-líquido é analisada detalhadamente em função da vazão de gás, vazão de líquido e características dos pratos perfurados utilizados, tendo-se variado a área livre de escoamento de 6 a 20% em colunas com diâmetros de 0.18 m e 0.098 m.

No trabalho experimental foram testados os sistemas ar-água e ar-soluções de etanol à temperatura do meio ambiente. Os resultados experimentais mostram as condições de formação das dispersões tipo espuma (Borbulhamento e "Froth"), bem como a ocorrência de "Froth" oscilatória. A altura da espuma, sua porosidade média e altura de líquido (clear-liquid height) foram medidas e correlacionadas com parâmetros geométricos (diâmetro da coluna, dos orifícios e área livre), propriedades físicas dos sistemas (viscosidade, tensão superficial, massa específica do gás e do líquido) e vazão de gás e líquido. As correlações apresentadas são baseadas em análise dimensional. Por último é apresentada uma correlação também baseada em análise dimensional que nos permite determinar a máxima velocidade superficial do gás para operação do prato em regime "Froth" estável.

ABSTRACT

The present work describes experimental and dimensional analysis on the behaviour of gas - liquid dispersions formed on sieve trays without downcomer. The formation of such dispersions was analysed in detail as gas and liquid flow rate were varied.

Sieve trays with free area in the range of 6 to 20% and columns of 0.18 m and 0.098 m I.D. were used. The experimental work was carried out using the air - water and air - ethanol solutions systems at room temperature. The experimental results show the conditions of formation of foam type dispersions (Bubbling type and Froth type) as well as the oscillating behaviour of Froths. Foam height, mean gas hold-up and clear liquid height were measured and correlated with geometric parameters (column and hole diameter, and tray free area), physical properties of the systems (viscosity, surface tension and densities of gas and liquid) and flow rate of gas and liquid. The empirical correlations are based on dimensional analysis. Finally a correlation to predict the formation of stable Froth dispersions is presented.

## ÍNDICE GERAL

	PAGINA
Resumo	
CAPÍTULO 1 - Introdução	01
CAPÍTULO 2 - Análise da literatura	04
2.1 - Introdução	05
2.2 - Regimes de fluxo	06
2.2.1 - Borbulhamento	11
2.2.2 - Froth	15
2.2.3 - Spray	17
2.3 - Oscilações da mistura gás-líquido	19
2.4 - Altura de líquido	21
2.5 - Altura da espuma	24
2.6 - Porosidade da mistura gás-líquido	28
2.7 - Queda de pressão	30
2.7.1 - Queda de pressão para o prato seco	30
2.7.2 - Queda de pressão na espuma	31
2.8 - Conclusão	32
CAPÍTULO 3 - Parte experimental	33
3.1 - Equipamentos	34
3.2 - Pratos perfurados	34
3.3 - Sistemas gás-líquido	40
3.4 - Medida da altura de líquido	41
3.5 - Medida da queda de pressão	41
3.6 - Procedimento experimental	41

CAPÍTULO 4 - Resultados experimentais - análise	42
4.1 - Introdução	43
4.2 - Regimes de fluxo	44
4.3 - Oscilações das fases	51
4.4 - Altura de líquido	55
4.5 - Altura da espuma	63
4.6 - Porosidade da mistura gás-líquido	70
4.7 - Queda de pressão total	76
4.8 - Efeito da área livre	84
4.9 - Efeito do diâmetro da coluna	85
4.10 - Efeito da tensão superficial	91
4.11 - Efeito do diâmetro do orifício	113
4.12 - Conclusão	119
CAPÍTULO 5 - Análise dimensional	120
5.1 - Introdução	121
5.2 - Parâmetros fundamentais em dispersões gás-líquido	125
5.2.1 - Altura de líquido	125
5.2.2 - Porosidade da dispersão gás-líquido	128
5.2.3 - Altura da espuma	128
5.2.4 - Velocidade limite de operação estável do regime "froth"	130
5.2.5 - Conclusão	133

	PÁGINA
CAPÍTULO 6 - Conclusões e sugestões	134
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS	138
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS E NÃO CITADAS	139
APÊNDICE A - Cálculos da calibração da placa de orifício	141
APÊNDICE B - Resultados experimentais	146
NOMENCLATURA	159

CAPÍTULO - 1

INTRODUÇÃO

## 1 - INTRODUÇÃO

A Destilação é uma operação que tem sido utilizada, desde o século XI, para a separação de líquidos. Desde então, esta operação tem sido substancialmente aperfeiçoada e no momento é o método industrial mais frequentemente utilizado.

O principal progresso no campo da Destilação, é devido a descoberta da coluna de retificação e do prato com borbulhadores por J.B. Cellier em 1810. Uma outra operação, de características semelhantes à Destilação, frequentemente utilizada para separar os componentes de misturas gás-líquido é a Absorção de gás.

O objetivo do equipamento utilizado nestas operações gás-líquido é proporcionar o contato íntimo entre os dois fluídos de modo a permitir a difusão entre as fases, dos constituintes. Deste modo, a taxa de transferência de massa, depende da superfície interfacial exposta entre as fases, da natureza e do grau da dispersão de um fluído em outro. Entre os diversos tipos de equipamentos de contato gás-líquido e para se obter um bom contato entre as fases durante operações de destilação ou absorção, utilizam-se frequentemente colunas de pratos; nestas, a fase gasosa borbulha através do líquido que está retido no prato. A altas velocidades da fase gasosa, uma espuma é formada e este intenso contato, propicia trocas de calor e massa entre as fases.

Considerando o projeto de uma coluna de pratos, para um dado propósito, um prato ideal deve ser de fácil construção, baixo custo, adaptável a pequenas perturbações que podem ocorrer durante sua operação e permitir operações a altas taxas de produção, com uma boa eficiência de contato a baixas quedas de pressão. A maioria dos pratos utilizados nestas colunas, têm sido aqueles que utilizam vertedores. No entanto, os pratos sem vertedor, são de mais fácil construção, uma vez que requerem apenas a perfuração de pequenos orifícios, são mais baratos e de mais fácil manutenção, além de

3

fornecerem menor queda de pressão do que os pratos convencionais com vertedores.

Verifica-se na literatura, que os pratos que utilizam vertedor têm sido exaustivamente estudados, o mesmo não acontecendo com os que não utilizam vertedor.

Assim, o presente trabalho tem como objetivos:

a) estudar os tipos de dispersões gás-líquido que se formam em pratos perfurados sem vertedor, em função das vazões de gás e de líquido.

b) estudar os tipos de movimentos oscilatórios por parte da mistura gás-líquido e sua influência na estabilização da dispersão.

c) estudar a altura de líquido (clear liquid height), a altura da espuma, a porosidade da dispersão e a queda de pressão, em função das vazões de gás e de líquido.

d) para um dado fluxo de gás e líquido, estudar os efeitos da área livre do prato, do diâmetro da coluna, do diâmetro dos orifícios e da tensão superficial do líquido, sobre os parâmetros acima mencionados.

CAPÍTULO - 2

ANÁLISE DA LITERATURA

## 2.1 - INTRODUÇÃO

Na maioria das operações de destilação ou absorção, colunas de pratos são utilizadas para se obter um bom contato entre as fases líquida e vapor. Quanto ao modo de escoamento do líquido e do gás, os pratos utilizados nestas colunas podem ser classificados em:

- a) pratos com "escoamento cruzado" (com vertedor)
- b) pratos com escoamento em contra-corrente (sem vertedor)

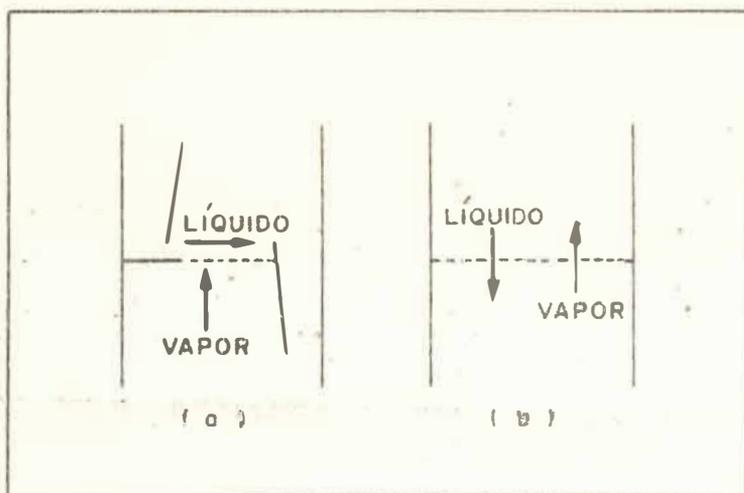


FIGURA ( 2.1 ) Escoamento em pratos perfurados  
( a ) com vertedor ( b ) sem vertedor

Enquanto nos pratos com "escoamento cruzado" (fig. 2.1,a) existem dispositivos em separado para a passagem do líquido (vertedores) e do gás (válvulas, perfurações), nos pratos com escoamento em contra-corrente (fig. 2.1,b) ambos passam através das mesmas aberturas. Este fluxo, ocorre de forma pulsada, com cada abertura deixando passar intermitentemente o líquido e o gás.

Deste modo, a dispersão gás-líquido que é produzida no prato sem vertedor, é de natureza dinâmica e de estado não estacionário, dependendo das vazões de gás e líquido em que este está operando.

Nas seções seguintes do presente capítulo, será feita uma revisão global, das condições de fluxo das dispersões gás-líquido, assim como, das correlações descritas na literatura, para os pratos que não utilizam vertedor. Uma exceção é feita, na seção 2.3, onde o comportamento oscilante das dispersões gás-líquido é descrito para os pratos com vertedor, pois tal descrição não consta na literatura, para os que não utilizam vertedor.

## 2.2. REGIMES DE FLUXO

A faixa de operação de um prato perfurado sem vertedor, caracteriza-se por um limite superior - a inundação e um inferior - a não retenção do líquido no prato. Observações visuais mostram que entre estes limites definidos, existem diferentes regimes de fluxo nos quais nem o líquido nem o vapor é a fase dispersa dominante.

Nos primeiros estudos realizados sobre regimes de fluxo das dispersões gás-líquido, em pratos sem vertedor, Zelinski e Kafarov (8) verificaram que as condições hidrodinâmicas que se desenvolvem nestes pratos, variam dependendo da vazão de líquido e principalmente das velocidades de gás.

A primeira condição hidrodinâmica é caracterizada pelo fato de que não existe retenção de líquido no prato. Is

to ocorre a baixas velocidades de gás, o qual atravessa livremente a porção de área livre dos orifícios, enquanto o líquido drena através do setor restante da mesma área (fig. 2.2,a), contatando o gás somente em sua superfície. Ao longo da área livre existirá então, um fluxo de ambas as fases, em paralelo, através dos mesmos orifícios (fig.2.2,b).

Sob estas condições, a queda de pressão no prato varia com o quadrado da velocidade de gás, a vazão de líquido constante (fig.2.3,(A-B)), enquanto a quantidade de líquido retida no prato é desprezável e de fato, não pode ser medida. Quando a vazão de líquido aumenta, a queda de pressão aumenta na forma de uma série de linhas retas paralelas à queda de pressão no prato seco.

Com o aumento da velocidade de gás através dos orifícios, a força de fricção entre o gás e o líquido que está drenando, aumentará a um valor tal, que uma camada de líquido irá ser formada e retida no prato, (fig.2.4,a,b). Isto ocorrerá a todas as vazões de líquido, desde que a velocidade de gás através dos orifícios permaneça constante.

Para todas as vazões de líquido, a porção de área livre ocupada por ele, será diferente, e a velocidade superficial de gás no ponto de "suspensão" dependerá do arranjo geométrico do prato e da vazão de líquido.

Os pontos correspondentes às velocidades de gás onde o líquido começa a ser retido no prato são chamados "pontos de suspensão" (hold-up). Segundo Rylek e Standart (6) para sistemas ar-água a velocidade superficial de gás no ponto de "suspensão" é de 0.1 a 0.2 m/s.

A "suspensão" do líquido no prato, é acompanhada de um brusco aumento da queda de pressão (fig.2.3,(B-C)), seguida da formação de bolhas nos orifícios, produzindo uma dispersão esparsa gás-líquido, chamada "Borbulhamento".

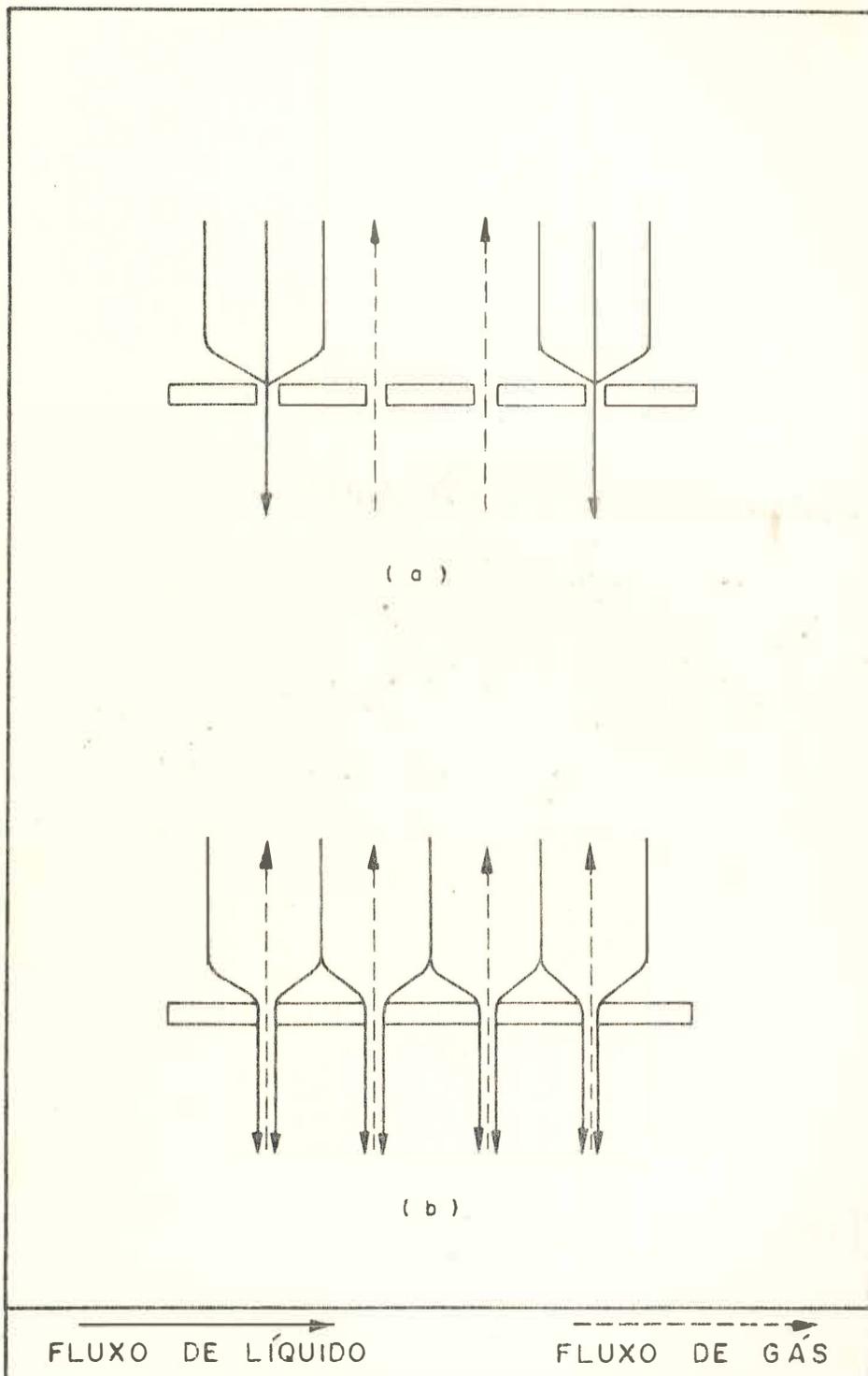


FIGURA ( 2.2 ) Condições de operação de um prato sem vertedor  
Fluxo de líquido e de gás através do prato , sem  
retenção de líquido

[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711 (1964) ]

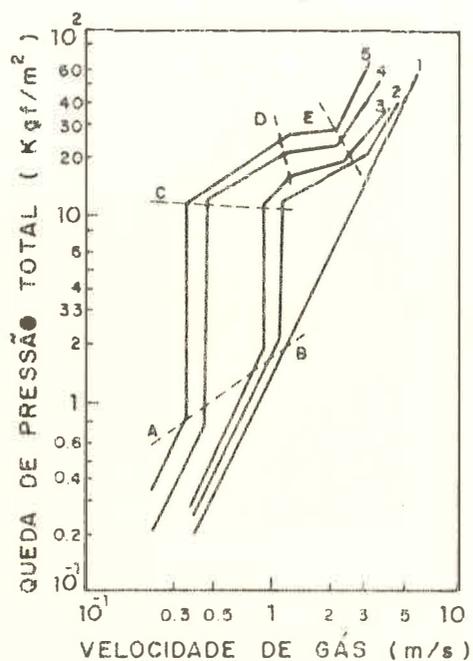


FIGURA ( 2.3 ) Queda de pressão total , para um prato sem vertedor versus velocidade superficial de gás a várias vazões de líquido

1.  $\dot{L}=0$  ( $\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

4.  $\dot{L}=11.200$

2.  $\dot{L}=1650$

5.  $\dot{L}=21.100$

3.  $\dot{L}=3780$

[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711 (1964) ]

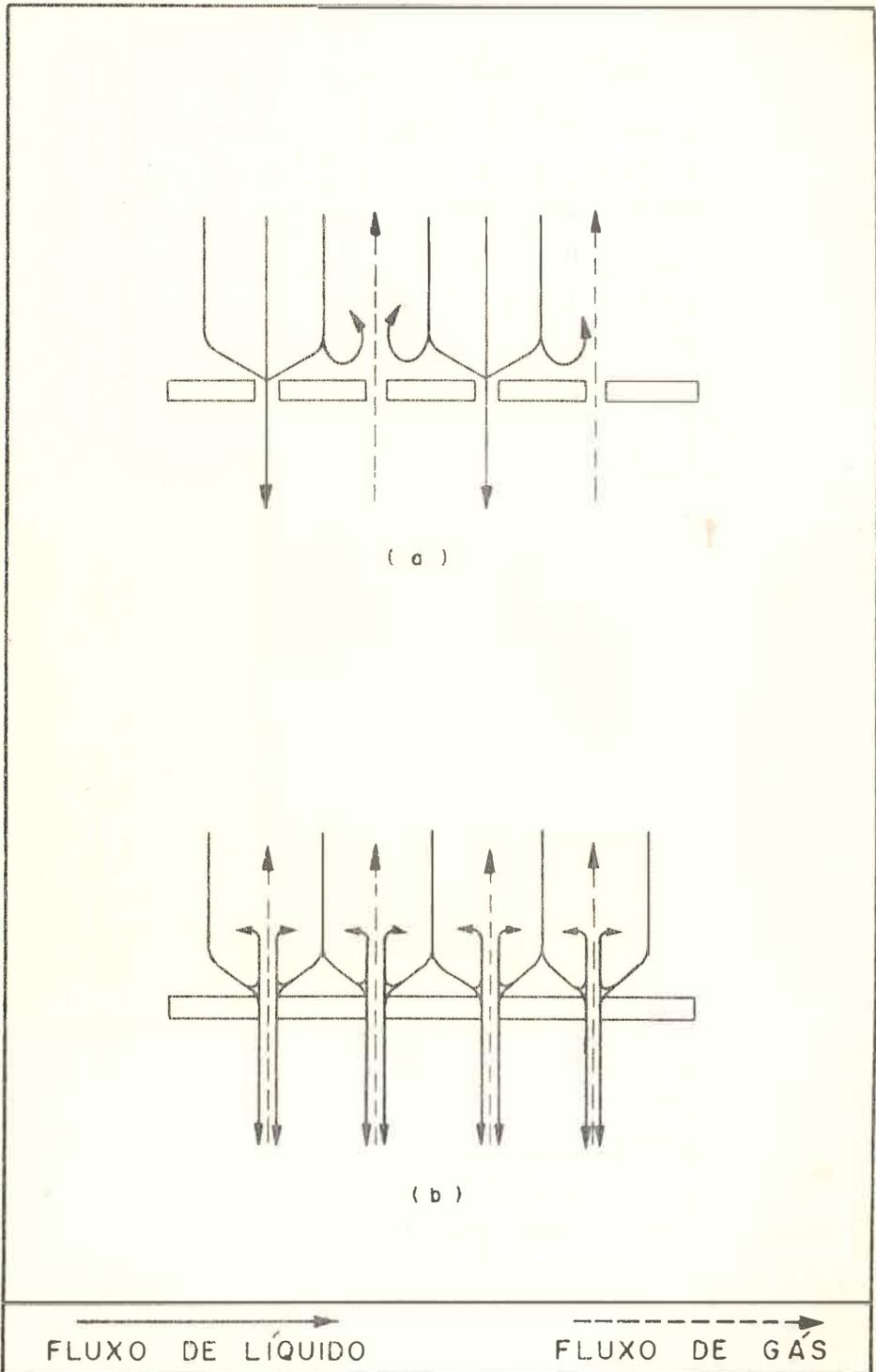


FIGURA ( 2.4 ) Condições de operação de um prato sem vertedor.  
Início da retenção de líquido

[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711 (1964) ]

### 2.2.1 - "BORBULHAMENTO"

Este regime ocorre próximo ao limite de retenção , portanto a vazões de líquido relativamente baixas e caracteriza-se pelo fato de que as bolhas flutuam livremente no líquido, com uma velocidade de 0.1 a 0.4 m/s (6). Quando o gás começa a borbulhar através do líquido, na zona mais próxima ao prato permanece uma camada de líquido, com poucas bolhas passando através dos orifícios; em contraste, a zona logo acima torna-se uma espuma.

● "Borbulhamento" é ilustrado na figura 2.3, iniciando no ponto C. Sob tais condições, a queda de pressão, a altura da espuma e a quantidade de líquido no prato, aumentam com o aumento da velocidade de gás, a vazão de líquido constante (figuras 2.5, 2.6 e 2.7).

Quando a vazão de gás aumenta, a área livre ocupada pelo líquido drenante diminui, aumentando portanto a quantidade de líquido no prato; ao mesmo tempo ocorre um aumento na frequência de formação das bolhas de gás que irão se formar a altas vazões, até que todo o líquido sobre o prato tenha se transformado numa espuma.

Quando a ação borbulhante é iniciada, ocorre um fenômeno de "histeresis", observado pelo fato de que a formação da camada líquida no prato, quando se aumenta a velocidade de gás, a vazão de líquido constante, ocorre a velocidades mais altas que aquelas nas quais o líquido desaparece quando esta mesma velocidade é reduzida. Isto mostra que, a energia da corrente de gás, requerida para a formação de uma camada líquida, é maior que aquela para manter a mesma camada já formada, no prato (8). Se a velocidade de gás é menor que a velocidade de retenção e se uma maior quantidade de líquido é alimentada, a retenção pode ocorrer, e o prato pode então operar mesmo a estas velocidades baixas. Sob tais condições, é necessário ter-se o cuidado de manter um fluxo líquido uniforme e estacionário, quando as velocidades de retenção estão sendo determinadas.

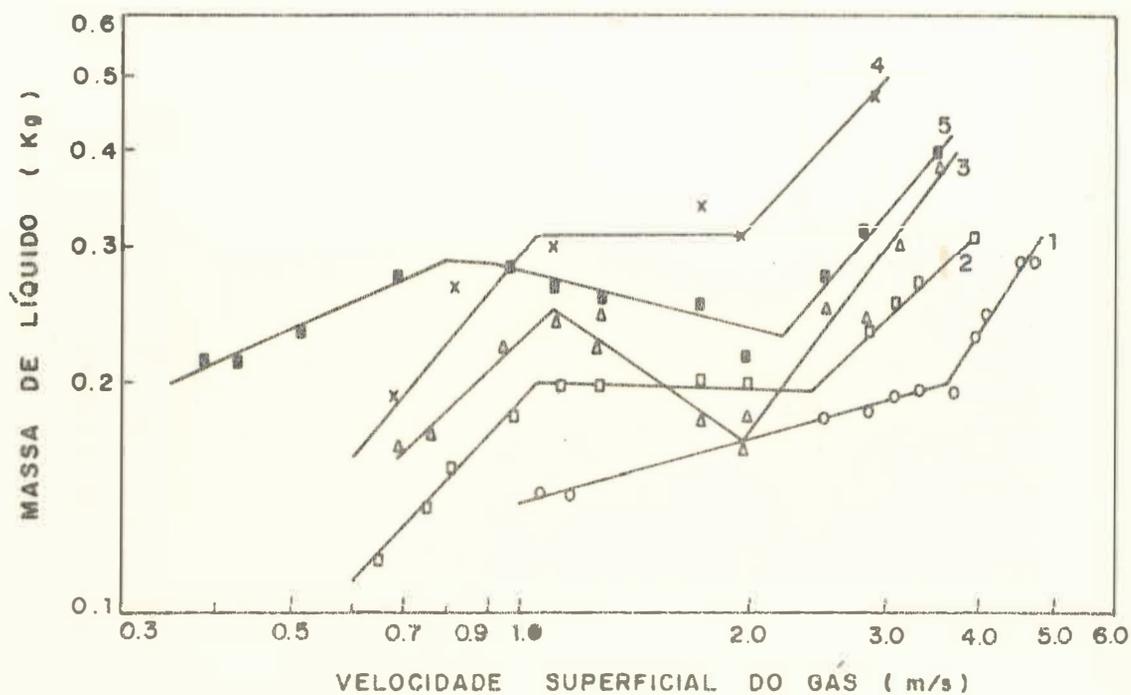


FIGURA ( 2.5 ) Massa de líquido versus velocidade superficial de gás

Vazão de líquido :  $\dot{L} = 8060 \text{ Kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$

1. Área livre = 24.7%

4. 16.2%

2. 20.7%

5. 18.3%

3. 18.1%

[Zelinski, Y.G. e Kafarov, V.V., Int. Chem. Engng 1,74(1961)]

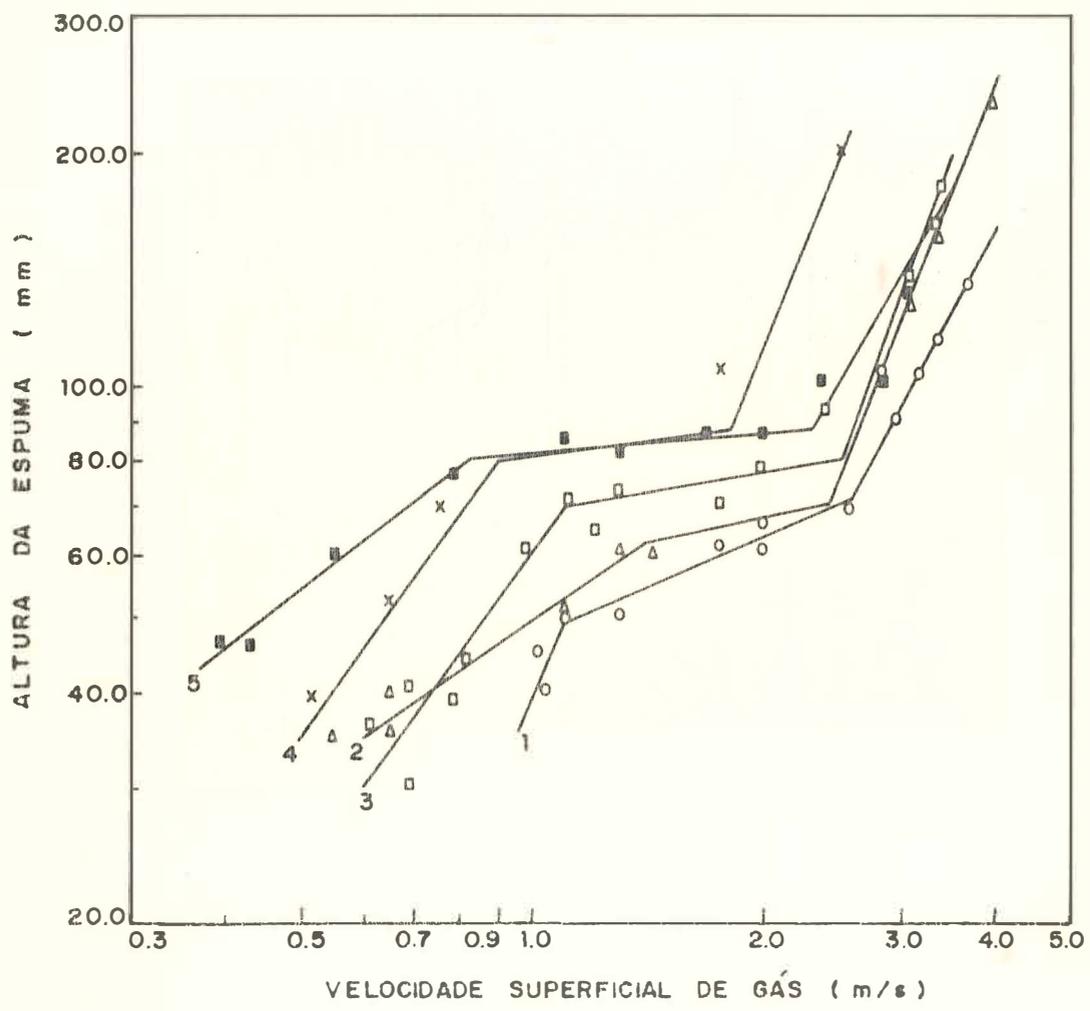


FIGURA (2.6) Altura da espuma versus velocidade superficial de gás  
 Vazão de líquido :  $L' = 8060 \text{ Kg / (h.m}^2\text{)}$   
 1. Área livre = 24.7%                      4. 16.2%  
 2. 20.7%                                      5. 18.3%  
 3. 18.1%

[Zelinski, Y.G. e Kafarov, V.V., Int. Chem. Engng 1,74 (1961)]

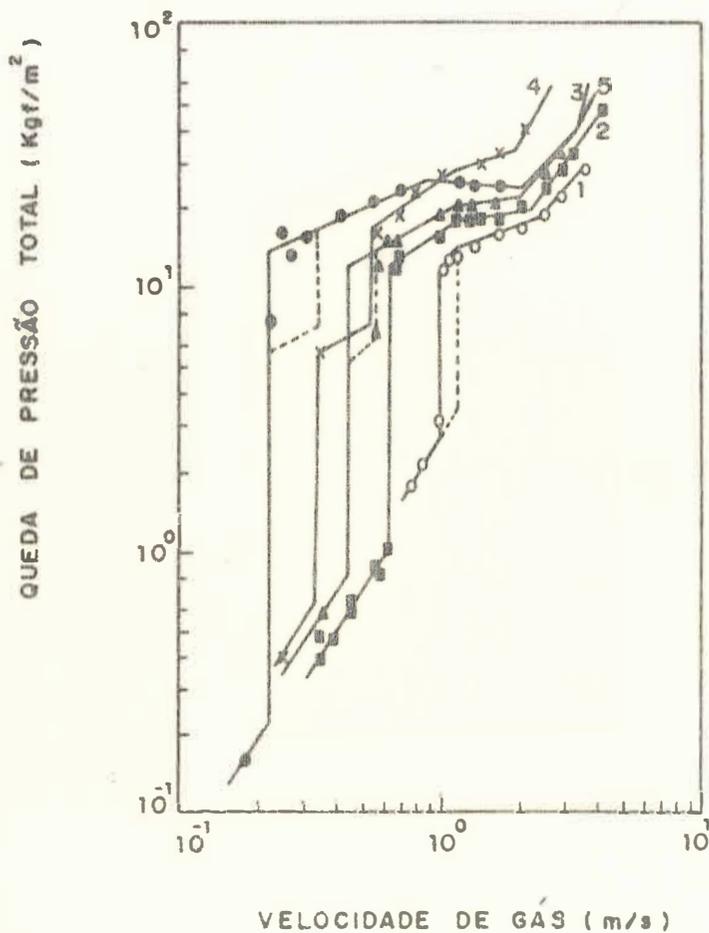


FIGURA (2.7) Queda de pressão total versus velocidade superficial de gás

Vazão de líquido :  $L = 8060 \text{ Kg}/(\text{h.m}^2)$

1. Área livre = 24.7%

4. 16.2%

2. 20.7%

5. 18.3%

3. 18.1%

[Zelinski, Y.G. e Kafarov, V. V., Int. Chem. Engng 1,74 (1961)]

O processo de "Borbulhamento" é completado quando todo o líquido no prato, muda para um estado de espuma turbulenta, devido a acumulação das bolhas na camada líquida. Neste estágio do "Borbulhamento" a espuma possui uma estrutura celular. Em seus estudos, Zelinski e Kafarov (8) verificaram que o início da turbulência na espuma, ocorre a velocidades superficiais de gás de 0.5-0.7 m/s (sistema ar-água) e que, com o aumento gradual desta velocidade (entre 0.5 e 1.0 m/s) a camada de espuma de estrutura celular também aumenta (fig. 2.3-(C-D)). Com o aumento da velocidade até 1.0 m/s, a camada de líquido diminui e a espuma torna-se mais móvel.

Tem início então, um novo regime de fluxo das dispersões gás-líquido, característico pela presença de uma espuma fortemente turbulenta, chamado "espuma móvel" (Froth).

O ponto onde tem início esta transição, é chamado ponto de aeração e a velocidade de gás neste instante é de 1.0 a 1.3 m/s (6).

### 2.2.2 - "FROTH"

Dentro dos limites deste regime, a queda de pressão e a altura da espuma aumentam com a velocidade de gás, a vazão de líquido constante, enquanto a quantidade de líquido pode aumentar em alguns instantes (6). A fase "Froth" difere em sua forma estrutural do "Borbulhamento", devido a que apresenta turbilhões de correntes de pequenas bolhas, correntes de gás e membranas líquidas (fig.2.8).

A forte mistura que se estabelece entre o gás e o líquido durante a fase "Froth", assegura um acentuado aumento na intensidade da transferência de massa e calor comparada com a fase "Borbulhamento".

No estágio final da fase "Froth", a velocidade do gás através dos orifícios aumenta até o ponto onde as bolhas individualmente começam a coalescer, formando correntes de

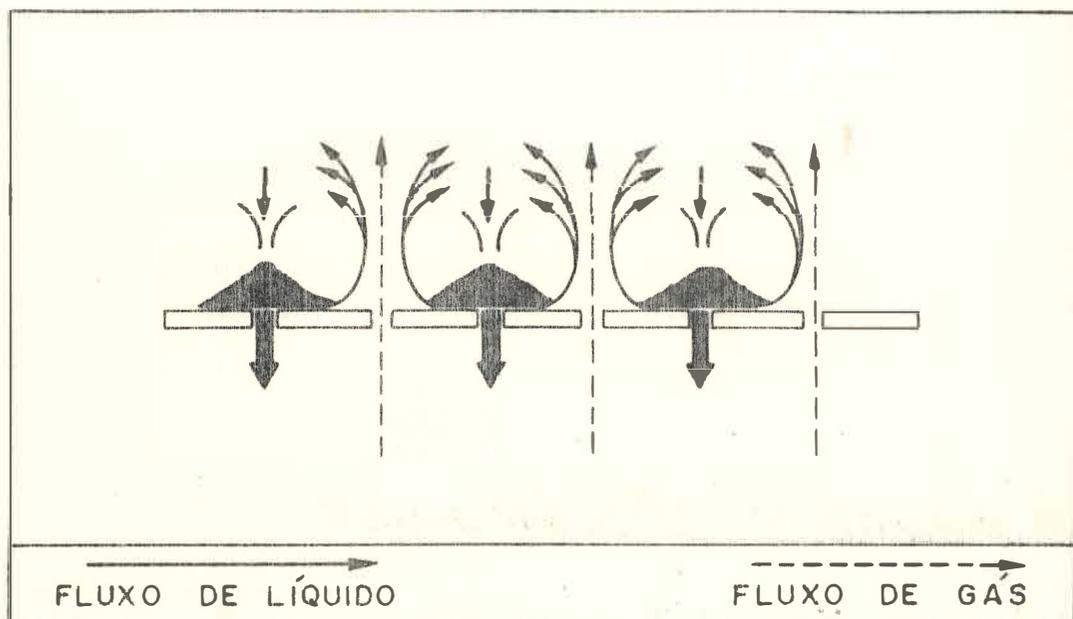


FIGURA ( 2.8 ) Dispersão gás - líquido - tipo "Froth"

[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711(1964) ]

gás, que passando através das várias seções do prato, leva a mistura gás-líquido a oscilar (fig.2.3 (ponto E)).

Durante esta fase, o fluxo líquido através dos orifícios varia bruscamente. A baixas velocidades de gás, o líquido drena a uma taxa uniforme através dos orifícios. Quando a oscilação se estabelece, o líquido é visto fluir em pequenas quantidades através daquelas áreas do prato, que correspondem às regiões móveis da onda da oscilação.

A passagem para a "fase oscilação" é acompanhada pelo aumento acentuado nas alturas da espuma e do líquido e como consequência, a queda de pressão também aumenta (figuras 2.5, 2.6 e 2.7).

A oscilação da mistura é "visível" somente quando a vazão de líquido é baixa e as forças de fricção entre o gás e o líquido são grandes, suficientes para vencer a inércia do líquido no prato. Desta maneira, o líquido tenderá a fluir através das aberturas próximas às paredes da coluna (fig. 2.9).

Quando a velocidade de gás aproxima-se do limite superior da fase "Froth", cada orifício inicia "jatos" ocorrendo então, a mudança de uma dispersão gás em líquido, para uma dispersão líquido em gás - "spray"; este fenômeno é conhecido como inversão de fase, ou transição "Froth-Spray" e é acompanhado de variações no comportamento hidrodinâmico do prato e da transferência de massa. Para o sistema ar-água a velocidade de transição é 3 a 4 m/s (6).

### 2.2.3 - "SPRAY"

Na fase spray, a quantidade de líquido retida no prato aumenta rapidamente, assim como a altura da espuma, até que toda ela, preencha o espaço entre os pratos. Para uma dada vazão de líquido, dependendo das propriedades físicas dos fluidos e das condições de construção do prato, existe uma velocidade de gás definida, na qual o líquido não mais flue

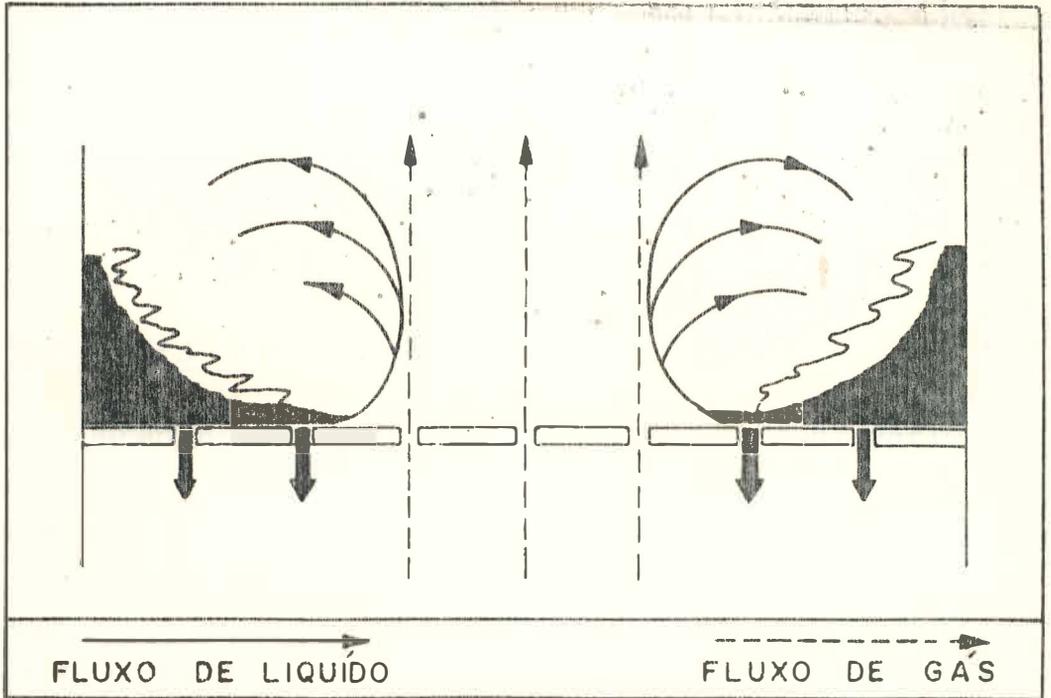


FIGURA ( 2.9 ) Movimento oscilatório da dispersão gás - líquido  
[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711 (1964) ]

através a coluna, sendo interrompido o seu fluxo contra-corrente através dos pratos; nestas condições, a coluna termina por inundar.

A definição dos diferentes regimes de fluxo das dispersões gás-líquido, é única para os vários tipos de pratos perfurados no entanto, suas faixas de ocorrência, variam de um tipo de prato para outro.

Desta maneira, no presente trabalho, serão observados os regimes de fluxos da mistura gás-líquido, estabelecidos durante a operação de um prato perfurado sem vertedor, em função das vazões do gás e do líquido e dos parâmetros geométricos do mesmo.

### 2.3 - OSCILAÇÕES DA MISTURA GÁS-LÍQUIDO

Durante a operação de pratos perfurados, vários autores (4), (5), (6), (8) observaram que sob certas vazões de gás e líquido, a bifase deixa de ser estável, ou seja, de manter-se a uma altura praticamente constante ao longo do prato, para iniciar violentos movimentos laterais perpendiculares ao fluxo líquido. A presença destes movimentos, aumenta significativamente a instabilidade da operação, causando inundação prematura e portanto baixa eficiência do prato.

Em 1974, Biddulph e Stephens (1), utilizando uma coluna de pratos com vertedores ( $D=0.69\text{m}$ ) e sistema ar-água, verificaram que as oscilações aparecem quando de operações a altas vazões de gás e que são criadas por distúrbios turbulentos no seio da bifase. Os mesmos autores, observaram e descreveram dois tipos distintos de oscilação.

No primeiro tipo de oscilação, a mistura gás-líquido se move simultaneamente das paredes da coluna para se encontrar no centro do prato. No movimento inverso a mistura move-se no sentido das paredes, colidindo com as mesmas (fig. 2.10). Se a velocidade de vapor aumenta, a natureza da dis

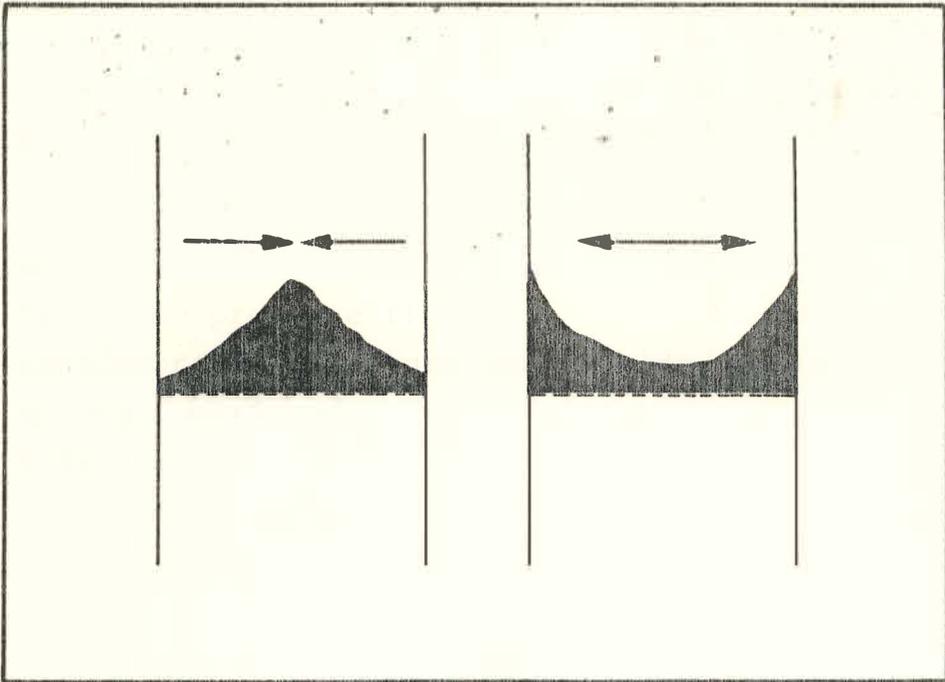


FIGURA (2.10) Oscilação do tipo "Full - wave"

[Biddulph, N. e Stephens D., A.I.Ch.E.J., 21,41(1975)]

persão torna-se algo que confusa, com picos movendo-se nas cercanias do prato e ocasionalmente colidindo com as paredes, causando um "spray" líquido, que é lançado na direção do prato superior. Este tipo de oscilação foi definido como "Full-wave".

Com o gradual aumento da velocidade, um ponto crítico é atingido quando a oscilação torna-se violenta -"slosh" (slosh=dança), de lado a lado, perpendicularmente à direção do fluxo líquido (fig.2.11). Esta forma de oscilação foi definida como "Half-wave".

Segundo Biddulph (2), as oscilações ocorrem quando o comprimento de onda, das "ondas" formadas pela mistura, torna-se igual ao diâmetro da coluna (oscilações "Full-wave") e duas vezes o diâmetro, no caso das oscilações "Half-wave".

Como foi dito anteriormente, estes tipos de oscilações foram observadas durante a operação de pratos perfurados com vertedor. No presente trabalho, serão observados os movimentos oscilatórios da mistura gás-líquido, durante a operação de um prato perfurado sem vertedor, em função de sua geometria e das vazões de gás e de líquido.

#### 2.4 - ALTURA DE LÍQUIDO

A operação, em estado estacionário, de uma coluna de destilação, depende da quantidade de líquido retida em cada prato (3). Na maioria dos trabalhos encontrados na literatura (5), (6), (7) a quantidade de líquido é determinada indiretamente por meio da altura manométrica de líquido e esta por sua vez, é medida através de um manômetro conectado à base, no centro do prato. No caso dos pratos que não utilizam vertedor, esta altura é constante ao longo do prato.

A altura de líquido é uma função das vazões de gás, de líquido, de suas propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do prato. No entanto, não se conhece até o momento

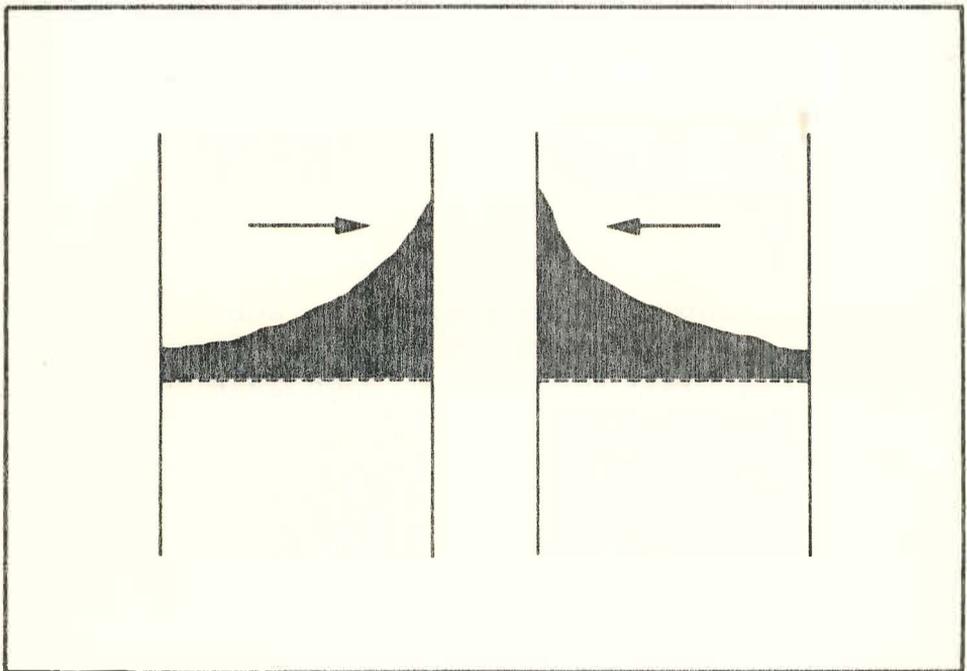


FIGURA ( 2.11) Oscilação do tipo "Half - wave"

[Biddulph, N. e Stephens D., A.I.Ch.E.J., 21,41(1975)]

nenhum método satisfatório para o cálculo desta quantidade em função dos parâmetros citados.

Em 1964, Rylek e Standart (6) apresentaram a seguinte equação para o cálculo da altura de líquido em pratos sem vertedor:

$$h^{0.6} = 2.3 \times 10^4 \frac{H \sigma^{1.3} \mu_L^{0.25}}{\rho_L^{0.25} G^{0.5}} \quad (2.1)$$

Segundo os autores a equação (2.1) é válida para qualquer sistema gás-líquido. Verifica-se nesta equação, a dependência da altura de líquido em relação a vazão de gás ( $h \propto G^{-0.8}$ ) e das propriedades físicas do líquido ( $h \propto \mu_L^{0.4} \rho_L^{-0.4} \sigma^{2.2}$ ); no entanto a altura de líquido é correlacionada em função da altura da espuma, uma variável que também depende das vazões de gás e líquido, de suas propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do prato.

Em 1978, Mahendru e Hackl (5) derivaram a seguinte expressão empírica para o cálculo da altura de líquido:

$$h = 0.065 \frac{L^{*n} \left( v \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_{ar}}} \right)^{0.75}}{\rho_L \phi^{0.5} (T/d)^{0.42}} \quad (2.2)$$

onde  $n = 0.3162 \phi^{-0.25} \quad (2.3)$

Seus dados experimentais foram obtidos em uma coluna de pratos sem vertedor ( $D=0.31m$ ), constituída de dois estágios, utilizando-se como fase gás o ar e como fase líquida, água e soluções de etanol, glicerina e cloreto de cálcio. No entanto,

a equação (2.2) foi derivada apenas para o sistema ar-água e é válida para sistemas pouco ou não espumantes, quando se utiliza pratos sem vertedor com áreas livres na faixa 18-32%.

A altura de líquido é de grande significado para o completo entendimento das condições hidrodinâmicas que se desenvolve no prato; no entanto verifica-se na literatura a escassez de equações que permitam calcular esta quantidade.

## 2.5 - ALTURA DA ESPUMA

A determinação do espaçamento dos pratos (R) em uma coluna, depende da altura da camada expandida, da mistura gás-líquido:

$$R = H + M \quad (2.4)$$

onde, para o caso de pratos sem vertedor, o valor de M é recomendado na faixa 0.08-0.1m. No entanto, verifica-se na literatura, a ausência de equações que permitam calcular a altura da espuma em função das vazões de gás e líquido, de suas propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do prato.

Em seus trabalhos com pratos sem vertedor do tipo grelha, Rylek e Standart (6) mostraram uma relação generalizada da altura da espuma como função da velocidade de gás no orifício, para uma dada taxa e propriedades físicas definidas, do fluxo líquido. Os autores discutiram então, as condições hidrodinâmicas do prato por meio de um diagrama logaritmico da altura da espuma versus velocidade de gás no orifício (fig. 2.12).

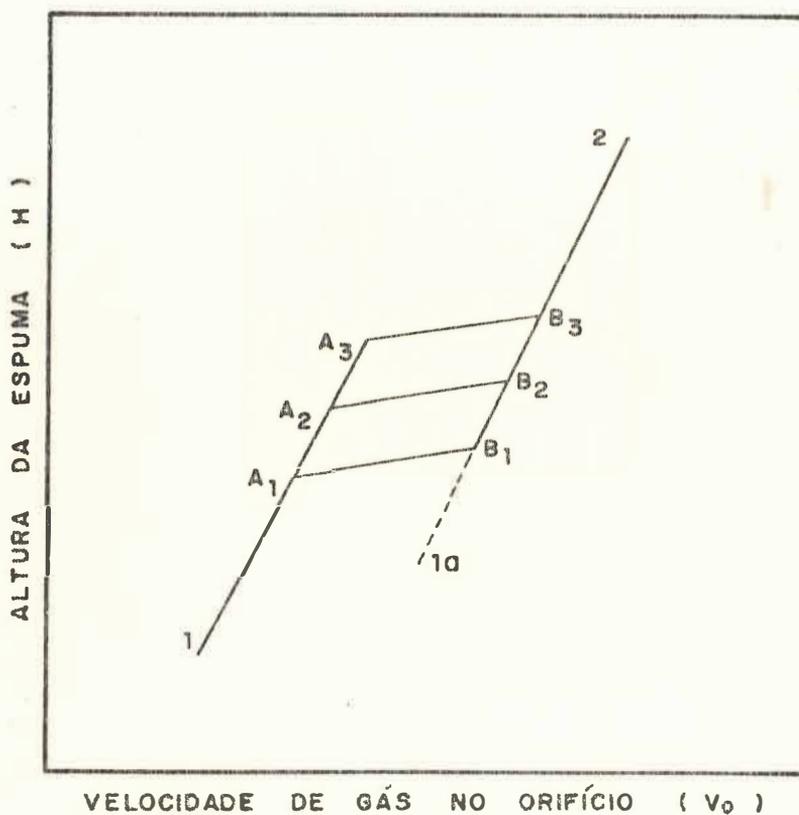


FIGURA ( 2.12 ) Altura da espuma como função logarítmica da velocidade de gás no orifício

[ Rylek, M. e Standart, G., Int. Chem. Engng 4,711 (1964) ]

Rylek e Standart (6) verificaram que a baixos valores de  $v_0$ , a altura da espuma aumenta com o quadrado da velocidade de gás (fig. 2.12, 1-A), de acordo com a equação  $H = C_1 v_0^2$ , onde  $C_1$  é uma constante. Durante este aumento de  $v_0$  a algum dos pontos  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , cuja posição é determinada pelos valores do diâmetro equivalente do orifício e da vazão de líquido, a estrutura da espuma também varia.

Com um aumento adicional da velocidade de gás, tem início uma segunda fase, na qual a altura da espuma aumenta apenas levemente. Nesta fase, a energia da corrente de gás é absorvida principalmente pelas mudanças que ocorrem na estrutura da espuma.

Nos pontos  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ , toda a espuma transforma-se em um sistema de gotas e membranas líquidas, suspensas na corrente de gás. Inicia-se então, a segunda função quadrática (figura 2.12, linha B-2), que é descrita pela equação  $H = C_2 v_0^2$ , onde  $C_2$  é também uma constante.

Os autores verificaram, no entanto, que os pratos com altos diâmetros equivalentes de aberturas e altas áreas livres, não apresentam tais relações. Neste caso, a segunda função quadrática (figura 2.12, linha 1a-2) já se faz presente a baixos valores de  $v_0$ .

Considerando os pontos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  como correspondentes as variações nas condições hidrodinâmicas na coluna, Rylek e Standart (6) sugeriram ser possível utilizar a seguinte equação para a sua determinação:

$$Y = Be^{-4x} \quad (2.5)$$

onde

$$Y = \frac{v^2}{gd_e \phi^2} \frac{\rho_G}{\rho_L} \left( \frac{\mu_L}{\mu_{H_2O}} \right)^{0.16} \quad (2.6)$$

e

$$x = \left( \frac{L}{G} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8} \quad (2.7)$$

Os autores determinaram que para as vazões de gás e líquido correspondentes a condições operacionais estáveis (ponto de retenção)  $B = 2.95$  e para as vazões correspondentes ao final da fase de operação estável (ponto de inundação),  $B = 10$ , para pratos sem vertedor, tipo grelha.

Com base nos valores de  $B$ , Rylek e Standart (6) propuseram as seguintes equações, válidas para os respectivos intervalos, para o cálculo da altura da espuma.

$$Fr \cdot \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \cdot C = 3.25 \times 10^{-3} \quad B \leq 2.95 \quad (2.8)$$

$$Fr \cdot \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \cdot C = 1.10 \times 10^{-3} \quad B \quad 2.95 \leq B \leq 10.0 \quad (2.9)$$

$\phi \leq 0.15$   
 $d_e \leq 6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$Fr \cdot \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \cdot C = 1.10 \times 10^{-3} \quad B \geq 10.0 \quad (2.10)$$

$\phi \geq 0.30$   
 $d_e \geq 12.0 \times 10^{-3} \text{ m}$

onde

$$Fr = \frac{v_o^2}{gH} \quad (2.11)$$

$$C = \left( \frac{L^2 \mu_L^2}{\rho_L \sigma^3} \right) \quad (2.12)$$

Rylek e Standart (6) denominaram o fator B de índice de condições hidrodinâmicas nos pratos sem vertedor.

Da literatura, verifica-se apenas a correlação citada, para o cálculo da altura da espuma, obtida para pratos sem vertedor do tipo grelha. No presente trabalho, a altura da espuma será medida experimentalmente, sendo analisada a sua dependência em relação às vazões de gás e de líquido e aos parâmetros geométricos do prato.

## 2.6 - POROSIDADE DA MISTURA GÁS-LÍQUIDO

Estudos recentes sobre as características da transferência de massa das colunas de pratos sem vertedor, mostram que a medida da porosidade da mistura gás-líquido é necessária, para uma melhor avaliação dos coeficientes de transferência de massa dos filmes líquido e gasoso.

A porosidade é definida como a razão entre o volume ocupado pelas bolhas de gás e o volume da dispersão, e é usualmente medida por meio da altura da espuma (H) e da altura de líquido (h):

$$\epsilon = \frac{H - h}{H} \quad (2.13)$$

A maioria dos autores (5), (6), (7) correlacionam a porosidade em função da velocidade superficial de gás. Dos dados disponíveis na literatura, verifica-se que a porosidade aumenta com o aumento da vazão de gás enquanto sua dependência em relação a vazão de líquido é pequena e pode ser desprezada (7).

Rylek e Standart (6) mediram experimentalmente a porosidade, utilizando colunas de pratos sem vertedor (tipo grelha) com diâmetros na faixa 0.12 - 1.0 m e áreas livres de 7 a 33%. Verificaram que com o aumento da vazão de gás, a

vazão de líquido constante, a altura da espuma aumenta, assim como a porosidade da mistura.

Os autores derivaram então, a seguinte equação para o cálculo da porosidade:

$$\epsilon = 1 - \frac{0.21}{\phi^{0.5}} \left[ \frac{g.H}{v_G^2} \right]^{0.2} \quad (2.14)$$

A equação (2.14) mostra claramente, que a porosidade da mistura aumenta com o aumento da área livre do prato, para a mesma velocidade de gás.

Trabalhando com colunas de pratos perfurados sem vertedor, Mahendru e Hackl (5) mediram a porosidade para várias misturas gás-líquido. Analisando os fatores que influenciam a expansão da camada gás-líquido e baseados na teoria da análise dimensional, os autores derivaram a seguinte equação:

$$\epsilon = 1 - 0.0946 \left[ \frac{v^2}{g.h} \cdot \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \right]^{-0.2} \quad (2.15)$$

onde a altura de líquido (h) é calculada através da equação (2.2), também proposta por estes autores. Mahendru e Hackl (5) verificaram que com o aumento da velocidade de gás, a vazão de líquido constante, a altura de líquido aumenta, aumentando também a porosidade da mistura.

A porosidade é uma das características básicas do processo de contato gás-líquido, no entanto poucos autores se propõem a estudá-la ou mesmo correlacioná-la em termos das vazões de gás e de líquido, das propriedades físicas da mistura e dos parâmetros geométricos do prato.

No presente trabalho, para a operação de um prato perfurado sem vertedor, a porosidade será determinada através da equação (2.13), sendo analisada a sua dependência em relação às vazões de gás e líquido e aos parâmetros geométricos do prato.

## 2.7 - QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão de um gás fluindo através de um prato perfurado, representa uma vantajosa conversão de energia, a qual é gasta no estabelecimento da superfície de contato entre o gás e o líquido, permitindo deste modo a transferência de massa entre as fases (6).

A queda de pressão total ( $\Delta P$ ) é definida como a diferença de pressão entre os espaços de gás acima e abaixo do prato e frequentemente, é dada como a soma da queda de pressão para o prato seco ( $\Delta P_d$ ), da queda de pressão na espuma ( $\Delta P_e$ ) e da queda de pressão devido a tensão superficial do líquido ( $4 \sigma/d$ ):

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_e + \frac{4\sigma}{d} \quad (2.16)$$

### 2.7.1 - QUEDA DE PRESSÃO PARA O PRATO SECO ( $\Delta P_d$ )

A queda de pressão para o prato seco, é a queda de pressão do gás fluindo através do prato, quando a vazão de líquido é nula.

Trabalhando com uma coluna de 0.38 m de diâmetro, Rylek e Standart (6) mediram a queda de pressão para o prato seco, na faixa de diâmetros do orifício,  $d = 1.5 \times 10^{-3} - 9.5 \times 10^{-3}$  m e obtiveram a seguinte equação:

$$\Delta P_d = K_o v_o^{1.8} \quad (2.17)$$

onde  $K_o$  é um coeficiente dimensional. Para diferentes valores da área livre, a espessura do prato constante, estes autores verificaram que a relação entre  $K_o$  e  $d$  é linear.

De acordo com Mahendru e Hackl (5) a queda de pressão para o prato seco pode ser calculada utilizando-se o seguinte método:

$$\Delta P_d = K v_o^{1.8125} \quad (2.18)$$

onde K é uma função da geometria do prato e pode ser determinada através das seguintes equações:

$$K = 3.92 \rho_G K_1 C_o$$

$$K_1 = 0.395 (P/d)^{0.425} \quad \{1.75 \leq P/d \leq 3\}$$

$$K_1 = 0.047 (P/d)^{4.25} \quad \{1.50 \leq P/d \leq 1.75\}$$

$$C_o = -0.362 (T/d) + 0.681 \quad \{0.333 \leq T/d \leq 0.9\}$$

$$C_o = 0.0677 (T/d) + 0.298 \quad \{0.9 \leq T/d \leq 1.288\}$$

### 2.7.2 - QUEDA DE PRESSÃO NA ESPUMA ( $\Delta P_e$ )

A queda de pressão na espuma é a diferença de pressão entre a superfície do prato e o espaço de gás acima da espuma.

Através da equação de Bernoulli, Rylek e Standart (6) mostraram que a queda de pressão na espuma pode ser calculada segundo a equação:

$$\Delta P_e = \rho_L \cdot gh \quad (2.19)$$

Segundo os autores, esta expressão é válida para o cálculo de  $\Delta P_e$  para o caso de pratos que utilizam ou não

vertedor, e tem sido desde então a única equação utilizada na determinação da queda de pressão na espuma (9); no entanto nada se sabe, especificamente, a respeito dos pratos perfurados sem vertedor.

Zelinski e Kafarov (8) estudaram a queda de pressão para os pratos do tipo grelha e verificaram que o diâmetro da coluna influencia fortemente no valor de  $\Delta P$ . Segundo estes autores, a diminuição do diâmetro da coluna causa violentas flutuações na queda de pressão, devido a presença de fortes pulsações da mistura gás-líquido, na direção vertical ao prato.

No presente trabalho, a queda de pressão será medida experimentalmente, sendo então analisada a sua dependência em relação aos parâmetros geométricos do prato e das vazões de gás e de líquido.

## 2.8 - CONCLUSÃO

No presente capítulo foi feita uma revisão da literatura sobre as dispersões gás - líquido formados em pratos perfurados sem vertedor e sobre os parâmetros que a caracterizam, tais como a altura de líquido e da espuma, porosidade da mistura gás - líquido e queda de pressão.

Pela análise das relações apresentadas conclui-se que os trabalhos que têm sido realizado sobre os pratos sem vertedor e do tipo "grelha" (Gridtray) não foram amplos no sentido de que não foram estudados os efeitos de muitos parâmetros importantes para o comportamento das dispersões gás - líquido, tais como a área livre do prato, o diâmetro da coluna, o diâmetro dos orifício e propriedades físicas do sistema.

É relevante portanto, um trabalho que relacione as características das dispersões gás - líquido formados em pratos perfurados sem vertedor em função das vazões de gás e líquido, dos parâmetros geométricos do prato e das propriedades físicas do sistema.

CAPÍTULO - 3

PARTE EXPERIMENTAL

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os equipamentos e os sistemas gás-líquido utilizados, assim como o procedimento experimental do presente trabalho.

#### 3.1 - EQUIPAMENTOS

Os experimentos foram realizados em duas colunas (diâmetros internos de 0.18 m e 0.098 m) constituídas de um único estágio. As colunas eram de vidro de modo a permitir uma observação visual das características da dispersão gás-líquido formada.

As figuras 3.1 a 3.4 ilustram a montagem experimental utilizada.

Para a circulação de ar através da coluna, utilizou-se um soprador de 4CV, marca IBRAIM. Para evitar o superaquecimento do ar, o mesmo foi resfriado através de um resfriador de ar-condicionado, instalado à saída do soprador.

O fluxo de ar foi medido utilizando-se placas de orifício (conectada à entrada do soprador), de 27.5 e 15.7 mm de diâmetro, esta última para experiências com as menores vazões de ar. Ambas as placas foram previamente calibradas com um tubo de Pitot, apresentando-se em apêndice A os resultados da calibração.

Para a circulação do líquido, utilizou-se uma bomba centrífuga com motor de indução "Mallory".

O fluxo líquido foi medido utilizando-se rotâmetros Q-Flow por nós calibrados.

#### 3.2 - PRATOS PERFURADOS

A tabela 3.1 fornece os dados geométricos dos pratos perfurados utilizados. Os pratos foram construídos utilizando-se latão de espessura 2.1 mm e os orifícios foram perfurados em arranjo triangular. Os furos não foram chanfrados.

As figuras 3.5 a,b mostram as fotografias dos pratos utilizados.

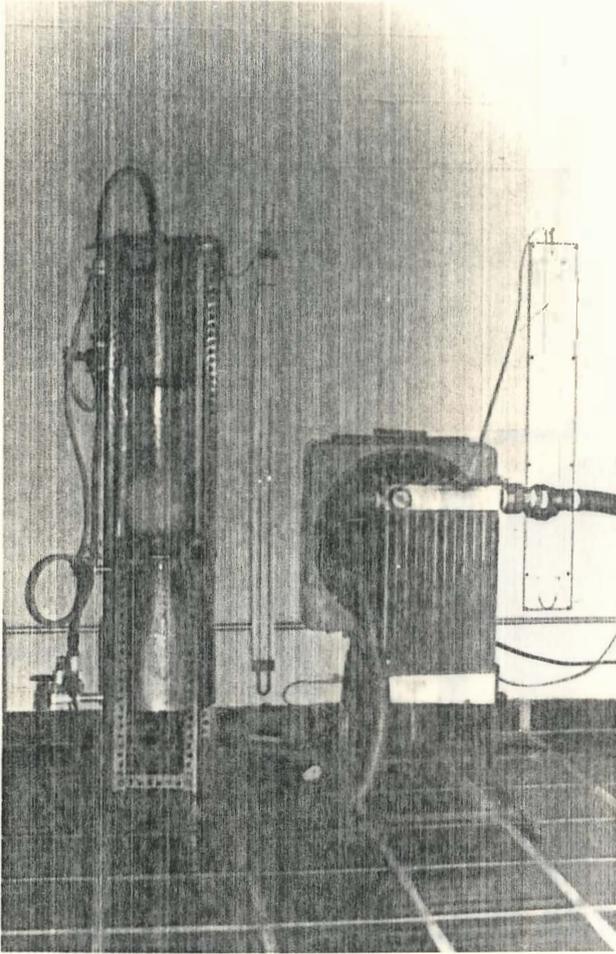


FIGURA 3.1 - COLUNA DE 0.18 m DE DIÂMETRO.

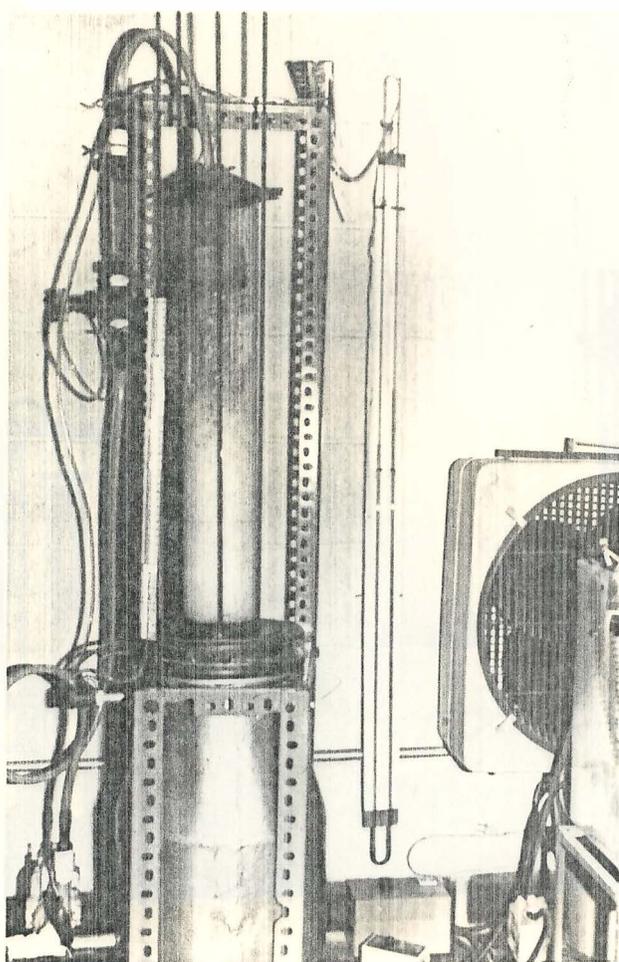


FIGURA 3.2 - COLUNA DE 0.098 m DE DIÂMETRO.

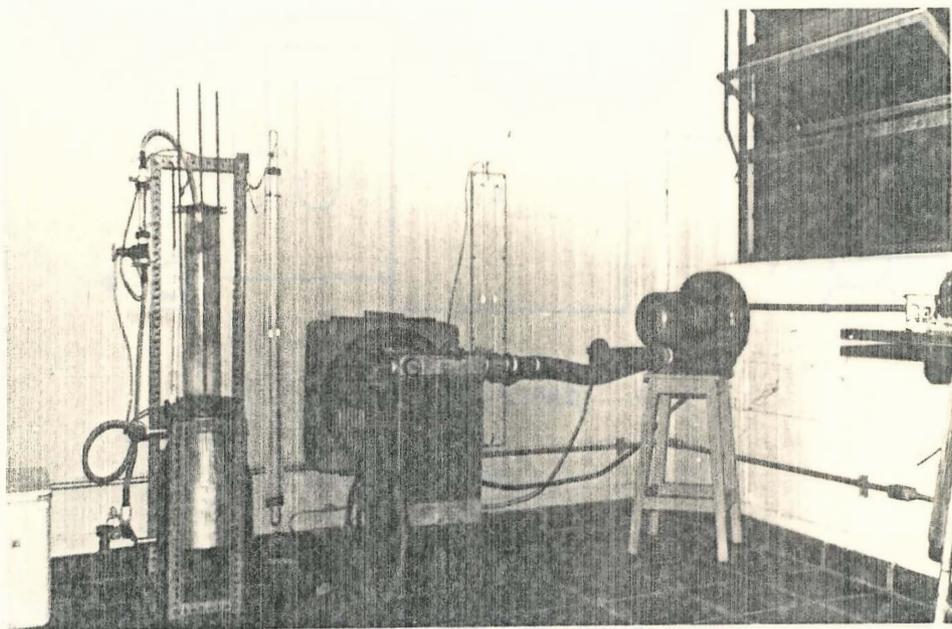
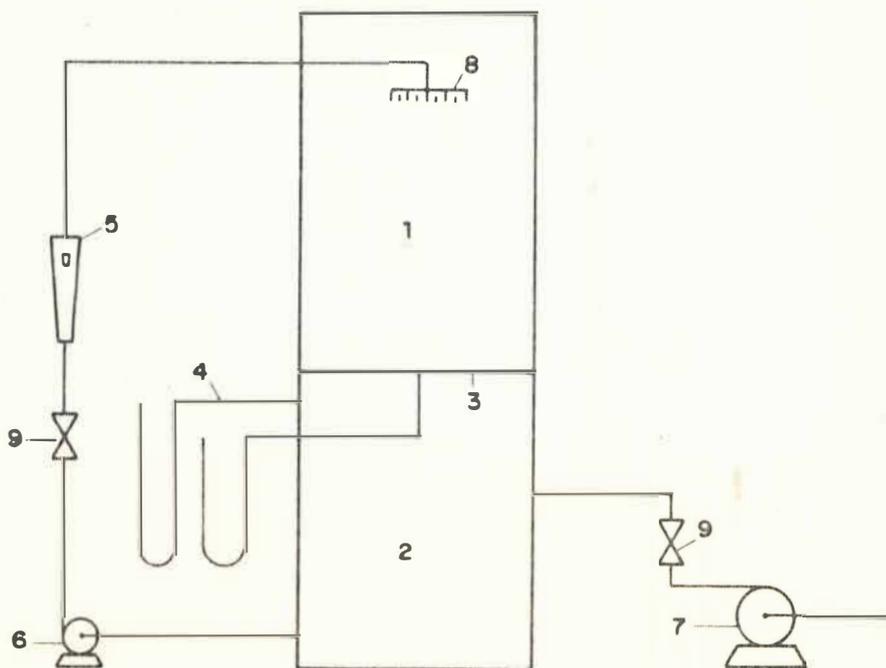


FIGURA 3.3 - MONTAGEM DAS COLUNAS UTILIZADAS.

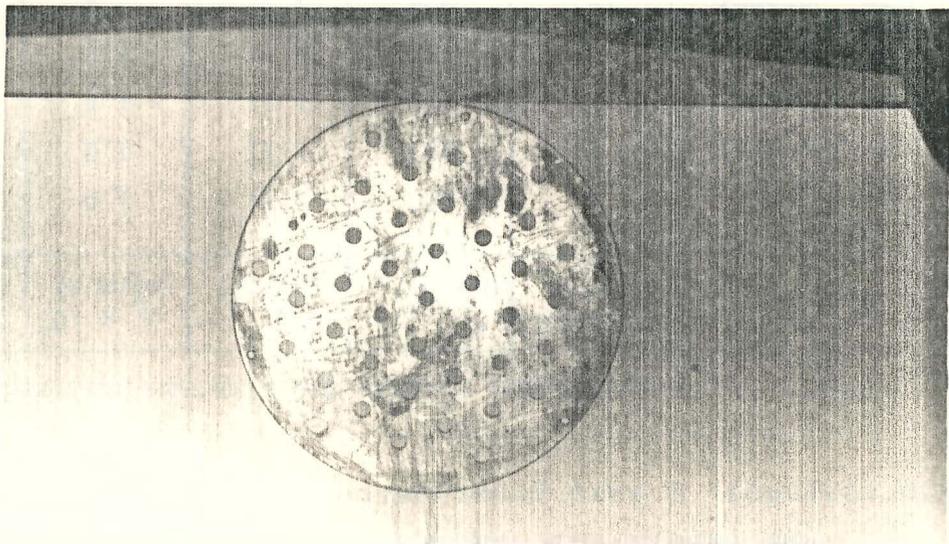


- 1 - COLUNA DE VIDRO
- 2 - RESERVATÓRIO
- 3 - PRATO PERFURADO
- 4 - MANÔMETROS DE ÁGUA
- 5 - ROTAMETRO
- 6 - BOMBA
- 7 - SOPRADOR
- 8 - DISPERSOR
- 9 - VÁLVULAS

FIGURA 3.4 - ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL.

FIGURA 3.5 - PRATOS PERFURADOS UTILIZADOS.

(b)



(a)

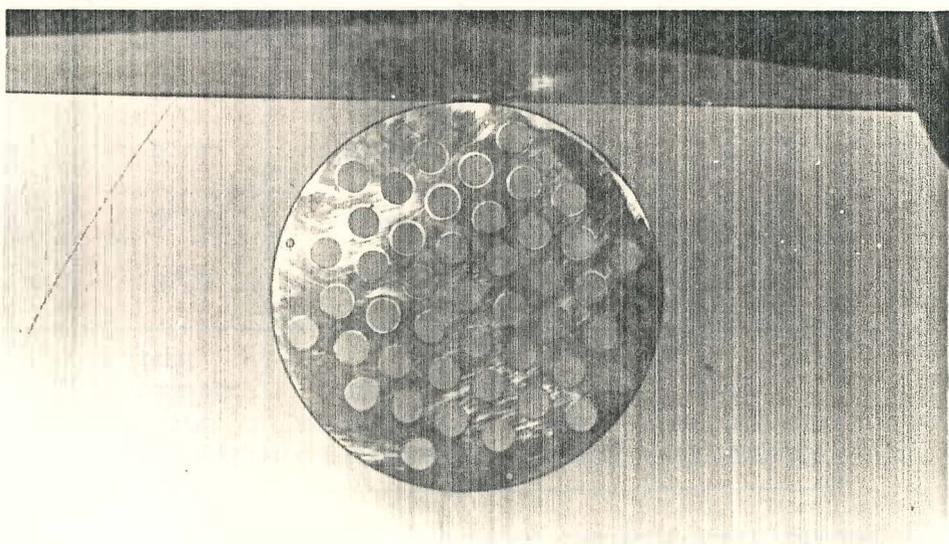


Tabela 3.1. Detalhes geométricos dos pratos perfurados

	Diâmetro do prato (mm)	Número de Orifícios	Diâmetro dos Orifícios (mm)	Espaçamento entre Orifícios (mm)	Área Livre (%)
1.	180.0	43	6.9	22.0	6.4
2.	180.0	43	8.9	22.0	10.5
3.	180.0	43	10.7	22.0	15.2
4.	180.0	43	12.2	22.0	20.0
5.	98.0	13	10.7	22.0	15.2
6.	180.0	403	3.5	0.70	15.2

### 3.3. SISTEMAS GÁS-LÍQUIDO

Na tabela 3.2. são relacionados os sistemas gás-líquido testados, e suas propriedades físicas.

Tabela 3.2. Propriedades físicas dos sistemas utilizados

Sistema	Conc. Mol. Etanol (%)	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_G$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_L \times 10^3$ (kg/m.s)	$\sigma \times 10^3$ (N/m)
Ar - água	-	1000	1.11	1.0	72.0
Ar - etanol	1	993	1.11	1.2	65.0
Ar - etanol	3	985	1.11	1.4	53.0
Ar - etanol	5	980	1.11	1.7	45.0
Ar - etanol	15	926	1.11	2.4	29.5

### 3.4 - MEDIDA DA ALTURA DE LÍQUIDO

A altura de líquido foi medida através de um manômetro conectado à base e localizado no centro, do prato, conforme a figura 3.6 .

### 3.5 - MEDIDA DA QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão através do prato e da dispersão, foi medida por meio de um manômetro conectado 2.5 cm, abaixo da base do prato.

### 3.6 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para diferentes pares de vazões de gás e líquido , aguardou-se que a mistura atingisse o estado estacionário, medindo-se então a altura de líquido, a altura da espuma e a queda de pressão. A seguir foram anotados os aspectos da dispersão gás-líquido, assim como os tipos de oscilações observadas.

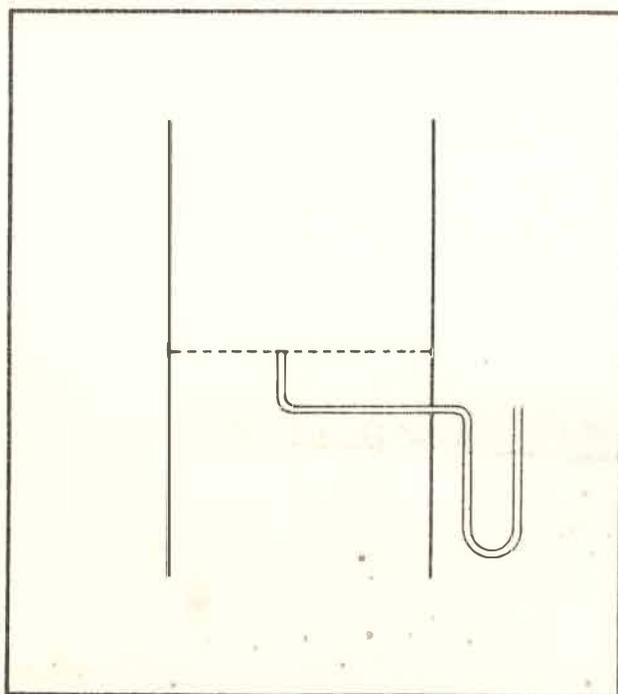


FIGURA 3.6 - INSTALAÇÃO DO MANÔMETRO PARA MÊDIDA DA ALTURA DE LÍQUIDO (CLEAR LIQUID HEIGHT).

## CAPÍTULO - 4

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS - ANÁLISE

#### 4.1 - INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos no estudo das dispersões gás - líquido em pratos perfurados sem vertedor. Foram utilizadas duas colunas de diâmetros 0.18 e 0.098 m , tendo-se variado a área livre de escoamento dos pratos na faixa 6 a 20%. Os sistemas gás - líquido utilizados foram ar - água e ar - soluções de etanol.

Apresentaremos um estudo dos tipos de dispersões formados em pratos perfurados sem vertedor, dos movimentos oscilatórios presentes nestas dispersões e dos parâmetros que a caracterizam, tais como altura de líquido, da espuma, porosidade, queda de pressão em função das vazões de gás e líquido, dos parâmetros geométricos dos pratos.

## 4.2 - REGIMES DE FLUXO

Nesta seção, são apresentadas as observações visuais do aspecto da mistura gás-líquido. Estas observações, foram registradas quando os valores das alturas de líquido e da espuma, e da queda de pressão, assim como o próprio aspecto da dispersão, atingiam o estado estacionário.

As tabelas 4.1 a 4.4 mostram os regimes de fluxo das dispersões gás-líquido, observados para todos os pratos estudados.

No prato com 6% de área livre (tabela 4.1), o "Borbulhamento" esteve presente para todas as vazões de líquido estudadas ( $L = 22.2 - 50.7$  kg/h), até uma vazão de gás  $G \approx 48.6$  kg/h. Nestas regiões, o aspecto da dispersão era o de uma espuma, com estrutura celular, cuja turbulência aumentava, com o aumento da vazão de líquido. A partir de  $G = 48.6$  kg/h, a espuma apresentava uma forte turbulência e movimentos oscilatórios, caracterizando o início da fase "Froth".

No caso do prato com 10% de área de escoamento (tabela 4.2), para as vazões  $L = 63.0$  kg/h e  $G = 28.4$  kg/h, não houve retenção de líquido no prato. Com o aumento da vazão de gás, a  $L = 63.0$  kg/h, uma camada de líquido foi formada, dando início a "ação borbulhante" no prato. Desta forma para  $L = 63.0$  kg/h e  $G = 34.6$  a  $44.6$  kg/h o regime de fluxo foi o correspondente ao início do processo de "Borbulhamento". Para a vazão de líquido  $L = 135.0$  kg/h o "Borbulhamento" esteve presente até  $G \approx 34.6$  kg/h, quando a espuma tornava-se fortemente turbulenta e com movimentos oscilatórios - fase "Froth". Para as vazões  $L = 231.1$  e  $330.1$  kg/h e  $G = 28.4$  a  $44.6$  kg/h a dispersão gás-líquido era do tipo "Froth", com movimentos oscilatórios mais acentuados.

No prato com 15% de área livre (tabela 4.3) para  $L = 180.0$  kg/h e  $G = 34.6$  a  $44.6$  kg/h, não houve retenção de líquido no prato. A partir de  $G = 44.6$  kg/h a dispersão era

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg / h )	VAZÃO DE GÁS ( Kg/h )			
	28.4	40.0	48.6	63.4
22.2	B	B	F	F
27.6	B	B	F	F
39.1	B	B	F	F
50.7	B	B	F	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"				

TABELA ( 4.1 ) Regimes de fluxo

Sistema : ar - água

Prato : D=0.18m, Área livre=6%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS (Kg/h)			
	28.4	34.6	40.0	44.6
63.0	-	B	B	B
135.0	B	B	F	F
231.1	F	F	F	F
330.1	F	F	F	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"				

TABELA (4.2) Regimes de fluxo

Sistema : ar - água

Prato : D=0.18m, Área livre=10%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS ( Kg/h )				
	34.6	40.0	44.6	48.6	63.4
180.0	—	—	B	B	B
231.1	—	B	B	B	F
281.9	B	B	B	B	F
330.1	B	B	F	F	—
443.9	B	F	F	F	—
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"					

TABELA (4.3) Regimes de fluxo

Sistema : ar - água

Prato : D=0.18m, Área livre = 15%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS ( Kg/h )				
	63.4	79.9	90.7	110.9	128.2
63.0	-	-	B	F	F
96.1	-	-	B	F	F
135.0	-	B	B	F	F
180.0	-	B	B	F	F
231.1	-	B	F	F	F
281.9	B	B	F	F	F
384.1	B	-	F	F	-
443.9	B	-	F	F	-
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"					

TABELA (4.4) Regimes de fluxo

Sistema : ar - água

Prato : D=0.18m , Área livre = 20%

do tipo "Borbulhamento", constituindo-se apenas em uma camada líquida, através da qual as bolhas de gás fluíam verticalmente. Para  $L = 231.1$  kg/h, o líquido começou a ser retido no prato a partir de  $G = 40.0$  kg/h, quando se iniciou o "Borbulhamento". Entre  $G = 40.0$  e  $63.4$  kg/h ( $L = 231.1$  kg/h) a quantidade de espuma aumentou, assim como a turbulência, não deixando porém as características de borbulhamento. Finalmente a  $G = 63.4$  kg/h a espuma adquiriu um aspecto altamente turbulento, iniciando-se os movimentos oscilatórios, o que caracteriza a fase "Froth".

Para  $L = 281.9$  a  $443.9$  kg/h o "Borbulhamento" já estava presente quando  $G = 34.6$  kg/h. Para a vazão  $L = 281.9$  kg/h, este tipo de dispersão persistiu até  $G = 63.4$  kg/h, quando mudou para uma espuma turbulenta, com movimentos oscilatórios.

Para as vazões  $L = 330.1$  e  $L = 443.9$  kg/h, a transição entre a fase "Borbulhamento" e a fase "Froth" ocorreu a  $G = 44.6$  e  $G = 40.0$  kg/h, respectivamente. Para estas duas últimas vazões de líquido, não foi possível operar a coluna, quando a vazão de gás era de  $63.4$  kg/h. A esta vazão de gás, a forte turbulência no interior da mistura, causou um arraste excessivo de líquido, assim como vibrações por parte da coluna.

No caso do prato com 20% de área livre (tabela 4.4), para as vazões  $L = 63.0$  e  $96.1$  kg/h, o líquido começou a ser retido no prato a  $G = 90.7$  kg/h, quando se iniciou o "Borbulhamento"; a  $G = 110.9$  kg/h a dispersão mudou então para uma "Froth", com alta turbulência e um movimento oscilatório constante. Para as vazões  $L = 135.0$ ,  $180.0$  e  $231.1$  kg/h, a "ação borbulhante" teve início a  $G = 79.9$  kg/h, mantendo-se na forma de uma espuma de estrutura celular, com baixa turbulência até  $G = 110.9$  kg/h (para  $L = 135.0$  e  $180.0$  kg/h) e  $G = 90.7$  kg/h (para  $L = 231.1$  kg/h), quando a dispersão passou a ser do tipo "Froth". Para as vazões  $L = 281.9$ ,  $384.1$  e  $443.9$  kg/h o "Borbulhamento" teve início a  $G = 63.4$  kg/h, mudando para uma dispersão do tipo "Froth" a  $G = 90.7$  kg/h, cu

jos movimentos oscilatórios tornavam-se mais acentuados a medida que a vazão de gás aumentava. Finalmente, para estas duas últimas vazões de líquido, não foi possível operar a coluna quando  $G = 128.2 \text{ kg/h}$ , pelos motivos apresentados no caso do prato com 15% de área de escoamento.

Da análise acima, verifica-se que os diferentes regimes de fluxo podem estar presentes sob faixas distintas de vazões de gás e de líquido, e em extensões que dependem principalmente da área livre do prato utilizado.

### 4.3 - OSCILAÇÕES DAS FASES

De acordo com o capítulo 2, o estudo dos movimentos oscilatórios presentes durante a operação de uma coluna de pratos, só tem sido feito para o caso dos pratos que utilizam vertedor.

No presente trabalho, foram observados movimentos oscilatórios semelhantes aos descritos por Biddulph (1).

Oscilações semelhantes a do tipo "full-wave" ocorreram durante a operação do prato com 15% de área livre, para as vazões  $G = 44.6$  e  $48.6$  kg/h e  $L = 330.1$  e  $443.9$  kg/h. Da mesma forma, oscilações semelhantes ao tipo "half-wave" estiveram presentes nos pratos com 15 e 20% de área livre.

No prato de 15% tais oscilações ocorreram para as vazões  $G = 63.4$  kg/h e  $L = 231.1$  kg/h. No caso do prato de 20%, a "meia onda" esteve presente para  $G = 90.7$  kg/h ( $L = 231.1 - 281.9$  kg/h),  $G = 110.9$  kg/h ( $L = 135.0 - 281.9$  kg/h) e  $G = 128.2$  kg/h ( $L = 63.0 - 281.9$  kg/h).

Comparando os dois tipos de oscilações para o prato com 15% de área livre, verifica-se que a vazão de gás em que tem lugar a oscilação do tipo "full-wave" é inferior aquela em que a "meia onda" está presente, caracterizando-se como um movimento oscilatório típico de baixas vazões de gás.

Para os pratos com 6 e 10% de área livre não se observou experimentalmente, nenhum destes dois tipos de oscilações, para as faixas de vazões estudadas.

No presente trabalho, foi observado, no entanto um outro tipo de movimento oscilatório.

Neste movimento oscilatório, a mistura gás-líquido na forma de uma "meia onda", colide de lado a lado com as paredes da coluna, perpendicularmente à direção do fluxo líquido e simultaneamente executa um movimento rotacional (figura 4.1 a, b).

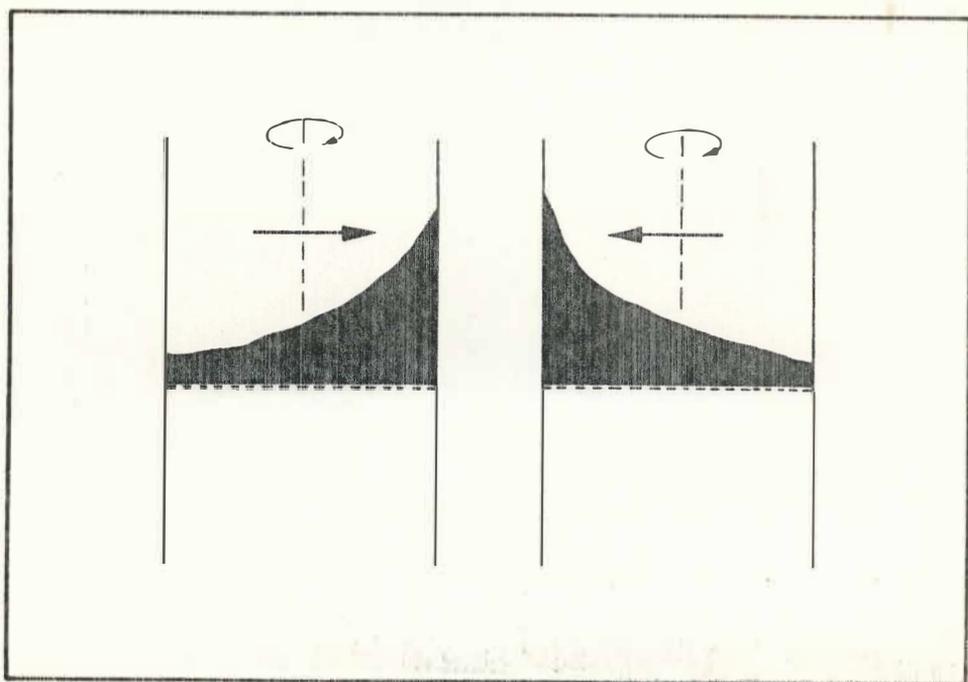


FIGURA 4:1.a - MOVIMENTO OSCILATÓRIO DA DISPERSÃO GÁS-LÍQUIDO EM PRATOS PERFURADOS SEM VERTEDOR.

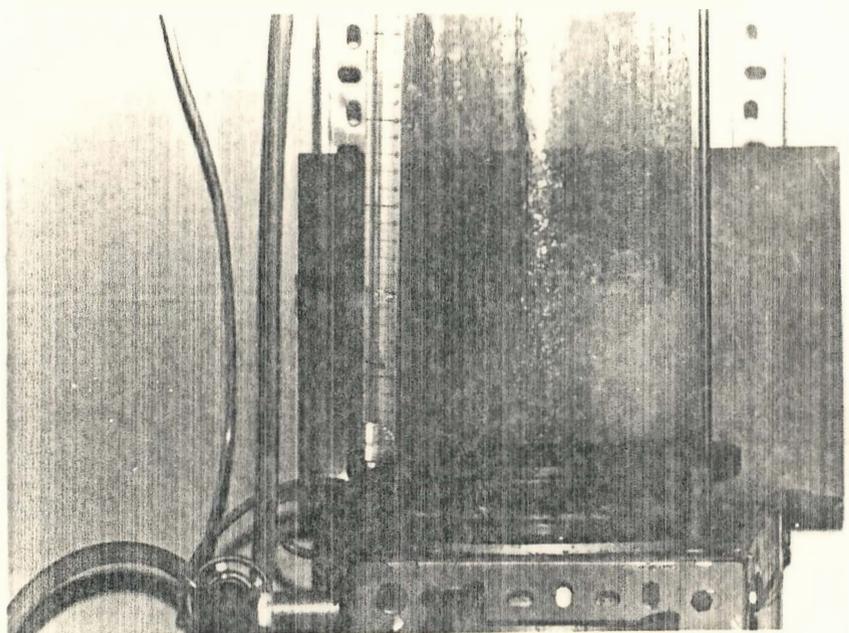
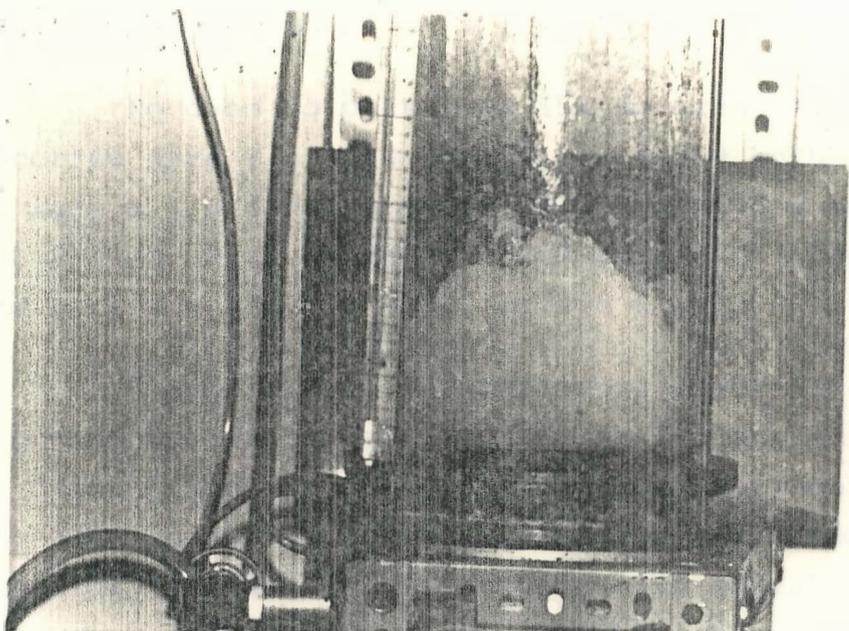
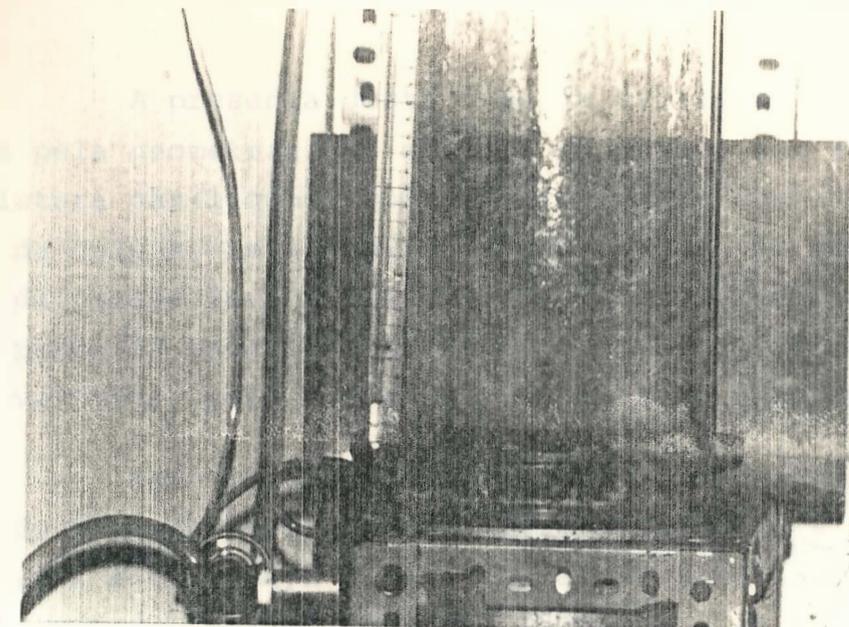


FIGURA 4.1.6 - MOVIMENTO OSCILATÓRIO DA DISPERSÃO GÁS-LÍQUIDO EM PRATOS PERFURADOS SEM VERTEDOR.

A presença deste tipo de oscilação, pode ser explicada pela geometria das colunas de pratos sem vertedor, onde a mistura gás-líquido colide diretamente com a parede circular da coluna. Estas colisões sucessivas, em pontos diferentes da parede leva à estabilização de um movimento rotacional por parte da onda, o que não é possível na coluna de pratos sem vertedor, pois sua geometria interna é retangular.

Este movimento oscilatório ocorreu durante a operação do prato com 6% de área livre a vazões  $G = 63.4$  kg/h e  $L = 22.2$  a  $50.7$  kg/h e para o prato com 10% a  $G = 28.4$  a  $34.6$  kg/h e  $L = 231.1$  a  $330.1$  kg/h e  $G = 40.0$  a  $44.6$  kg/h e  $L = 135.0$  a  $330.1$  kg/h.

No caso do prato com 15% de área livre este movimento ocorreu para  $G = 40.0$  kg/h e  $L = 443.9$  kg/h,  $G = 44.6$  a  $48.6$  kg/h e  $L = 330.1$  a  $443.9$  kg/h e  $G = 63.4$  kg/h e  $L = 231.1$  a  $281.9$  kg/h. Para o prato de 20% esta oscilação esteve presente para  $G = 110.9$  a  $128.2$  kg/h e  $L = 63.0 - 443.9$  kg/h.

Das observações experimentais verificou-se que este "movimento rotacional" ocorreu de forma predominante na fase "Froth" (região característica pela presença de oscilações) contribuindo significativamente, assim como todos os movimentos oscilatórios, para uma maior instabilidade da operação.

#### 4.4 - ALTURA DE LÍQUIDO

De acordo com o capítulo anterior, a altura de líquido foi medida através de um manômetro conectado à base, no centro do prato, para várias vazões de gás e de líquido e diferentes áreas de escoamento.

As figuras 4.2 a 4.5 mostram a variação da altura de líquido versus vazão de gás, tendo como parâmetro a vazão de líquido, para os pratos com áreas livres de 6, 10, 15 e 20% ( $D = 0.18$  m), sistema ar-água.

Os valores experimentais utilizados na construção das figuras 4.2 a 4.5 encontram-se em Apêndice B, tabelas B2 a B5.

As curvas das figuras 4.2 a 4.5 mostram que para todos os pratos estudados, a altura de líquido aumentou, com o aumento das vazões de gás e de líquido.

Comparando-se os regimes de fluxo observados (tabelas 4.1 a 4.4) com as curvas das figuras 4.2 a 4.5 para as mesmas vazões verifica-se para o prato com 6% de área livre que a dispersão foi do tipo "Borbulhamento" para as faixas de vazões  $G = 28.4$  a  $46.0$  kg/h ( $v = 0.3$  a  $0.5$  m/s) e  $L = 22.2$  a  $50.7$  kg/h. Nesta região uma variação da vazão de gás de  $30.0$  para  $40.0$  kg/h ( $v = 0.32$  a  $0.40$  m/s) elevou a altura de líquido em  $3.3 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 27.6$  kg/h). Da mesma maneira para uma variação da vazão de líquido de  $22.2$  para  $39.1$  kg/h a altura de líquido aumentou em  $1.5 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 30.0$  kg/h).

Para este mesmo prato, a regime de fluxo foi do tipo "Froth" para as faixas de vazões  $G = 46.0$  a  $63.4$  kg/h ( $v = 0.5$  a  $0.62$  m/s) e  $L = 22.0$  a  $39.1$  kg/h. Na região onde a dispersão foi do tipo "Froth", um aumento da vazão de gás de  $50.0$  para  $60.0$  kg/h, manteve a altura de líquido praticamente constante, para qualquer vazão de líquido. Da mesma ma

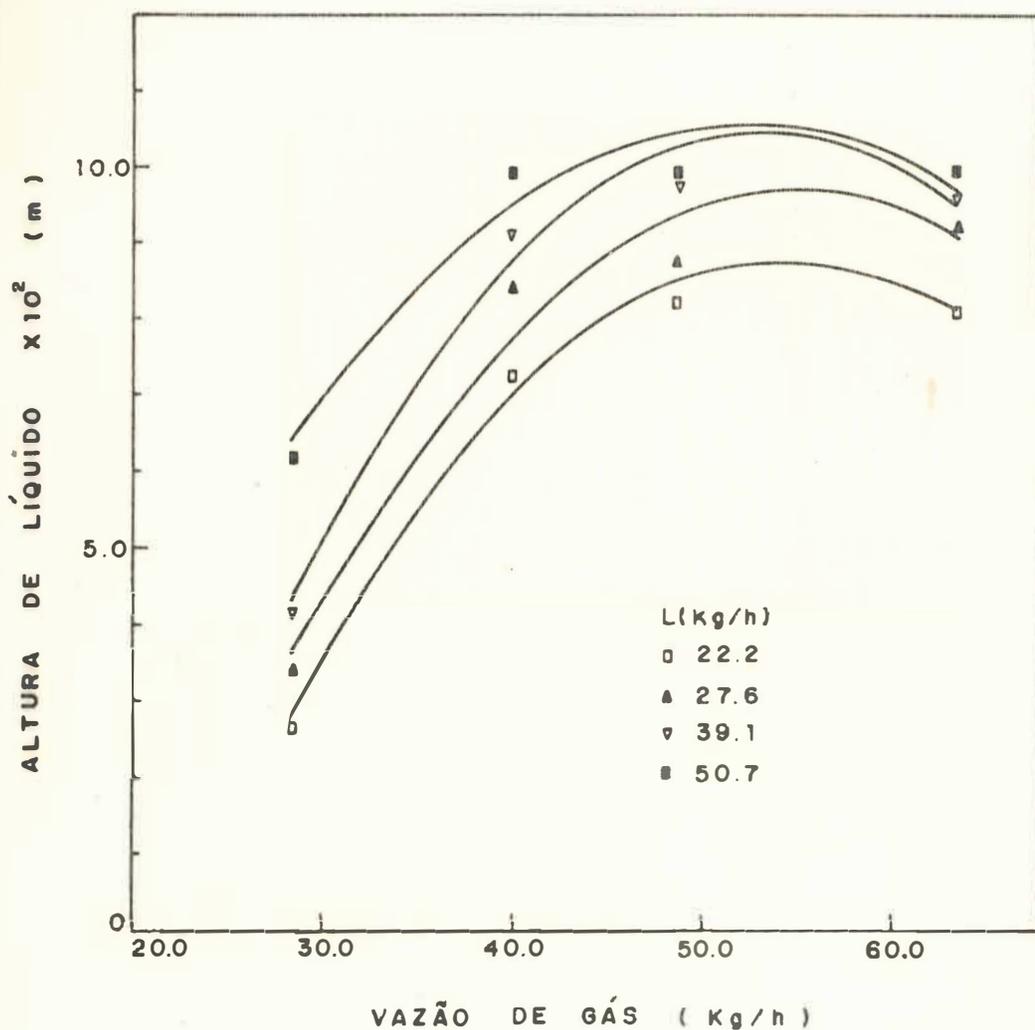


FIGURA ( 4.2 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.18\text{ m}$  , Área livre = 6%

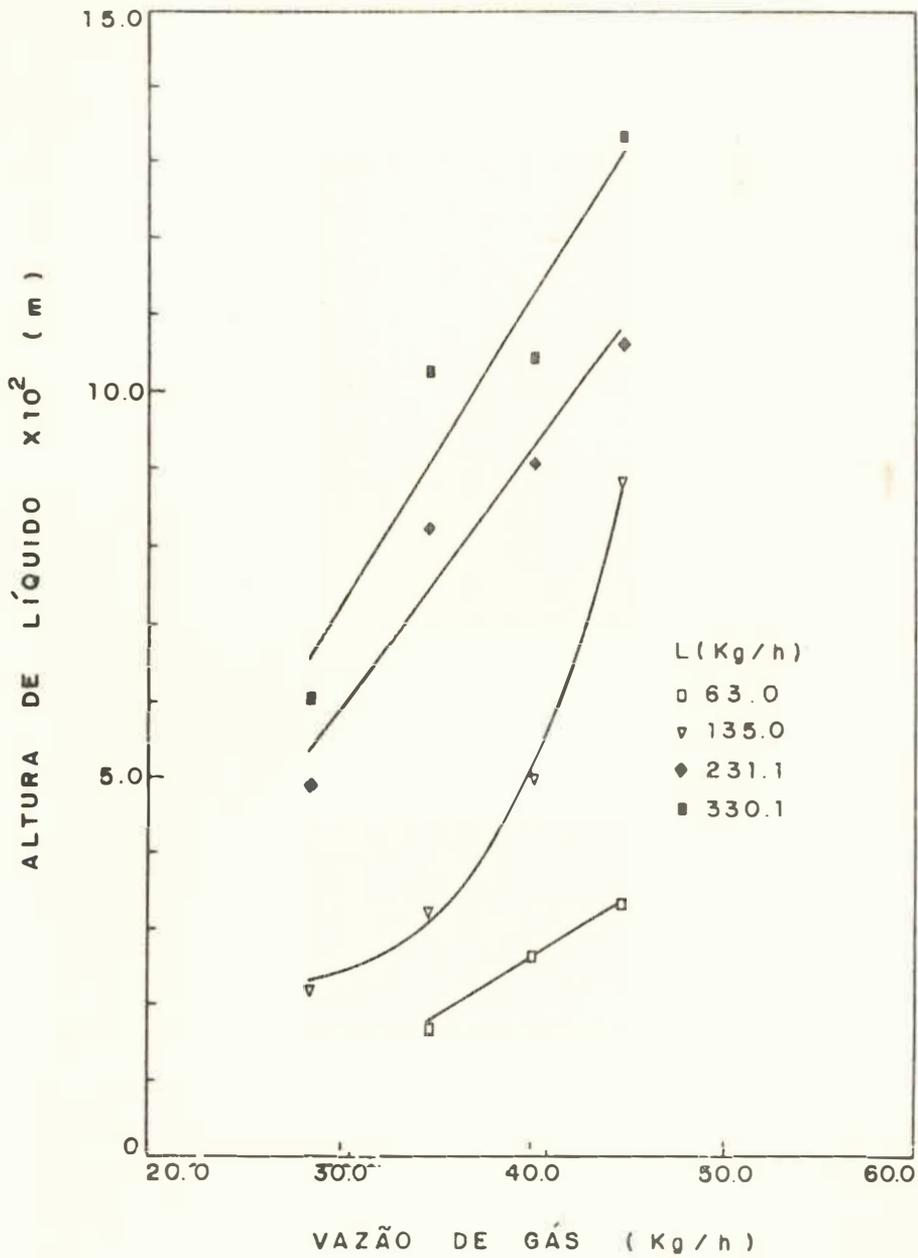


FIGURA ( 4.3 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 10 %

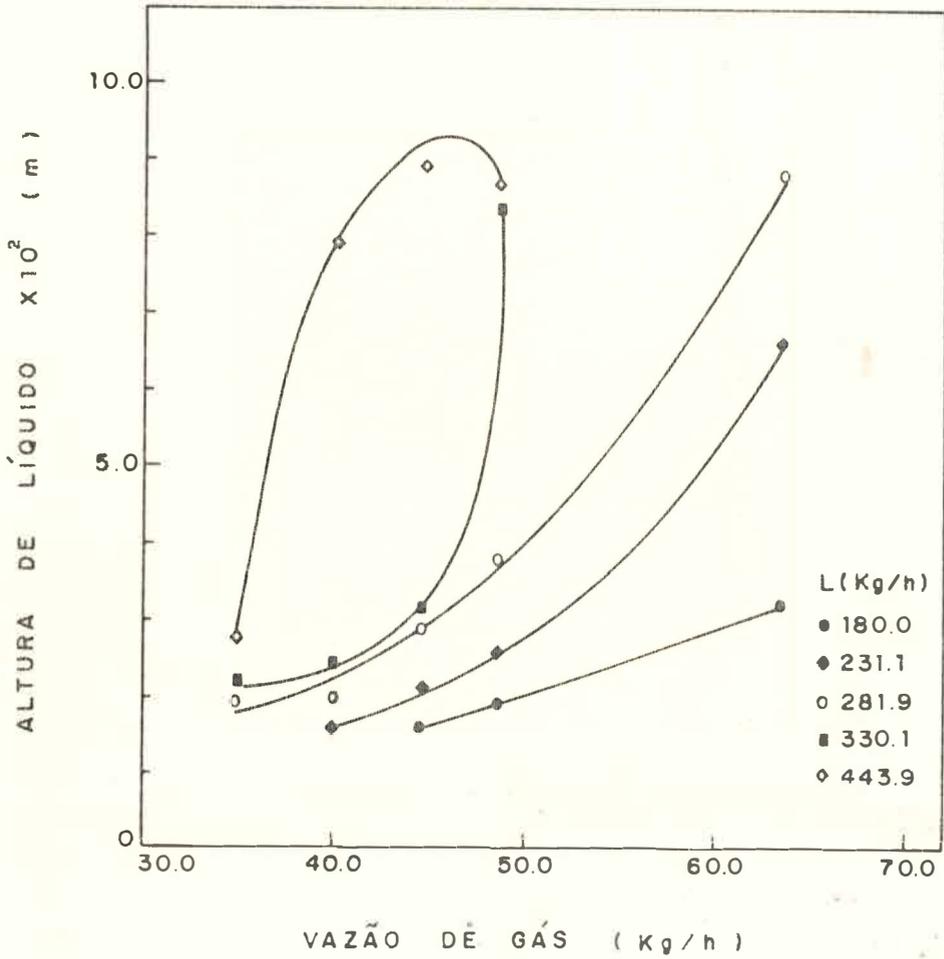


FIGURA ( 4.4 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato : D=0.18m , Área livre = 15 %

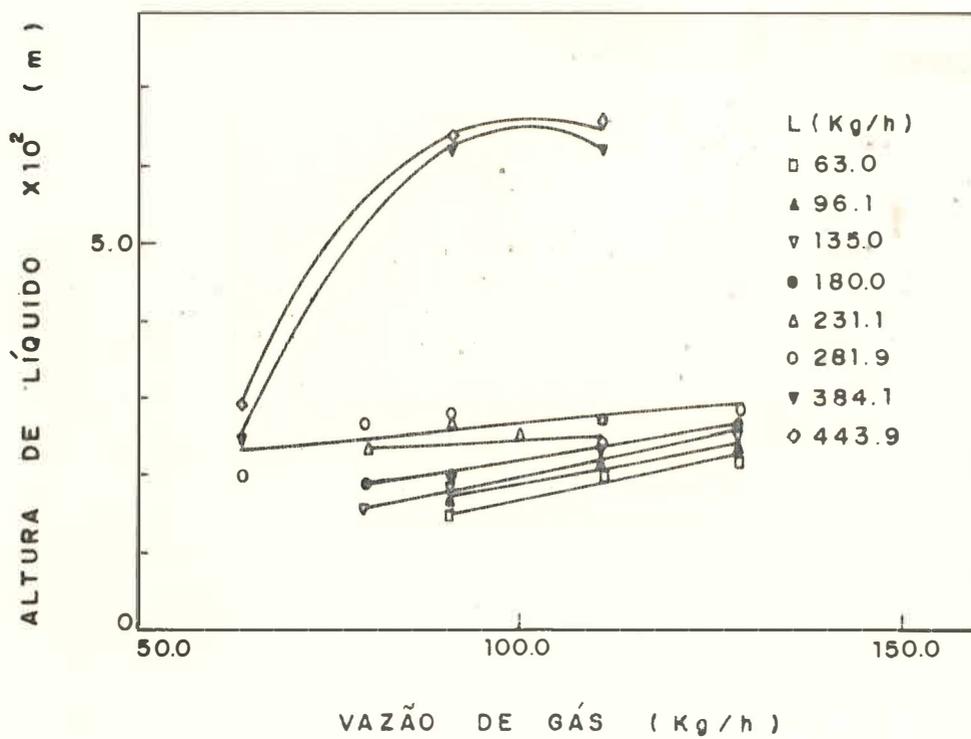


FIGURA ( 4. 5 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.18\text{ m}$  , Área livre = 20%

neira para uma variação da vazão de líquido de 22.2 para 39.1 kg/h a altura de líquido aumentou em  $1.7 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 50$  kg/h).

No caso do prato com 10% de área livre, o regime de fluxo foi do tipo "Borbulhamento" para as faixas de vazões  $G = 28.4$  a  $44.4$  kg/h ( $v = 0.3$  a  $0.49$  m/s) e  $L = 63.0$  a  $135.0$  kg/h. Nesta região quando a vazão de gás aumenta de  $40.0$  para  $44.0$  kg/h ( $v = 0.4$  a  $0.49$  m/s) a altura de líquido aumenta em  $0.7 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 63.0$  kg/h).

Da mesma maneira para uma variação da vazão de líquido de  $63.0$  para  $135.0$  kg/h a altura de líquido aumenta em  $1.4 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 34.6$  kg/h).

Para este mesmo prato, o regime de fluxo foi do tipo "Froth" para as faixas de vazões  $G = 28.4$  a  $44.4$  kg/h ( $v = 0.3$  a  $0.49$  m/s) e  $L = 231.1$  a  $330.1$  kg/h. Nesta região uma variação da vazão de gás de  $30.0$  para  $40.0$  kg/h ( $v = 0.32$  a  $0.40$  m/s) elevou a altura de líquido em  $3.4 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 231.1$  kg/h). Do mesmo modo para uma variação da vazão de líquido de  $231.1$  para  $330.1$  kg/h a altura de líquido aumenta em  $1.3 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 30.0$  kg/h).

No caso do prato com 15% de área livre, o regime foi do tipo "Borbulhamento" para as faixas de vazões  $G = 34.6$  a  $48.0$  kg/h ( $v = 0.37$  a  $0.51$  m/s) e  $L = 180.0$  a  $330.1$  kg/h. Nesta região, um aumento na vazão de gás de  $34.6$  para  $44.4$  kg/h ( $v = 0.37$  a  $0.49$  m/s) eleva a altura de líquido em  $1.1 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 281.9$  kg/h). Do mesmo modo uma variação da vazão de líquido de  $231.1$  para  $330.1$  kg/h aumenta a altura de líquido em  $0.8 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 40.0$  kg/h).

Para este prato verifica-se que a dispersão foi do tipo "Froth" para as faixas de vazões  $G = 34.6$  a  $48.0$  kg/h ( $v = 0.37$  a  $0.51$  m/s) e  $L = 231.1$  a  $443.9$  kg/h. Na região "Froth" um aumento na vazão de gás de  $34.6$  para  $44.4$  kg/h

( $v = 0.37$  a  $0.49$  m/s) aumenta a altura de líquido em  $6.5 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 443.9$  kg/h). Da mesma maneira, um aumento da vazão de líquido de  $231.1$  para  $281.9$  kg/h eleva a altura de líquido em  $1.2 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 50.0$  kg/h).

Para o prato de 20% de área livre, o regime de fluxo foi do tipo "Borbulhamento" para as faixas de vazões  $G = 79.9$  a  $128.2$  kg/h ( $v = 0.79$  a  $1.26$  m/s) e  $L = 63.0$  a  $281.9$  kg/h.

Na região onde o regime de fluxo foi do tipo "Borbulhamento" um aumento da vazão de gás de  $90.7$  para  $110.9$  kg/h eleva a altura de líquido em  $0.4 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 63.0$  kg/h). Do mesmo modo um aumento da vazão de líquido de  $63.0$  para  $180.0$  kg/h eleva a altura de líquido em  $1.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 100.0$  kg/h).

Neste mesmo prato a dispersão foi do tipo "Froth" para as faixas de vazões  $G = 63.4$  a  $128.2$  kg/h ( $v = 0.62$  a  $1.26$  m/s) e  $L = 63.0$  a  $443.9$  kg/h. Na região "Froth" um aumento da vazão de gás de  $63.4$  a  $90.7$  kg/h eleva a altura de líquido em  $3.7 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 384.1$  kg/h). Da mesma maneira um aumento da vazão de líquido de  $281.9$  a  $384.1$  kg/h eleva a altura de líquido em  $3.5 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 110.0$  kg/h).

Desta exaustiva análise, verifica-se as influências das vazões de gás e de líquido sobre a altura de líquido.

De um modo geral, a altura de líquido varia acentuadamente em relação as vazões de gás e de líquido quando a dispersão formada é do tipo "Froth", com a presença de fortes movimentos oscilatórios (pratos 10 e 15% de área livre).

No caso do prato com 20% de área livre, embora com o aumento das vazões de gás e de líquido ocorra a transição

"Borbulhamento - Froth" esta, não é perceptível graficamente, como o foi para os pratos de 6, 10 e 15% de área livre. Observou-se experimentalmente que a presença de oscilações semelhantes a "meia onda" ("half-wave"), causava um escoamento do gás e do líquido, junto às paredes da coluna, não permitindo um aumento acentuado da altura de líquido. No entanto, quando estas oscilações tornavam-se mais violentas, a altura de líquido aumentava rapidamente com o aumento das vazões de líquido e gás.

#### 4.5 - ALTURA DA ESPUMA

No presente trabalho, a altura da espuma foi medida, durante a operação da coluna, para várias vazões de gás e de líquido e diferentes geometrias do prato. Ressalta-se aqui, que esta medida da altura de líquido, foi mais difícil, quanto maior a turbulência presente na mistura gás-líquido, e principalmente quando esta apresentava movimentos oscilatórios. Nestes casos, optou-se por um valor médio da altura da espuma, observada, para cada experimento. Os resultados experimentais da altura da espuma, encontram-se em Apêndice B, tabelas B2 a B5.

As figuras 4.6 a 4.9, mostram a variação da altura da espuma versus vazão de gás, tendo como parâmetro a vazão de líquido, para os pratos com áreas livres de 6, 10, 15 e 20% ( $D = 0.18$  m), sistema ar-água.

Comparando as figuras 4.2 a 4.5 e 4.6 a 4.9 verifica-se que as curvas obtidas para a altura da espuma em relação a vazão de gás, são semelhantes àquelas encontradas para a altura de líquido.

No caso do prato com 6% de área livre e para a região de "Borbulhamento" uma variação da vazão de gás de 30.0 para 40.0 kg/h ( $v = 0.32$  a  $0.40$  m/s) elevou a altura de espuma em  $9.0 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 27.6$  kg/h). Para a mesma região, uma variação da vazão de líquido de 22.2 para 39.1 kg/h elevou a altura da espuma em  $4.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 30.0$  kg/h).

Para a região onde a dispersão foi do tipo "Froth", um aumento da vazão de gás de 50.0 para 60.0 kg/h, manteve a altura da espuma praticamente constante, para todas as vazões de líquido.

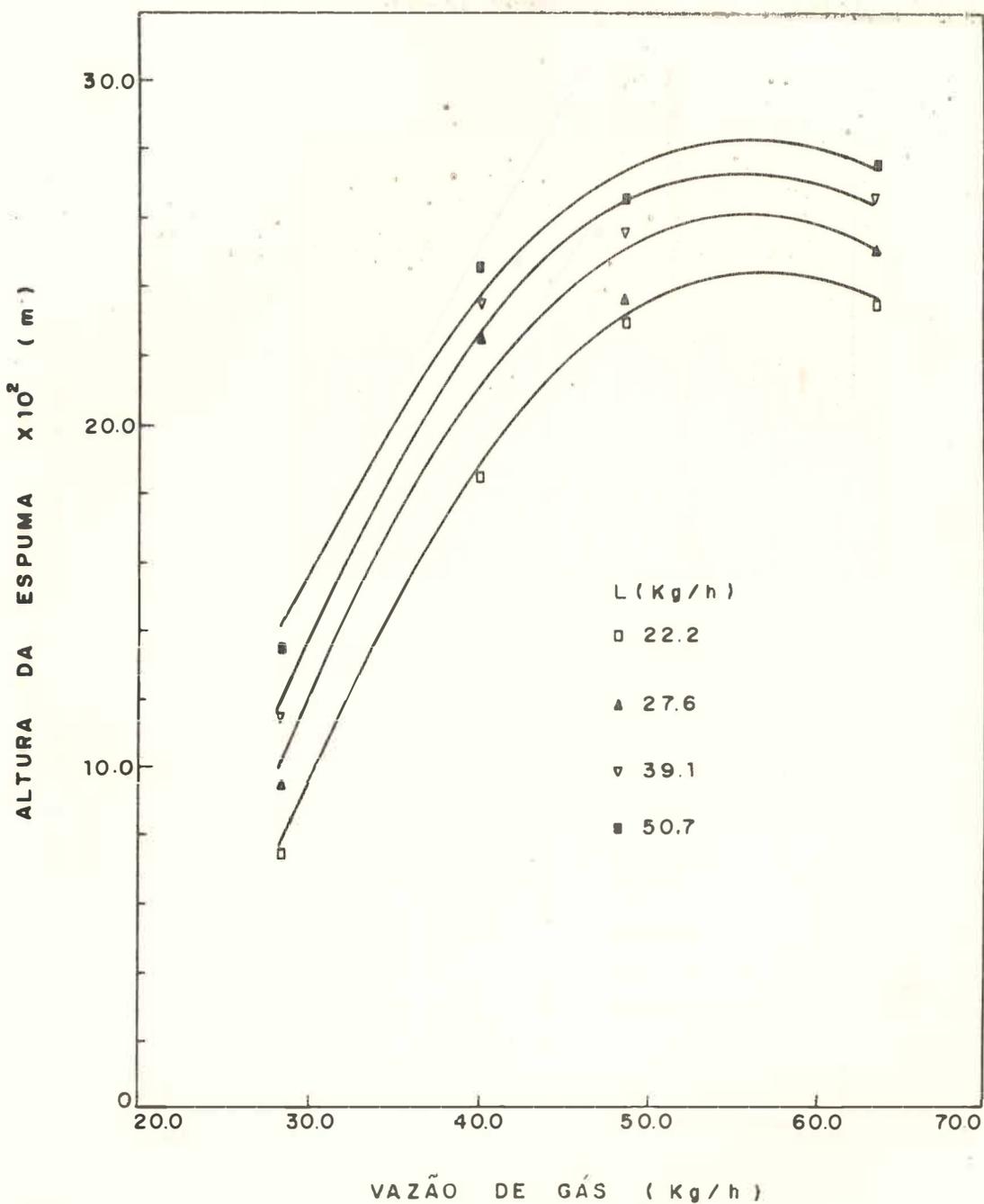


FIGURA ( 4.6 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18$  m , Área livre = 6 %

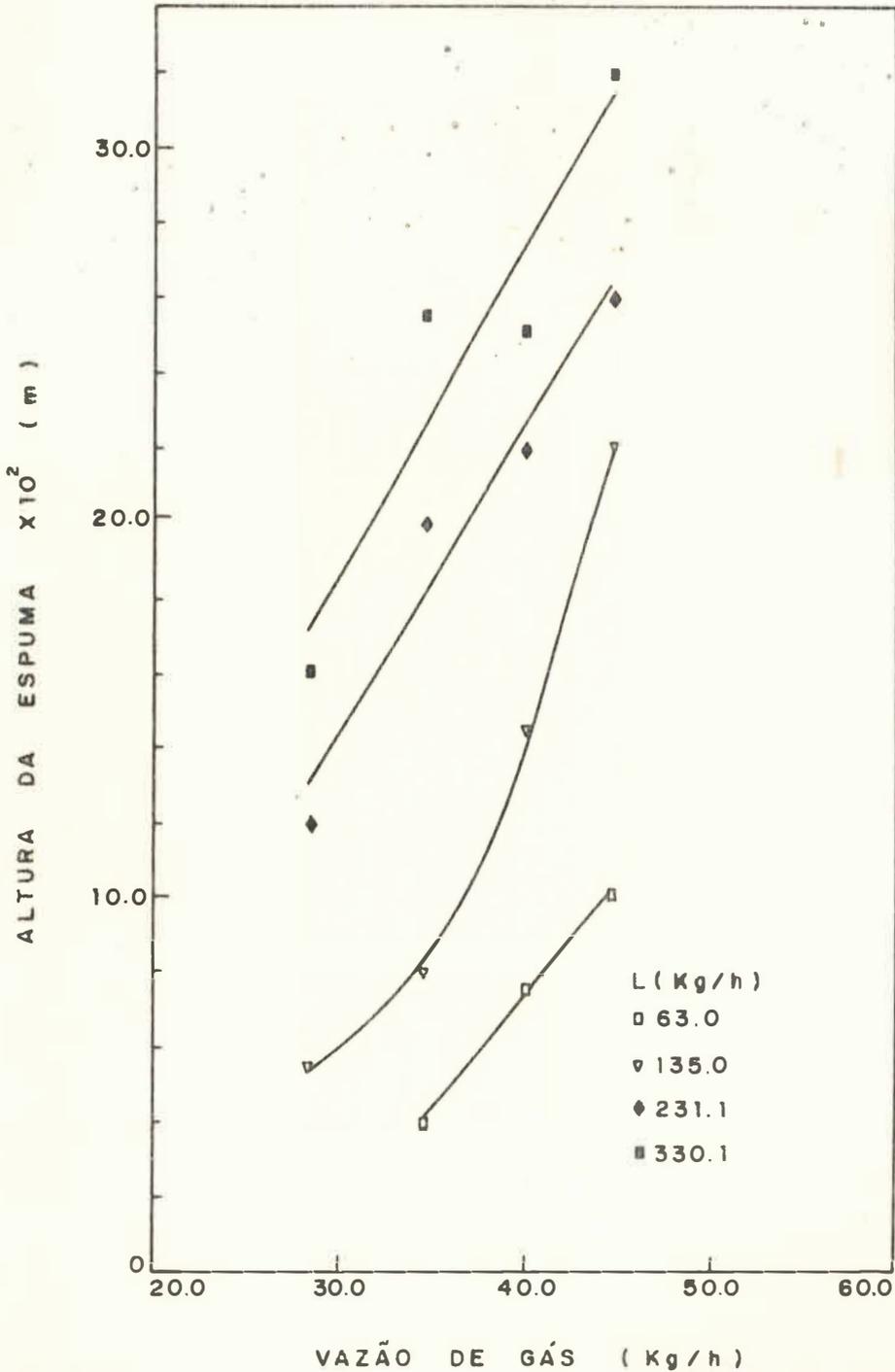


FIGURA ( 4.7 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.18$  m , Área livre = 10%

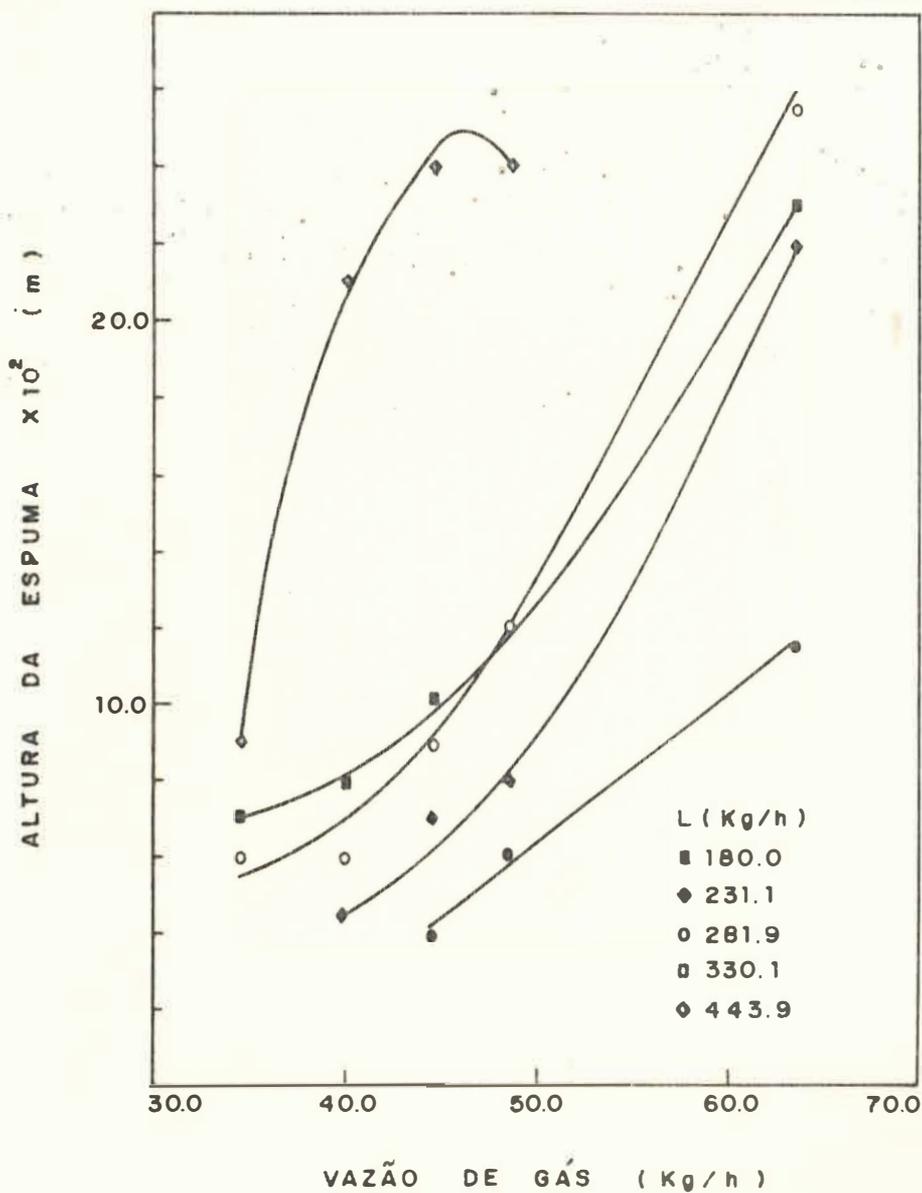


FIGURA ( 4.8 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.18$  m , Área livre = 15 %

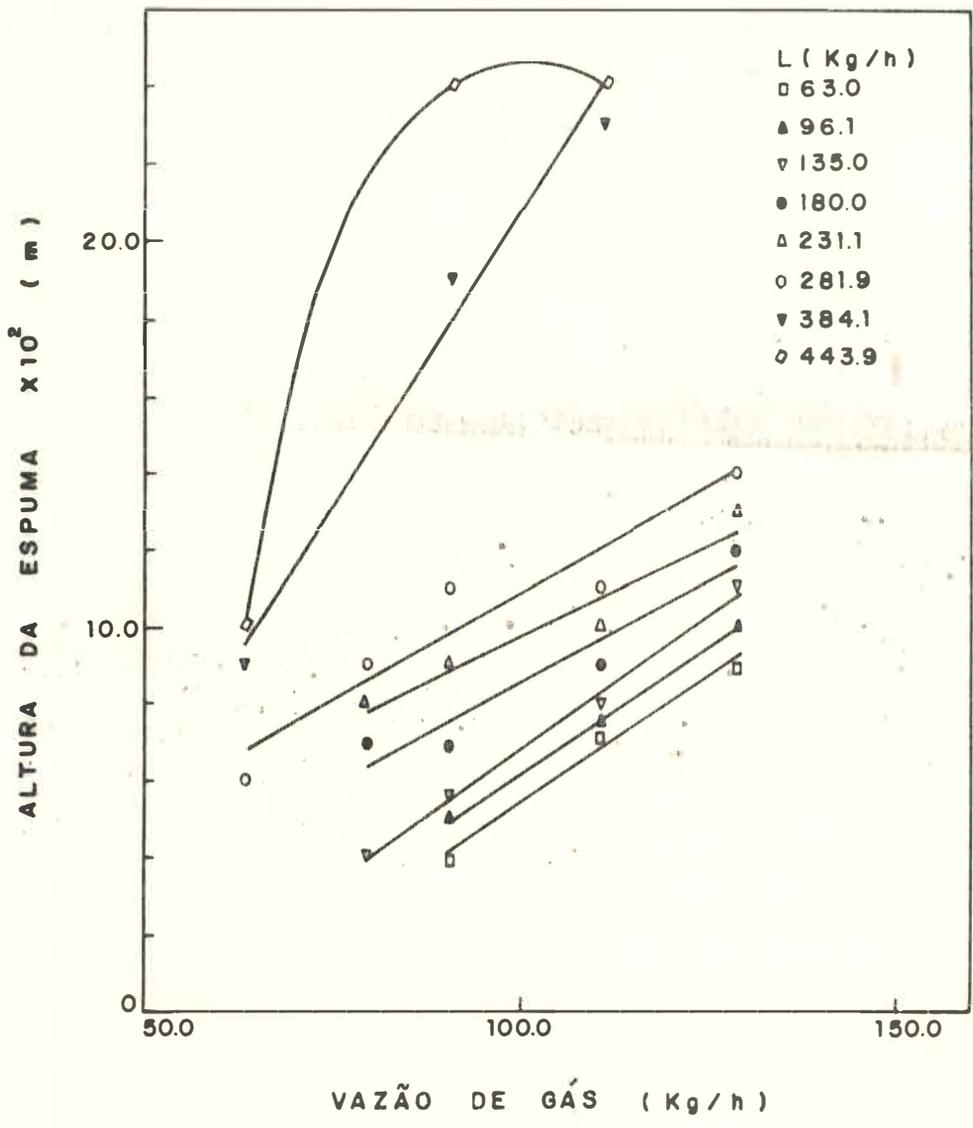


FIGURA ( 4.9 ) Altura da espuma versus vazão de gás  
Parâmetro : Vazão de líquido  
Sistema : ar - água  
Prato : D=0.18 m , Área livre = 20%

Do mesmo modo para uma variação da vazão de líquido de 22.2 para 39.1 kg/h elevou a altura da espuma em  $3.5 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 50$  kg/h).

No caso do prato com 10% de área livre, e para a região onde o regime de fluxo, foi do tipo "Borbulhamento" um aumento da vazão de gás de 40.0 para 44.0 kg/h ( $v = 0.4$  a  $0.49$  m/s) elevou a altura da espuma em  $2.0 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 63.0$  kg/h). Da mesma maneira para uma variação da vazão de líquido de 63.0 para 135.0 kg/h a altura de líquido aumenta em  $4.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 34.6$  kg/h).

Para a região onde o regime de fluxo foi do tipo "Froth" um aumento da vazão de gás de 30.0 para 40.0 kg/h ( $v = 0.32$  a  $0.40$  m/s) elevou a altura da espuma em  $8.0 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 231.1$  kg/h). Do mesmo modo, para uma variação da vazão de líquido de 231.1 para 330.1 kg/h a altura da espuma aumenta em  $4.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 30.0$  kg/h).

No caso do prato com 15% de área livre, e para a dispersão do tipo "Borbulhamento" um aumento na vazão de gás de 34.6 para 44.4 kg/h ( $v = 0.37$  a  $0.49$  m/s) elevou a altura da espuma em  $3.5 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 281.9$  kg/h).

Da mesma maneira para uma variação da vazão de líquido de 231.1 para 330.1 kg/h a altura da espuma aumenta em  $3.5 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 40.0$  kg/h).

Para a região onde a dispersão foi do tipo "Froth" um aumento na vazão de gás de 34.6 para 44.4 kg/h ( $v = 0.37$  a  $0.49$  m/s) aumentou a altura da espuma em  $15.5 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 443.9$  kg/h). Da mesma maneira, um aumento da vazão de líquido de 231.1 para 281.9 kg/h eleva a altura da espuma em  $4.5 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 50.0$  kg/h).

No caso do prato com 20% de área livre, e para a região onde o regime de fluxo foi do tipo "Borbulhamento" um aumento da vazão de gás de 90.7 para 110.9 kg/h elevou a altura da espuma em  $3.0 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 63.0$  kg/h).

Do mesmo modo um aumento da vazão de líquido de 63.0 para 180.0 kg/h eleva a altura da espuma em  $3.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 100.0$  kg/h).

Para a região onde o regime de fluxo foi do tipo "Froth" um aumento da vazão de gás de 63.4 para 90.7 kg/h eleva a altura da espuma em  $8.5 \times 10^{-2}$  m (para  $L = 384.1$  kg/h). Do mesmo modo um aumento da vazão de líquido de 281.9 para 384.1 kg/h aumenta a altura da espuma em  $12.0 \times 10^{-2}$  m (para  $G = 110.0$  kg/h).

Verificou-se para a altura da espuma, assim como para a altura de líquido, que as vazões de gás e líquido influenciam esta quantidade de forma distinta, conforme o tipo de dispersão formada.

#### 4.6 - POROSIDADE DA MISTURA GÁS-LÍQUIDO

No presente trabalho, a porosidade da mistura foi calculada segundo a equação (2.13):

$$\epsilon = 1 - \frac{h}{H}$$

onde as alturas de líquido (h) e da espuma (H) foram determinadas experimentalmente.

As figuras 4.10 a 4.13 mostram a variação da porosidade em função da vazão de gás a diferentes vazões de líquido, para os pratos com 6, 10, 15 e 20% de área livre (D=0.18m), sistema ar-água. Os resultados experimentais da porosidade encontram-se em Apêndice B, tabelas B2 a B5.

As curvas das figuras 4.10 a 4.13 foram correlacionadas para todas as vazões de líquido, estudadas em cada prato, com um erro médio inferior a 7%.

As figuras 4.10 a 4.13 mostram que de um modo geral a porosidade da mistura aumenta com o aumento da vazão de gás. Verifica-se, no entanto, que esta variação da porosidade em relação a vazão de gás, é muito pequena. Enquanto para o prato de 6% de área livre, um aumento da vazão de gás, de 40.0 a 48.6 kg/h ( $V = 0.39$  a  $0.48$  m/s) aumenta a porosidade da dispersão de 0.605 a 0.61, o mesmo aumento de G eleva  $\epsilon$  de 0.62 a 0.625 (para o prato de 10%) e de 0.67 a 0.68, para o prato de 15%. Da mesma maneira, para o prato com 20% de área livre, um aumento da vazão de gás de 79.9 a 90.7 kg/h ( $V = 0.79$  a  $0.89$  m/s) eleva a porosidade da dispersão de 0.695 a 0.705.

De uma maneira geral, verifica-se que esta variação da porosidade da mistura em relação a vazão de gás é maior quanto maior é a área livre do prato. Isto é explicado pelo fato de que nos pratos com maiores áreas de escoamento, são necessárias altas velocidades de gás, para a retenção de

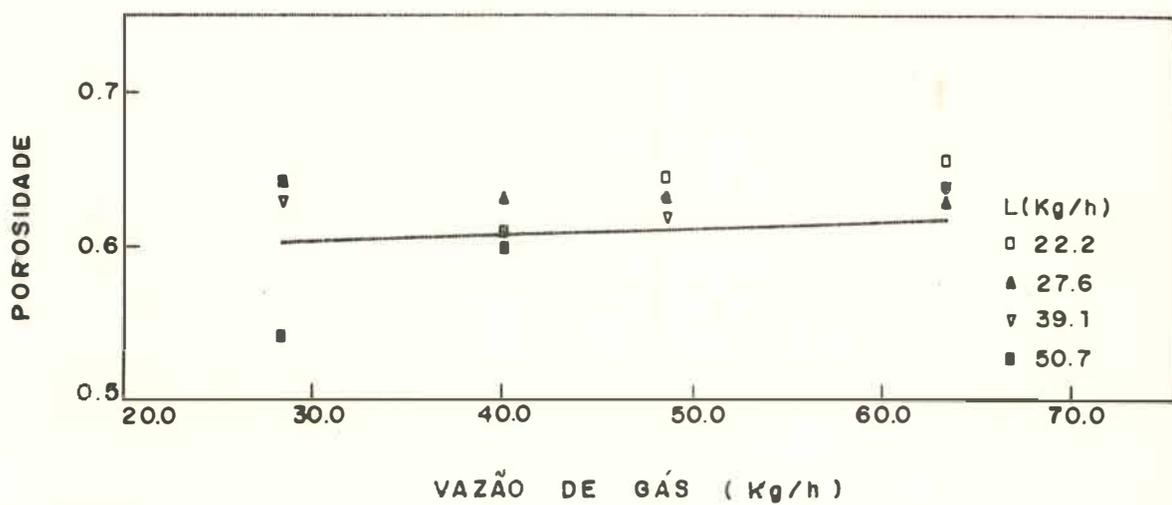
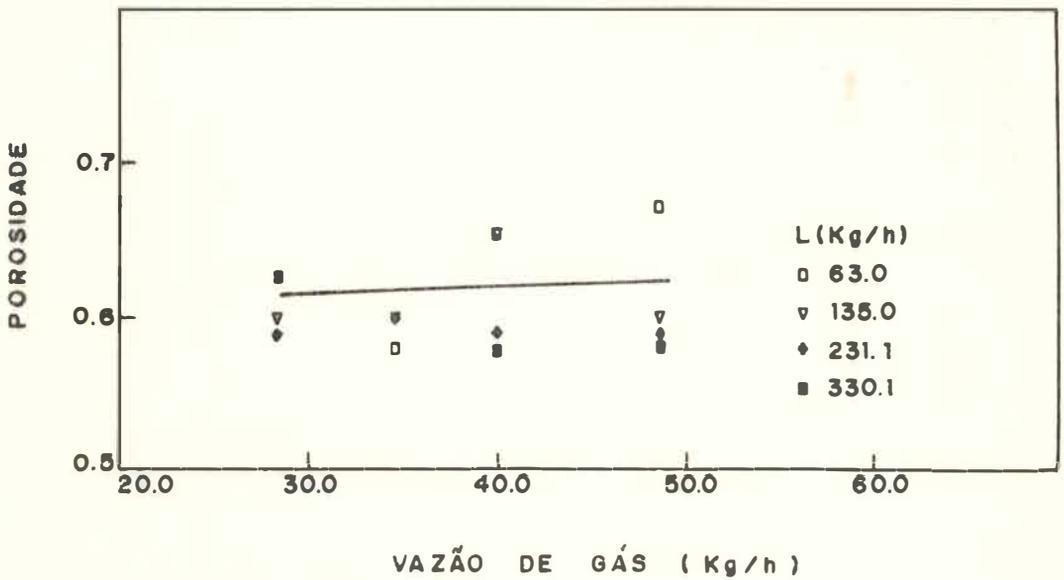


FIGURA ( 4.10 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.18\text{ m}$  , Área livre = 6 %



**FIGURA ( 4.11 )** Porosidade da dispersão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Proto :  $D = 0.18\text{ m}$  , Área livre = 10 %

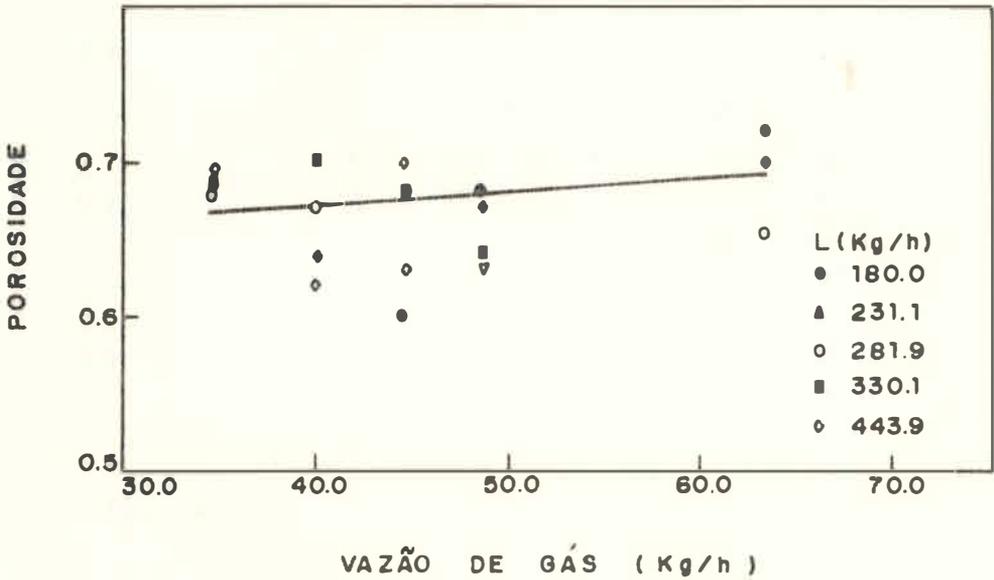


FIGURA ( 4.12 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

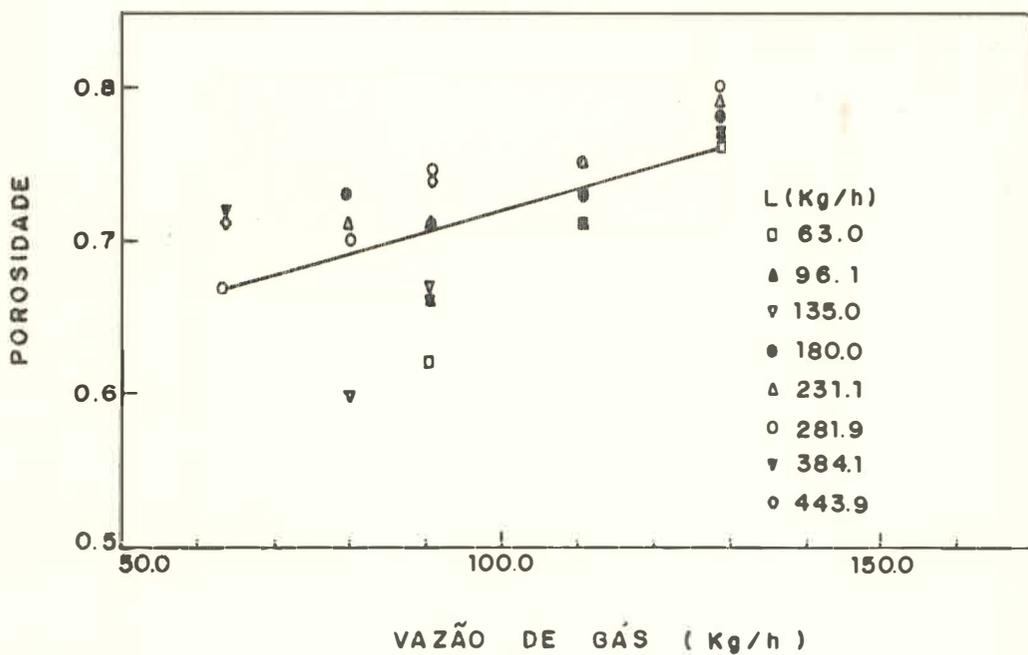


FIGURA ( 4.13 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 20%

líquido no prato. Este alto fluxo de gás leva a dispersão a oscilar de forma violenta, aumentando a quantidade de líquido aerado do prato.

#### 4.7 - QUEDA DE PRESSÃO TOTAL

No presente trabalho, a queda de pressão total foi medida experimentalmente assim como, a queda de pressão através do prato seco. Os resultados experimentais encontram-se em apêndice B, tabelas B1 a B5, para o prato com  $D = 0.18$  m, sistema ar - água.

As figuras 4.14 a 4.17 mostram a variação da queda de pressão total versus vazão de gás a várias vazões de líquido. Verifica-se destas figuras, que a queda de pressão aumenta com o aumento das vazões de gás e líquido. Os resultados experimentais mostram que a queda de pressão total varia de forma semelhante às alturas de líquido e da espuma, tanto para as dispersões do tipo "Borbulhamento" quanto para as do tipo "Froth".

A figura 4.18 mostra a variação da queda de pressão através do prato seco, como função da velocidade de gás no orifício, para os pratos com 6, 10, 15 e 20% de área livre, diâmetro de 0.18 m.

Da figura 4.18 verifica-se que a queda de pressão através do prato seco, aumenta com o aumento da velocidade de gás no orifício. Para as faixas de vazões de gás estudados em cada prato, obteve-se as seguintes equações para a queda de pressão através do prato seco:

$$\Delta P_d = 1.15 \rho_G v_o^{1.95} \quad (\text{área livre} = 6\%)$$

$$\Delta P_d = 1.40 \rho_G v_o^{1.94} \quad (\text{área livre} = 10\%)$$

$$\Delta P_d = 1.60 \rho_G v_o^{1.94} \quad (\text{área livre} = 15\%)$$

$$\Delta P_d = 1.79 \rho_G v_o^{1.93} \quad (\text{área livre} = 20\%)$$

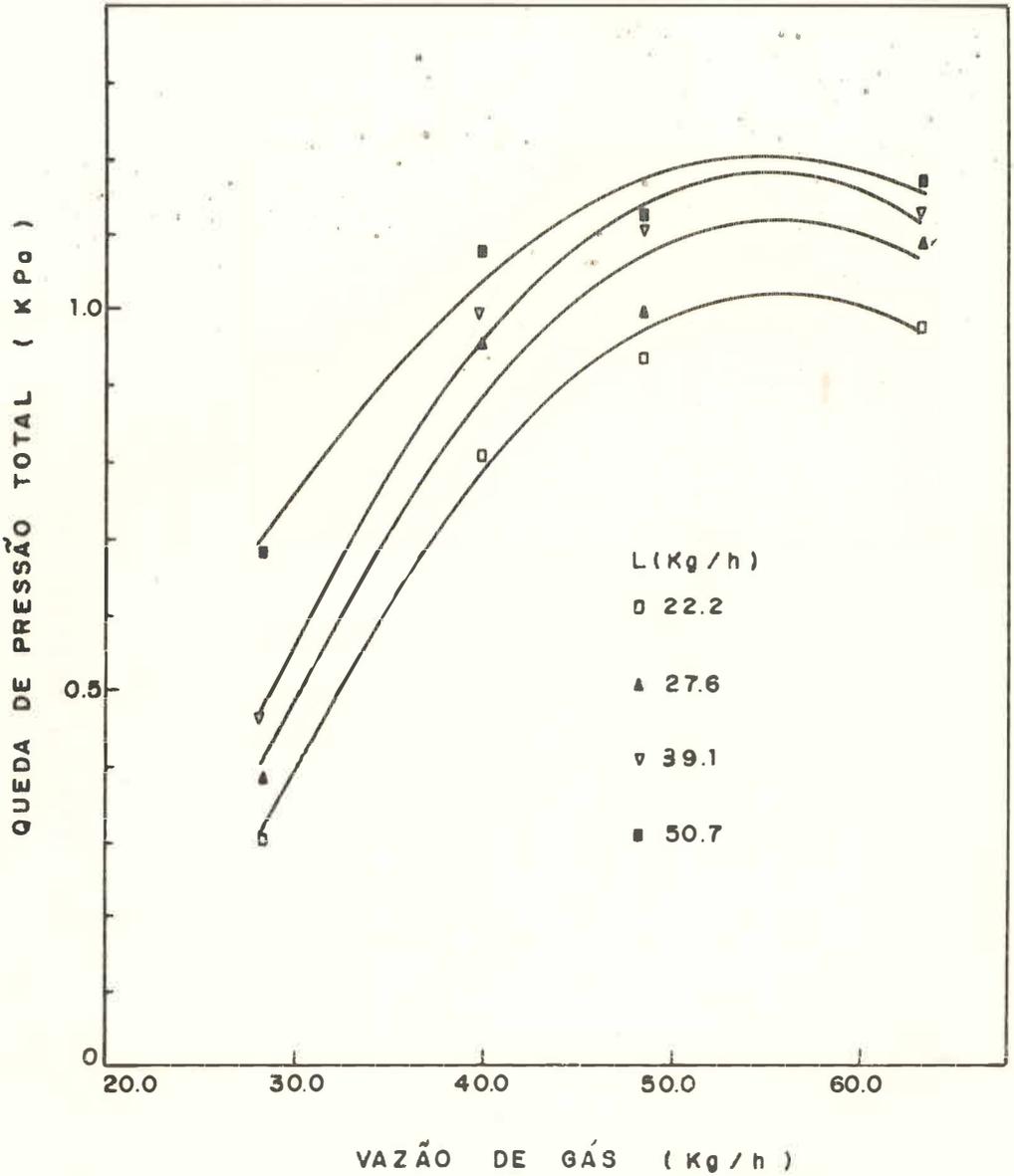


FIGURA ( 4.14 ) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 6%

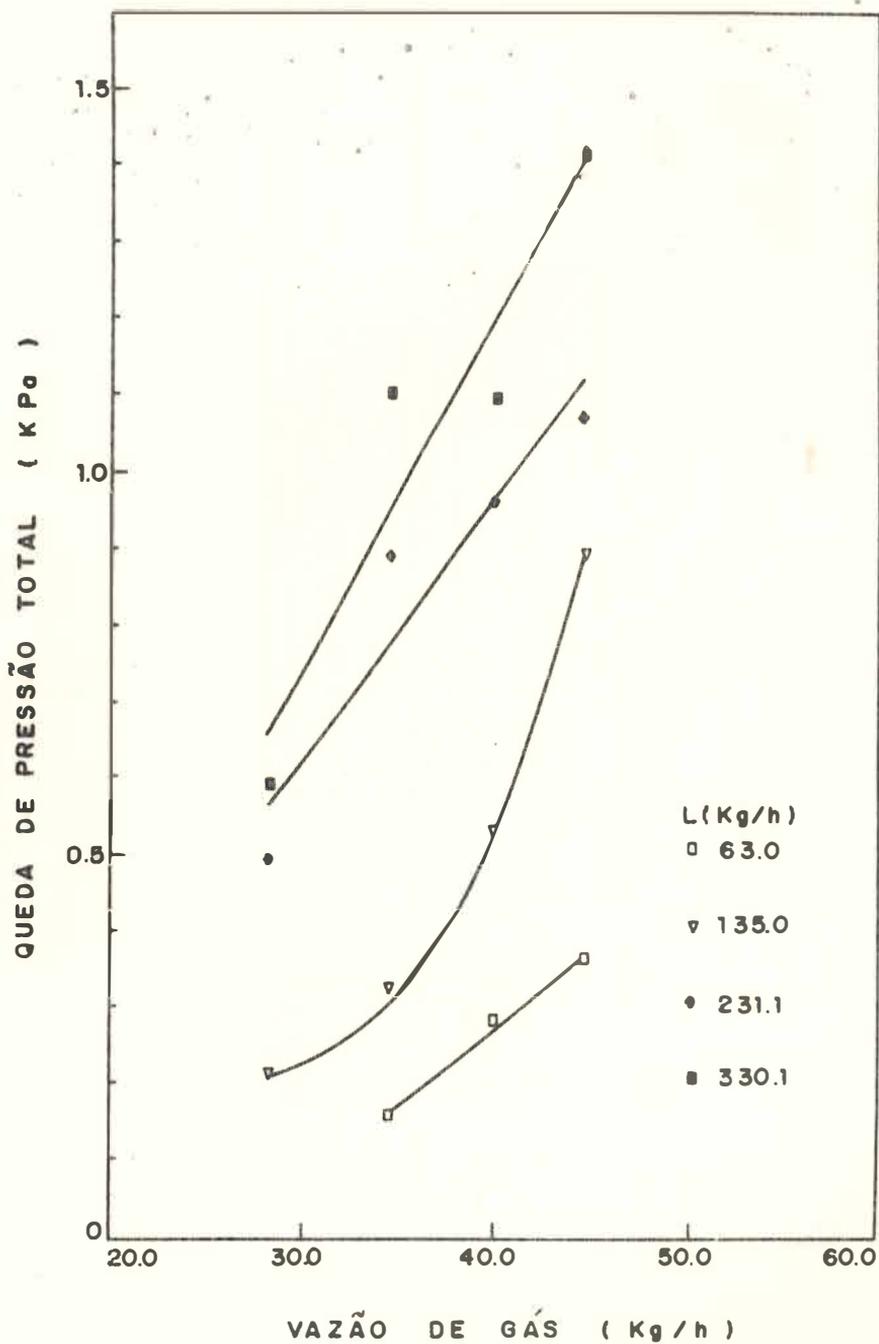


FIGURA ( 4.15 ) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 10%

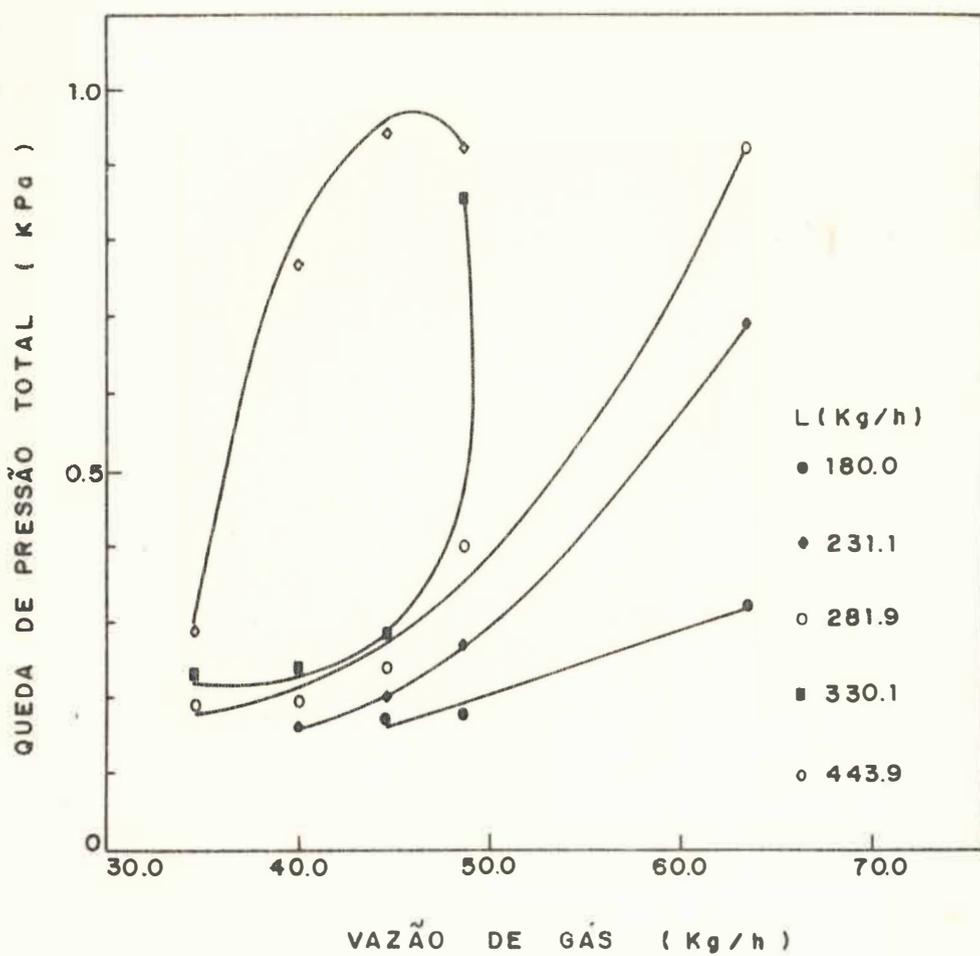


FIGURA ( 4.16 ) Queda de pressão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 15%

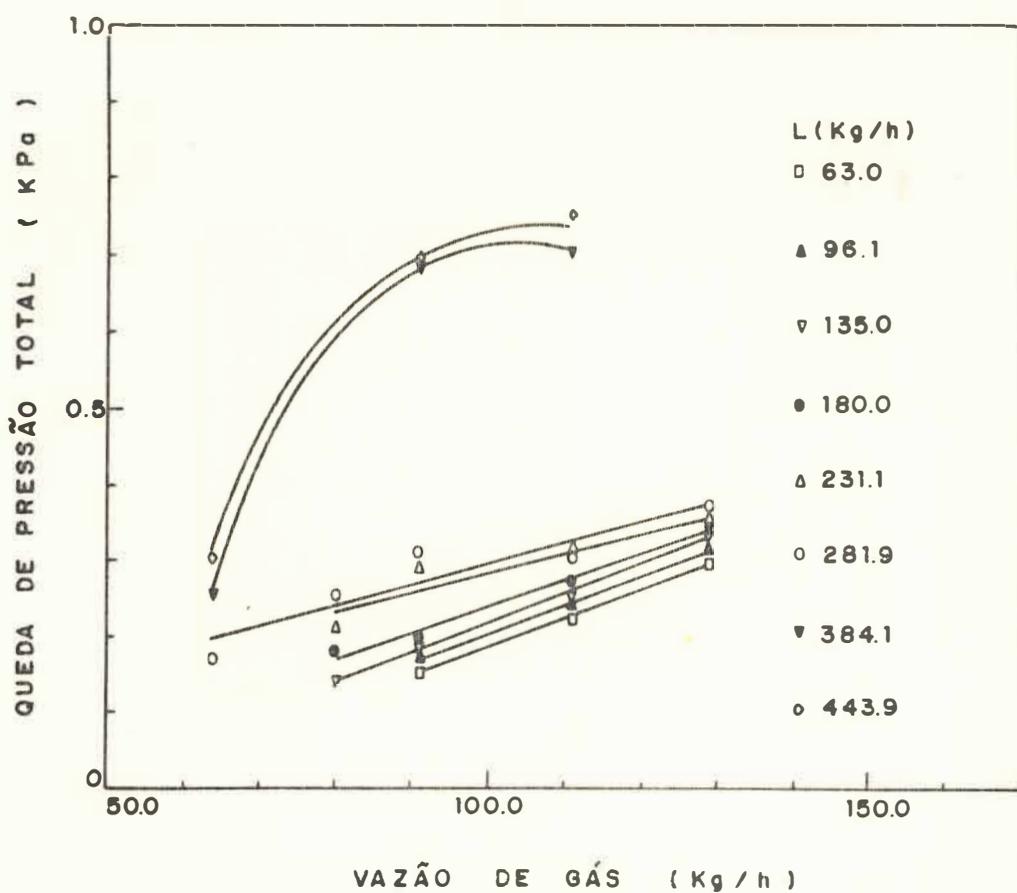


FIGURA ( 4.17 ) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 20%

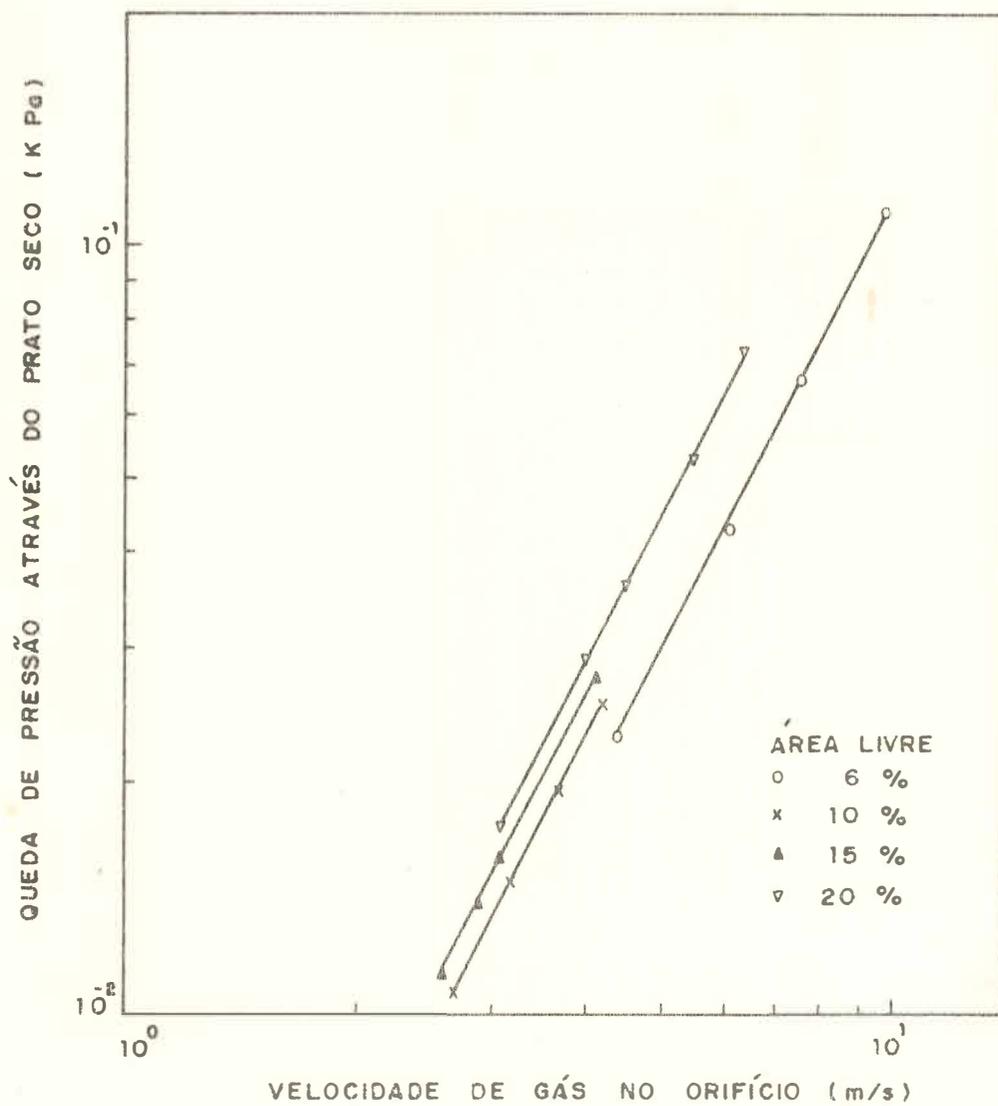


FIGURA ( 4.18 ) Queda de pressão através do prato seco versus velocidade de gás no orifício

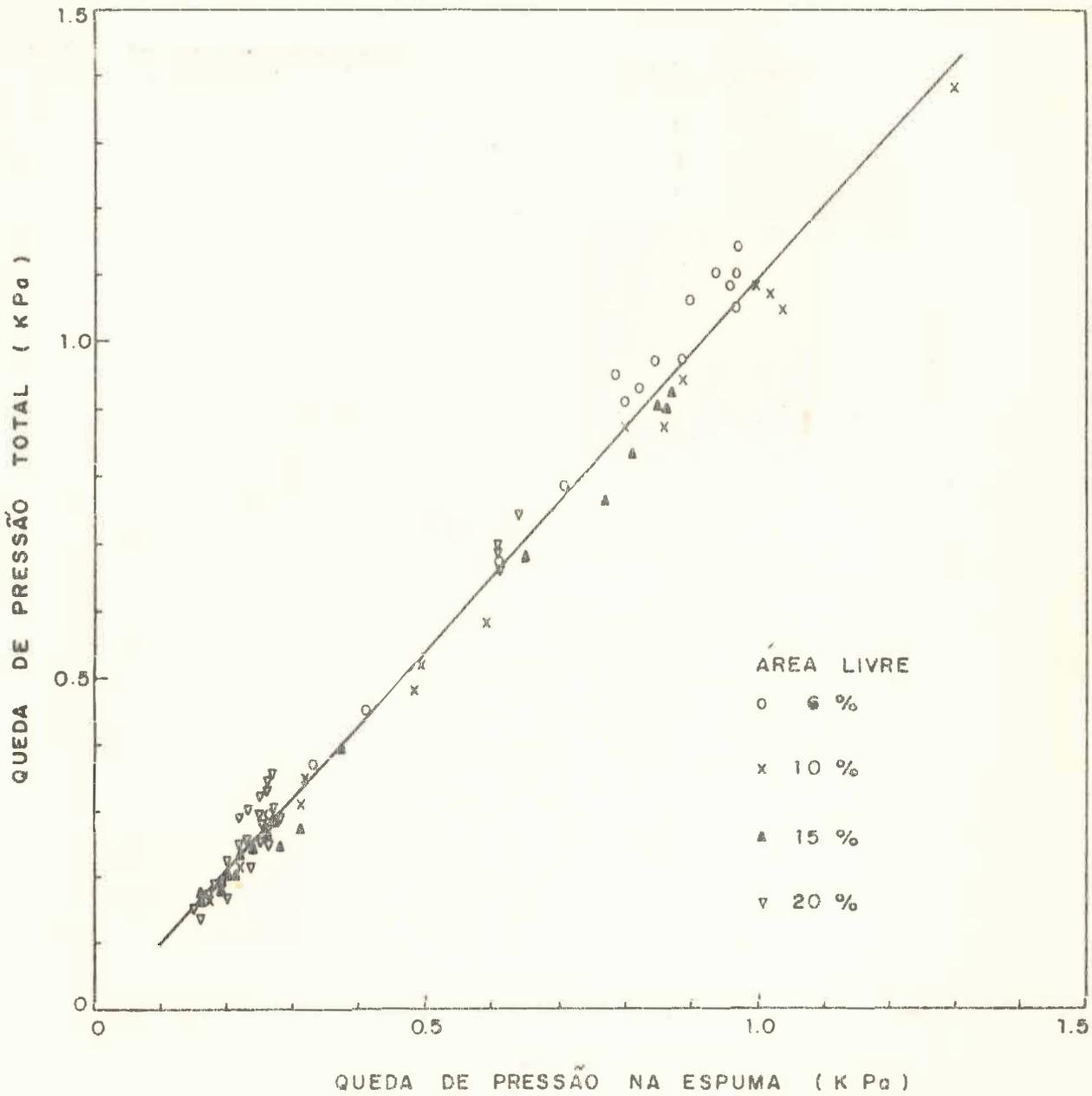


FIGURA ( 4.19 ) Queda de pressão total versus queda de pressão na espuma

No presente trabalho, verificou-se que a queda de pressão total é praticamente igual a queda de pressão na espuma ( $\Delta P_e = \rho_L gh$ ).

A variação da queda de pressão total em relação a queda de pressão na espuma, é mostrada na figura 4.19 para os pratos com 6 a 20% de área livre ( $D = 0.18$  m) e sistema ar-água.

A curva da figura 4.19 apresentou a seguinte equação:

$$\Delta P = -0.01 + 1.12 \Delta P_e$$

com um coeficiente de correlação de 0.99.

Desta maneira, podemos concluir, que a queda de pressão total pode ser calculada a partir da altura de líquido no prato, sendo independente da queda de pressão através do prato seco e da queda de pressão devido a tensão superficial.

#### 4.8 - EFEITO DA ÁREA LIVRE

No presente trabalho, verificou-se que a área de escoamento, influencia fortemente no máximo limite de vazão de gás em que se pode operar o prato, a partir do qual as oscilações tornam-se violentas e o arrasto de líquido é excessivo.

Comparando as figuras 4.2 a 4.5, 4.6 a 4.9 e 4.14 a 4.17 para as alturas de líquido, da espuma e queda de pressão, respectivamente, observa-se que o aumento da área livre, aumenta a capacidade do prato em operar com maiores vazões de gás, e de líquido. Verifica-se então, que as alturas de líquido, da espuma e a queda de pressão, diminuem com o aumento da área livre, para uma mesma faixa de vazões de gás e de líquido.

Comparando os pratos 10 e 15% de área livre, para  $L = 231.1$  kg/h e  $G = 40.0$  kg/h observa-se que enquanto no primeiro os valores das alturas de líquido, da espuma e da queda foram de  $0.1 \times 10^{-2}$ ,  $22.0 \times 10^{-2}$  m e 0.96 KPa no prato de 15% estes foram de  $1.6 \times 10^{-2}$ ,  $4.5 \times 10^{-2}$  m e 0.16 KPa, respectivamente.

Comparando os pratos com 15 e 20% de área livre para  $L = 281.9$  kg/h e  $G = 63.4$  kg/h, os valores de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  foram de  $8.8 \times 10^{-2}$ ,  $25.5 \times 10^{-2}$  m e 0.92 KPa (para o prato 15%) e de  $2.0 \times 10^{-2}$ ,  $6.0 \times 10^{-2}$  m e 0.17 KPa (prato 20%), respectivamente.

Outro fator observado foi o de que maiores áreas livres favorecem o aparecimento de oscilações mais violentas, comparativamente àquelas que ocorrem nos pratos de menor área de escoamento. Isto se deve ao fato de que com o aumento da área livre, maiores vazões de gás são necessárias para reter o líquido no prato; quando o líquido é retido, o alto fluxo de gás, leva o líquido a oscilar, e de forma mais violenta a medida que se aumenta ambas as vazões.

#### 4.9 - EFEITO DO DIÂMETRO DA COLUNA

Para verificar o efeito do diâmetro da coluna nas condições hidrodinâmicas dos pratos perfurados sem vertedor, foram feitos experimentos, utilizando-se uma segunda coluna, com 0.098 m de diâmetro. Para esta coluna foram medidas as alturas de líquido, da espuma e a queda de pressão total, quando da operação de um prato perfurado sem vertedor, com 15% de área livre. Os resultados experimentais para a coluna de 0.098 m de diâmetro encontram-se em apêndice B, tabela B6.

As figuras 4.20 a 4.23, mostram a variação das alturas de líquido e da espuma, da porosidade e da queda de pressão versus a vazão de gás, tendo como parâmetro a vazão de líquido, para a coluna de 0.098 m de diâmetro.

Comparando-se as figuras 4.20, 4.21 e 4.23 com as figuras 4.4, 4.8, 4.16 para o prato com  $D = 0.18$  m, verifica-se que diminuindo o diâmetro da coluna, diminui a capacidade do prato em operar com altas vazões de gás e de líquido.

Observou-se experimentalmente, que para as vazões  $L = 22.2$  a  $39.1$  kg/h, a dispersão era do tipo "Froth" com elevada turbulência e movimentos oscilatórios do tipo "half-wave", não constantes. Com o aumento da vazão de líquido ( $L = 56.3$  kg/h) o movimento oscilatório mudou para pulsações na direção vertical, seguido por flutuações violentas nos valores de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$ .

Os diferentes diâmetros das colunas utilizadas no presente trabalho (para o sistema ar-água) e no de Mahendru e Hackl (5) podem então, explicar a diferença entre os resultados obtidos nos dois trabalhos.

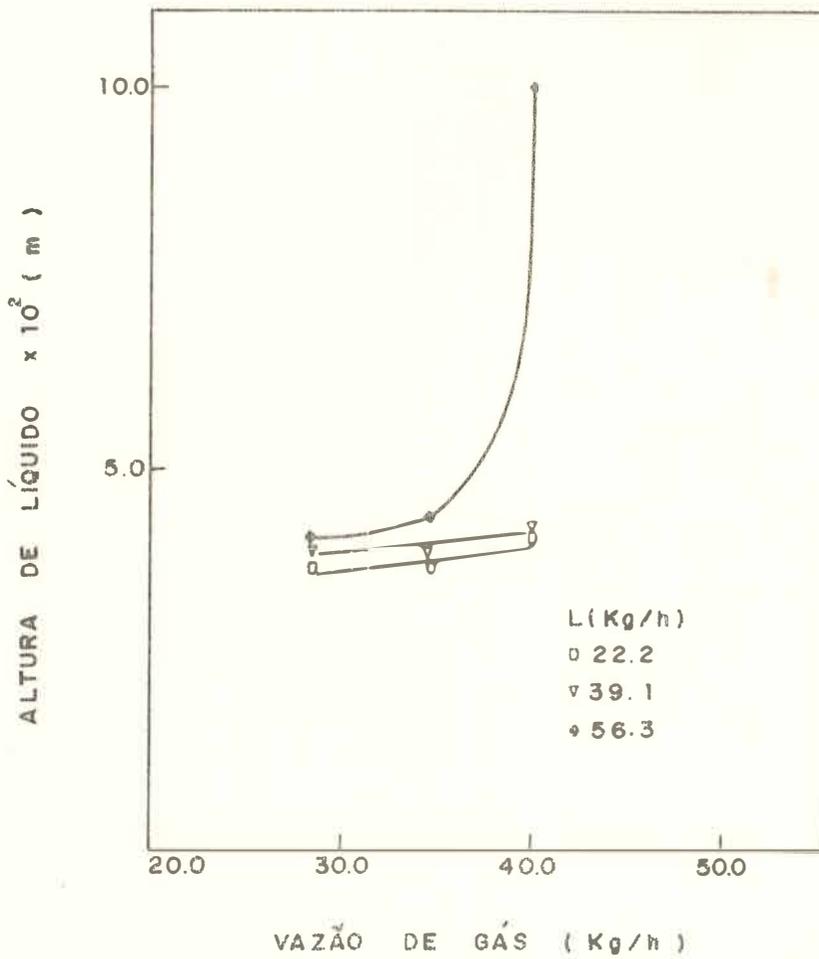


FIGURA ( 4.20 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D=0.098\text{m}$ , Área livre = 15 %

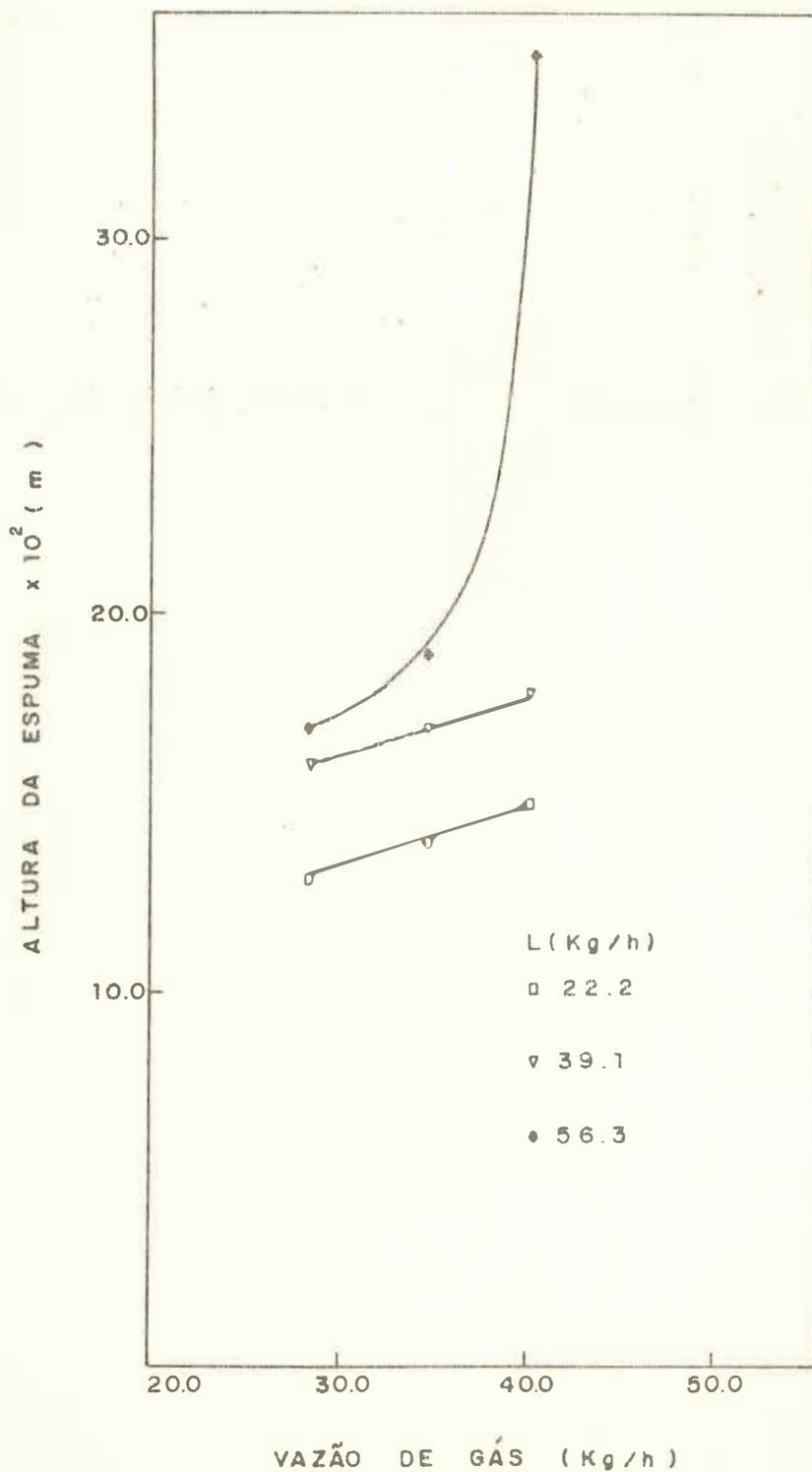


FIGURA ( 4.21 ) Altura da espuma versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.098\text{m}$  , Área livre = 15%

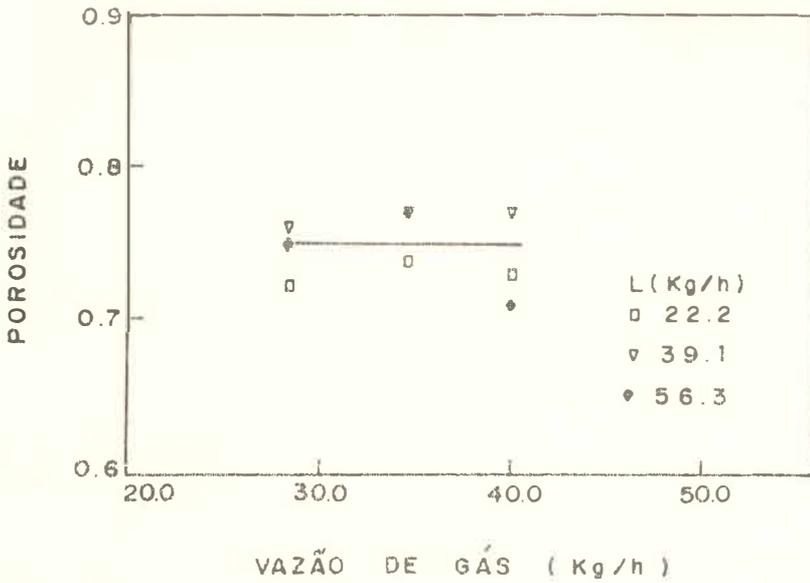


FIGURA ( 4.22 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.098\text{m}$  , Área livre = 15%

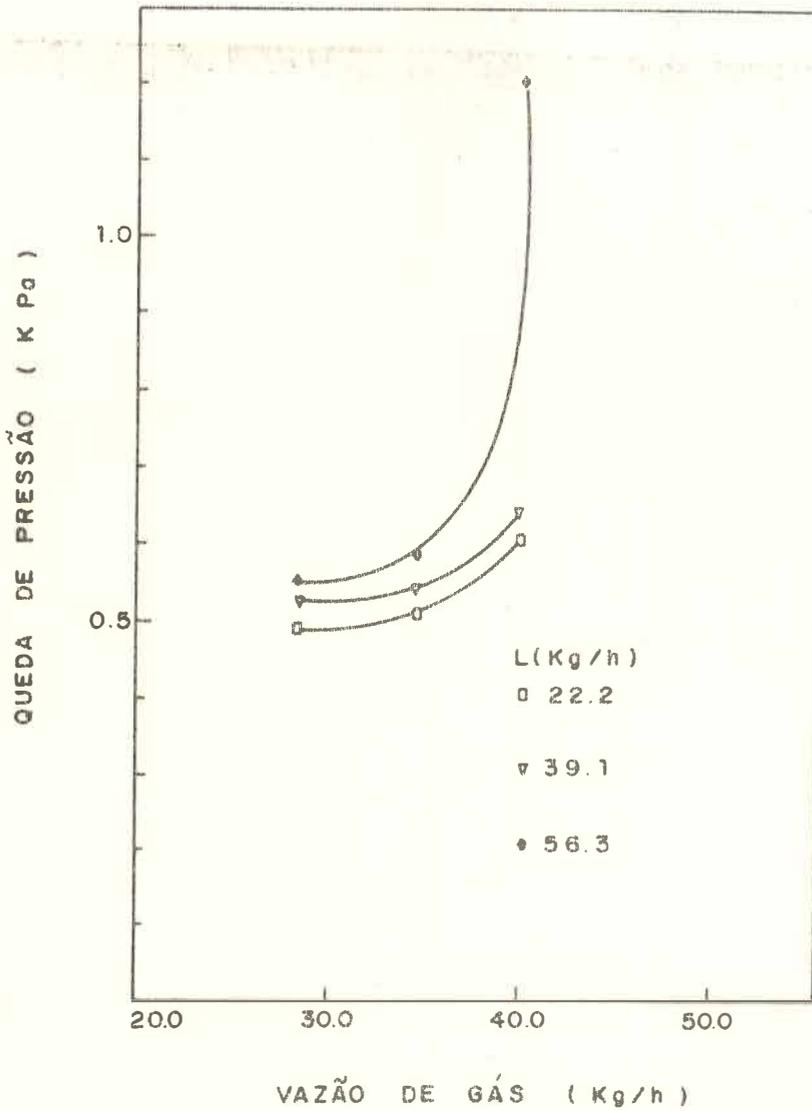


FIGURA (4.23) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro: Vazão de líquido  
 Sistema: ar - água  
 Prato:  $D = 0.098$  m, Área livre = 15%

Mahendru e Hackl operaram uma coluna de 0.31 m de diâmetro e para um prato com 10% de área livre, a vazões  $G = 28.4$  kg/h e  $231.1$  kg/h obtiveram uma altura de líquido de  $2.2 \times 10^{-2}$  m, enquanto no presente trabalho, para as mesmas vazões  $h = 4.9 \times 10^{-2}$  m (prato 10%).

Com o aumento da vazão de gás até  $G = 44.6$  kg/h a L constante esta diferença aumentou para  $3.1 \times 10^{-2}$  m e  $10.7 \times 10^{-2}$  m, nos testes de Mahendru (5) e deste trabalho, respectivamente.

#### 4.10 - EFEITO DA TENSÃO SUPERFICIAL

Com o objetivo de estudar o efeito da tensão superficial sobre as alturas de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão, foram realizados experimentos utilizando-se como fase líquida, misturas Etanol-água de diferentes composições. Os experimentos foram realizados na coluna de 0.18 m de diâmetro, utilizando-se o prato com 15% de área livre. Os resultados destas experiências encontram-se em Apêndice B tabela B.7 .

As tabelas 4.5 a 4.8 mostram os regimes de fluxo das dispersões gás-líquido formadas, para a faixa de vazão de gás  $G = 40.0$  a  $63.4$  kg/h ( $v = 0.4$  a  $0.62$  m/s) e de líquido  $L = 231.1$  a  $330.1$  kg/h.

As figuras 4.24 a 4.27 mostram a variação das alturas de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão, respectivamente, como função da vazão de gás, tendo como parâmetro a vazão de líquido, para o sistema ar - 1% etanol.

Comparando-se as figuras 4.24 , 4.25 e 4.27 , para as alturas de líquido, da espuma e queda de pressão, respectivamente, com a tabela 4.5 verifica-se a transição do regime "Borbulhamento" para a "Froth" a  $G \approx 50.0$  kg/h ( $v \approx 0.5$  m/s). Nesta região, assim como no sistema ar-água,  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  aumentam acentuadamente com a vazão de gás ( $L = 231.1$  a  $281.9$  kg/h).

Para  $L = 330.1$  kg/h, a dispersão é do tipo "Froth", com movimentos oscilatórios, causando uma brusca variação de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  em relação a vazão de gás. Nesta região, uma variação da vazão de gás entre  $40.0$  e  $48.6$  kg/h ( $v = 0.4$  a  $0.48$  m/s ) eleva a altura de líquido de  $2.7 \times 10^{-2}$  a  $9.0 \times 10^{-2}$  m , a altura da espuma de  $9 \times 10^{-2}$  a  $2.5 \times 10^{-2}$  m e a queda de pressão de  $2.3$  a  $9.4$  KPa. Por sua vez, a porosidade da (dis

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS (Kg/h)		
	40.0	48.6	63.4
231.1	B	B	F
281.1	B	B	F
330.1	B	F	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"			

TABELA (4.5) Regimes de fluxo

Sistema : ar - 1% etanol

Prato : D=0.18m, Área livre = 15%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS (Kg/h)		
	40.0	48.6	63.4
231.1	B	B	F
281.1	B	B	F
330.1	B	B	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"			

TABELA (4.6) Regimes de fluxo

Sistema : ar - 3% etanol

Prato : D=0.18m, Área livre = 15%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS (Kg/h)		
	40.0	48.6	63.4
231.1	B	B	F
281.1	B	B	F
330.1	B	B	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"			

TABELA ( 4.7 ) Regimes de fluxo

Sistema : ar - 5% etanol

Prato : D=0.18m, Área livre =15%

VAZÃO DE LÍQUIDO ( Kg/h )	VAZÃO DE GÁS (Kg/h)		
	40.0	48.6	63.4
231.1	B	B	F
281.1	B	B	F
330.1	B	B	F
B = "BORBULHAMENTO" — F = "FROTH"			

TABELA ( 4.8 ) Regimes de fluxo

Sistema : ar - 15% etanol

Prato : D=0.18m, Área livre =15%

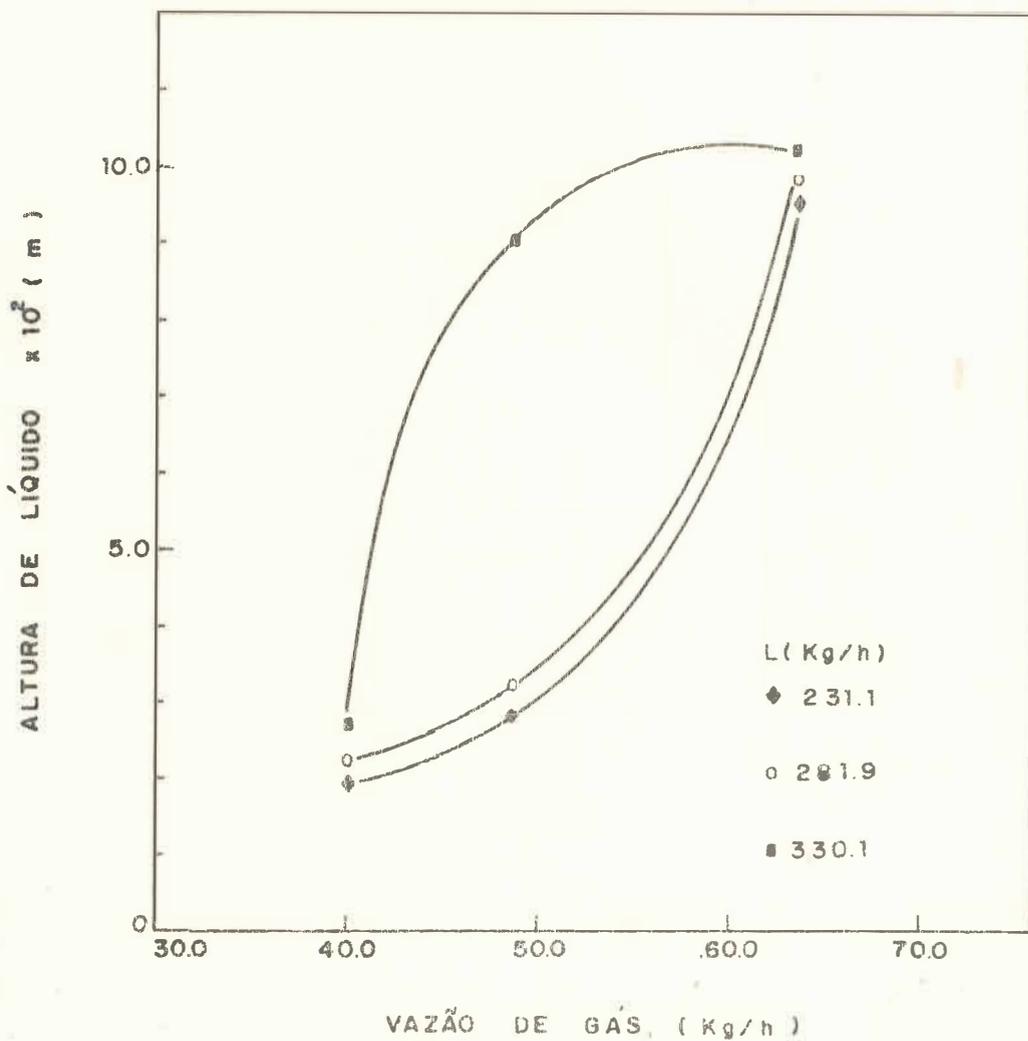


FIGURA (4.24) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro: Vazão de líquido

Sistema: ar - 1% etanol

Prato:  $D=0.18\text{ m}$ , Área livre = 15%

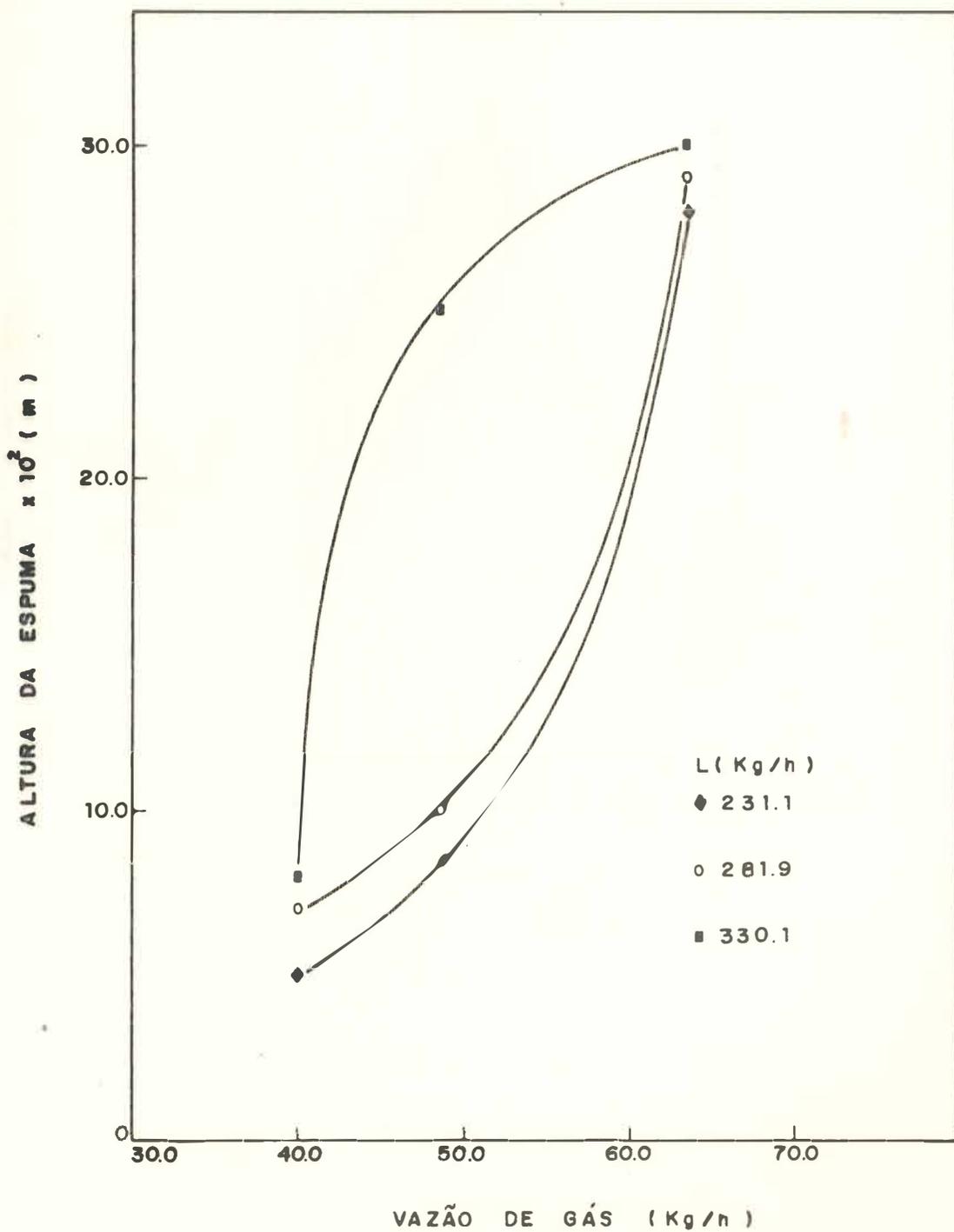


FIGURA (4.25) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 1% etanol

Prato :  $D=0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

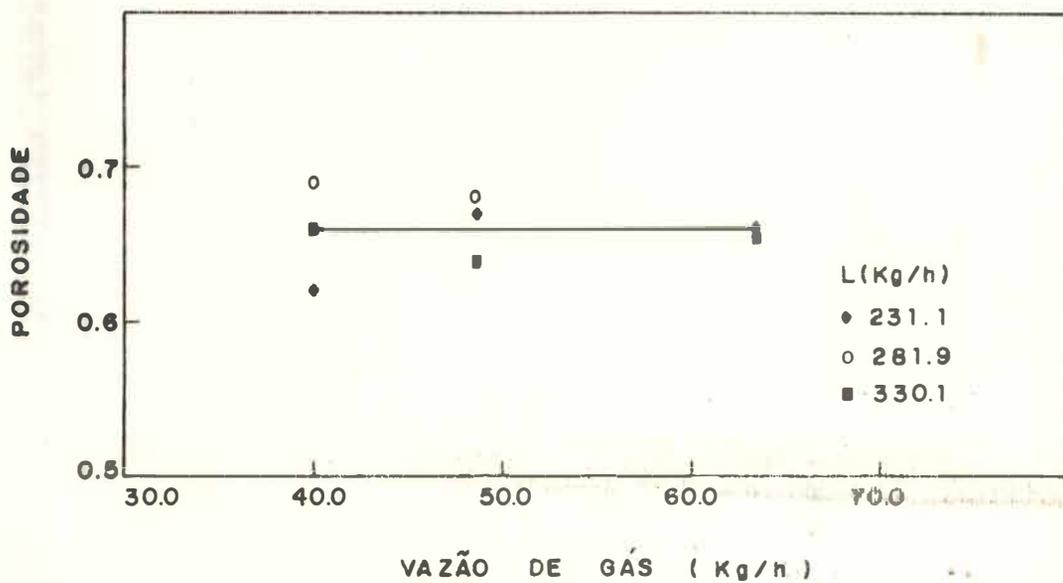


FIGURA ( 4.26 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 1% etanol

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$ , Área livre = 15%

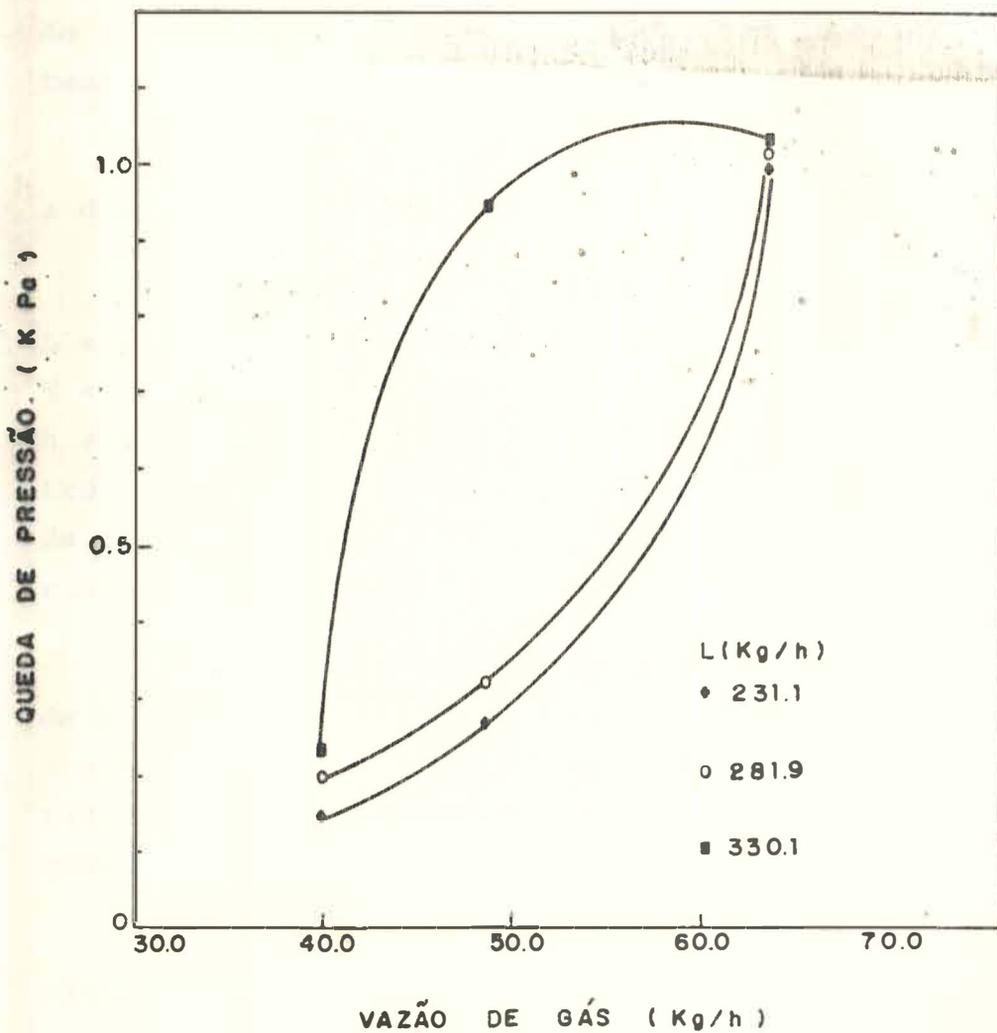


FIGURA ( 4.27 ) Quedo de pressão versus vazão de gás

Parâmetro : Vozão de líquido

Sistema : ar - 1% etanol

Prato :  $D = 0.18\text{ m}$  , Área livre = 15%

persão (fig. 4.26) foi correlacionada para todas as vazões de líquido (erro inferior a 6%) e apresentou um valor médio de 0.66

Comparando-se as figuras 4.24 a 4.27 com aquelas para altura de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão no sistema ar-água (figs. 4.4 , 4.8 , 4.12 e 4.16) , respectivamente, verifica-se que de um modo geral os valores de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  para ar - 1% etanol, são superiores aos do sistema ar-água.

Esta diferença mostra-se mais acentuada, quando a dispersão é do tipo "Froth".

Para a vazão de gás  $G = 63.4$  kg/h ( $v = 0.62$  m/s) e  $L = 231.1$  kg/h , enquanto no sistema ar-água  $h = 6.6 \times 10^{-2}$  m,  $H = 22.0 \times 10^{-2}$  m e  $\Delta P = 0.69$  KPa, no sistema ar - 1% etanol  $h = 9.0 \times 10^{-2}$  m ,  $H = 28.0 \times 10^{-2}$  m e  $\Delta P = 0.99$  KPa. Por outro lado, para as mesmas vazões de gás e líquido a porosidade foi  $\epsilon = 0.68$  e  $\epsilon = 0.66$  para os sistemas ar-água e ar - 1% etanol, respectivamente.

De acordo com o capítulo 3, a tensão superficial da água é  $\sigma = 72.0 \times 10^{-3}$  N/m e para a mistura 1% etanol ,  $\sigma = 65.0 \times 10^{-3}$  N/m. Desta maneira, verifica-se que as alturas de líquido, da espuma e a queda de pressão aumentaram , quando a tensão superficial diminuiu.

As figuras 4.28 e 4.31 mostram a variação das alturas de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão, respectivamente, como função da vazão de gás, tendo como parâmetro a vazão de líquido, para o sistema ar - 3% etanol.

Comparando-se as figuras 4.28 a 4.31 com a tabela 4.6 , para as mesmas vazões, verifica-se a transição do regime "Borbulhamento" para o regime "Froth". Para a vazão  $L = 231.1$  kg/h , a variação de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  em relação a vazão de gás, foi linear durante a transição; para as vazões

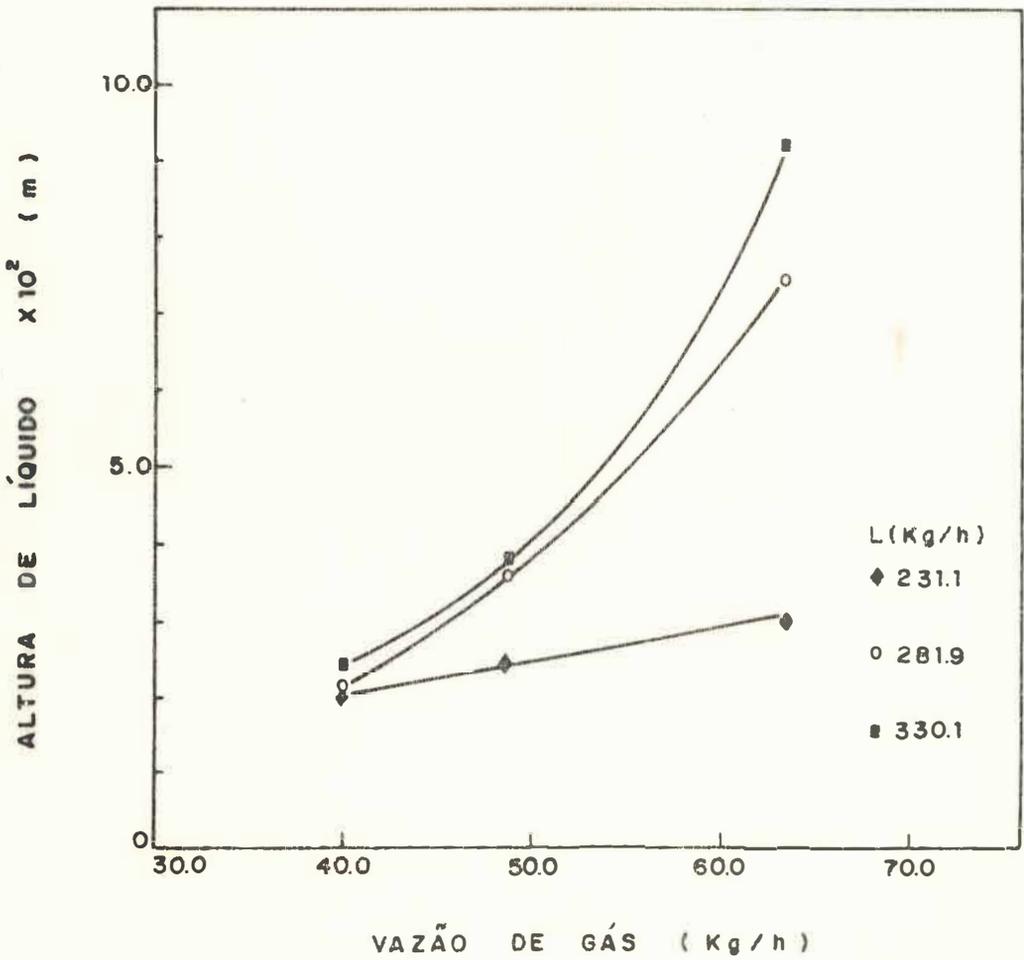


FIGURA ( 4.2B ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 3% etanol

Proto :  $D=0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

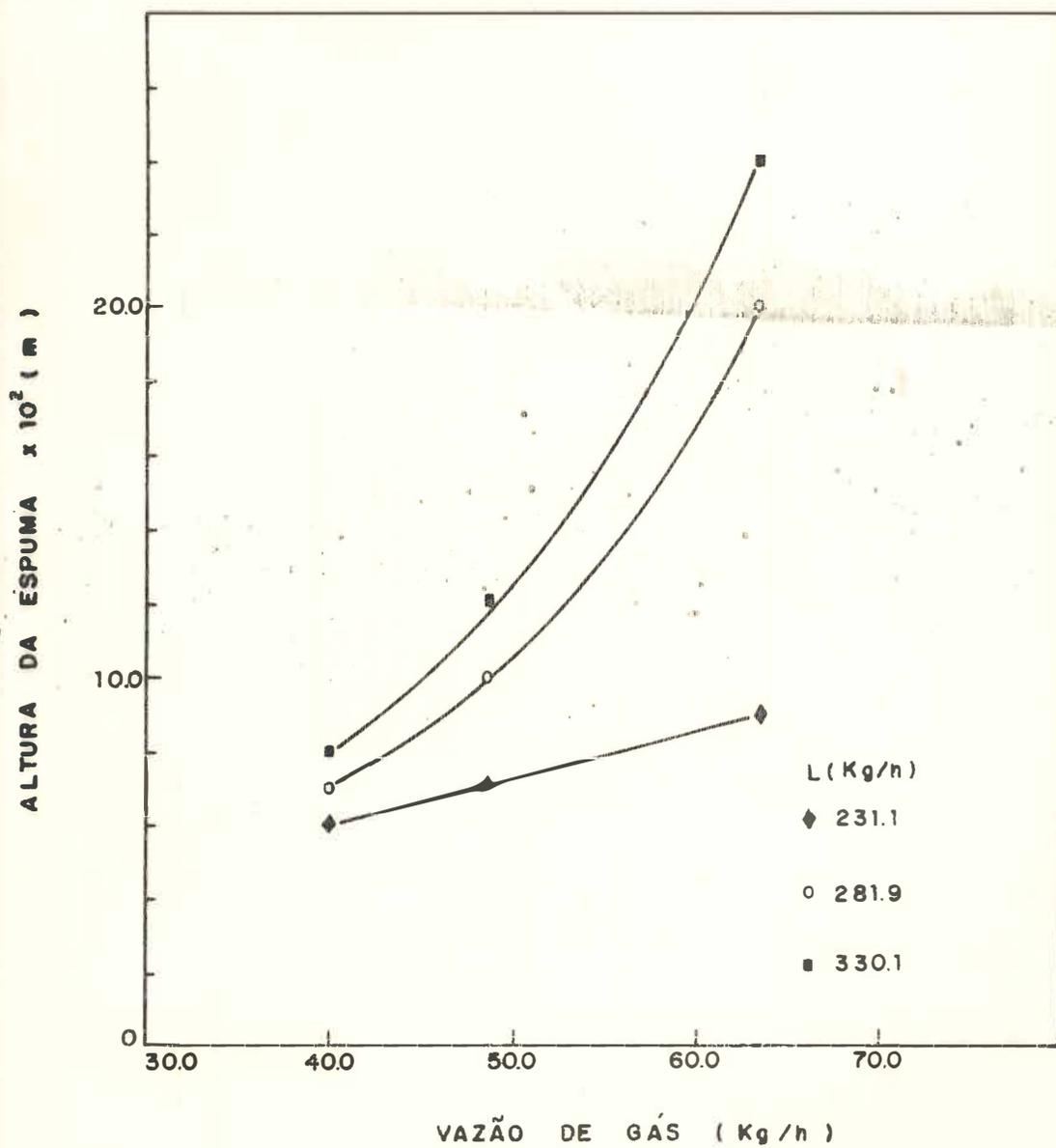


FIGURA ( 4.29 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 3% etanol

Prato :  $D = 0.18$  m , Área livre = 15%

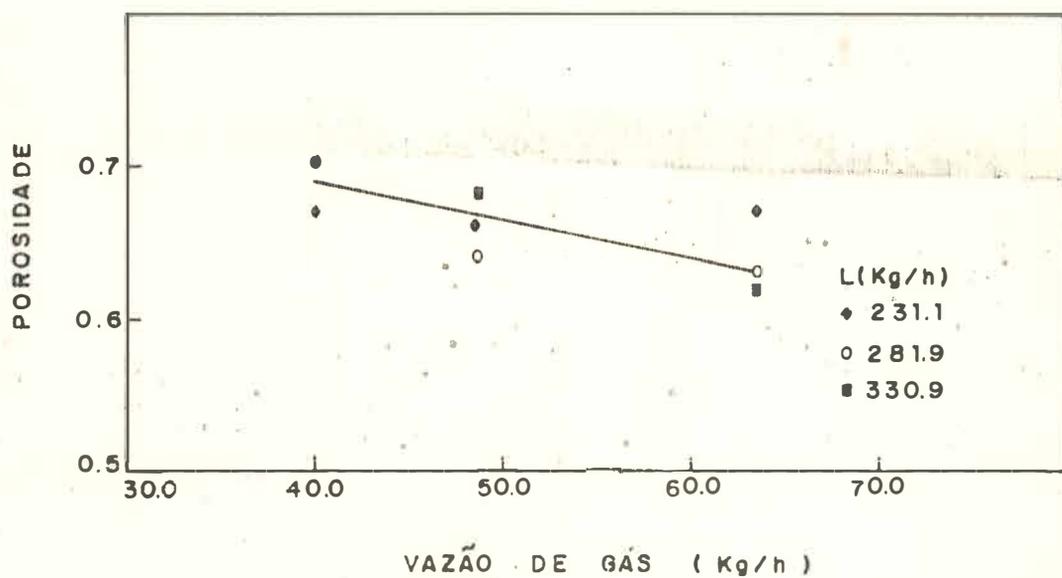


FIGURA ( 4.30 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 3% etanol

Prato :  $D = 0.18$  m , Área livre = 15%

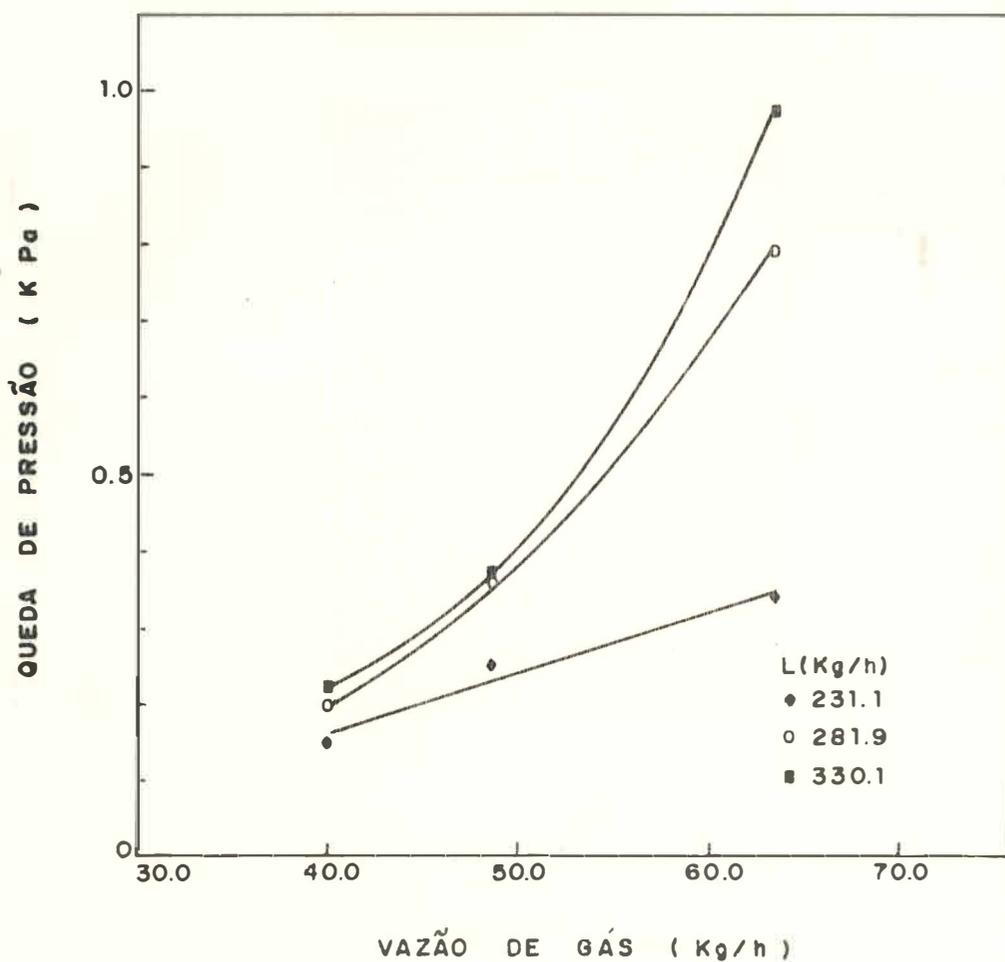


FIGURA ( 4.31 ) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - 3% etanol  
 Prato :  $D = 0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

$L = 281.9$  a  $330.1$  kg/h esta variação foi mais acentuada, observando-se a transição a  $G \approx 50$  kg/h ( $v = 0.5$  m/s). Nesta região, uma variação da vazão de gás entre  $48.6$  e  $63.4$  kg/h ( $v = 0.48$  a  $0.62$  m/s), a  $L = 231.1$  kg/h eleva a altura de líquido de  $2.3 \times 10^{-2}$  a  $3.4 \times 10^{-2}$  m, a altura da espuma de  $7 \times 10^{-2}$  a  $9 \times 10^{-2}$  m e a queda de pressão de  $0.24$  a  $0.3$  KPa. A  $L = 330.1$  kg/h, a mesma variação de  $G$  eleva  $h$  de  $3.8 \times 10^{-2}$  a  $9.2 \times 10^{-2}$  m,  $H$  de  $12.0 \times 10^{-2}$  a  $24 \times 10^{-2}$  e  $\Delta P$  de  $0.37$  a  $0.97$  KPa. Por outro lado, a porosidade apresentou um valor médio de  $0.66$ , obtido com erro inferior a  $6\%$ , para todas as vazões de líquido estudados.

Comparando-se as figuras 4.24 a 4.27 e 4.28 a 4.31, para as alturas de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão, respectivamente, verifica-se que estes valores, diminuíram quando a tensão superficial diminuiu ( $\sigma = 65.0 \times 10^{-3}$  N/m para sistemas ar - 1% etanol e  $\sigma = 53.0 \times 10^{-3}$  N/m para sistemas ar - 3% etanol); enquanto isso o valor médio da porosidade permaneceu constante e igual a  $0.66$ .

Para a vazão de gás  $G = 63.4$  kg/h enquanto no sistema ar - 3% etanol  $h = 3.0 \times 10^{-2}$  m,  $H = 9.0 \times 10^{-2}$  m e  $\Delta P = 0.34$  KPa, no sistema ar - 1% etanol estes valores foram, respectivamente,  $h = 9.0 \times 10^{-2}$  m,  $H = 28.0 \times 10^{-2}$  m e  $\Delta P = 0.99$  KPa.

As figuras 4.32 a 4.35 e 4.36 a 4.39, mostram a variação das alturas de líquido, da espuma, porosidade e queda de pressão para os sistemas ar - 5% etanol e ar - 15% etanol, respectivamente.

Comparando-se as figuras 4.32 a 4.35, com as tabelas 4.7 e 4.8, observa-se um comportamento semelhante de ambos os sistemas, quanto ao regime de fluxo da dispersão gás líquido. Verifica-se, então que, nos dois sistemas a transição "Borbulhamento-Froth" ocorreu a  $G \approx 50.0$  kg/h ( $v \approx 0.50$  m/s), para  $L = 231.1$  e  $281.9$  kg/h, com um acentuado aumento de  $h$ ,  $H$  e  $P$  em relação a vazão de gás. Para os dois sistemas, é di

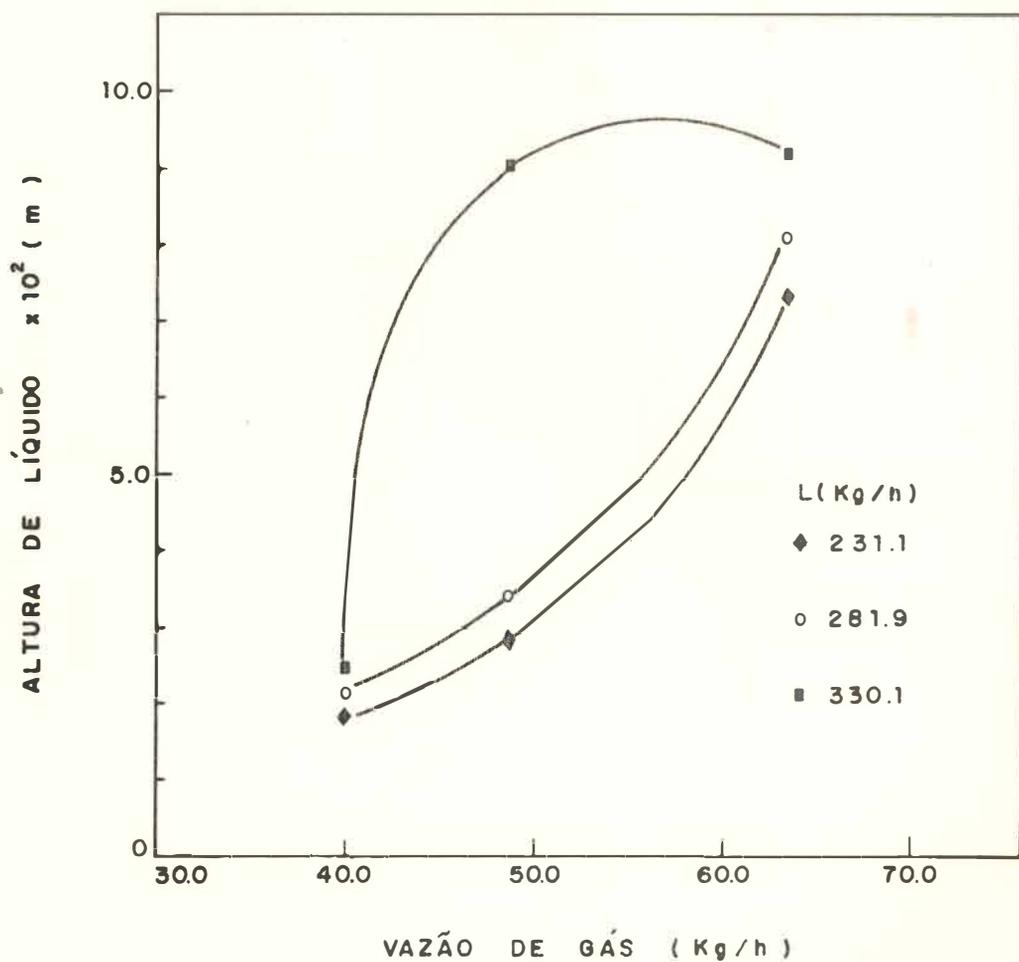


FIGURA ( 4.32 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 5% etanol

Prato :  $D=0.18$  m , Área livre = 15 %

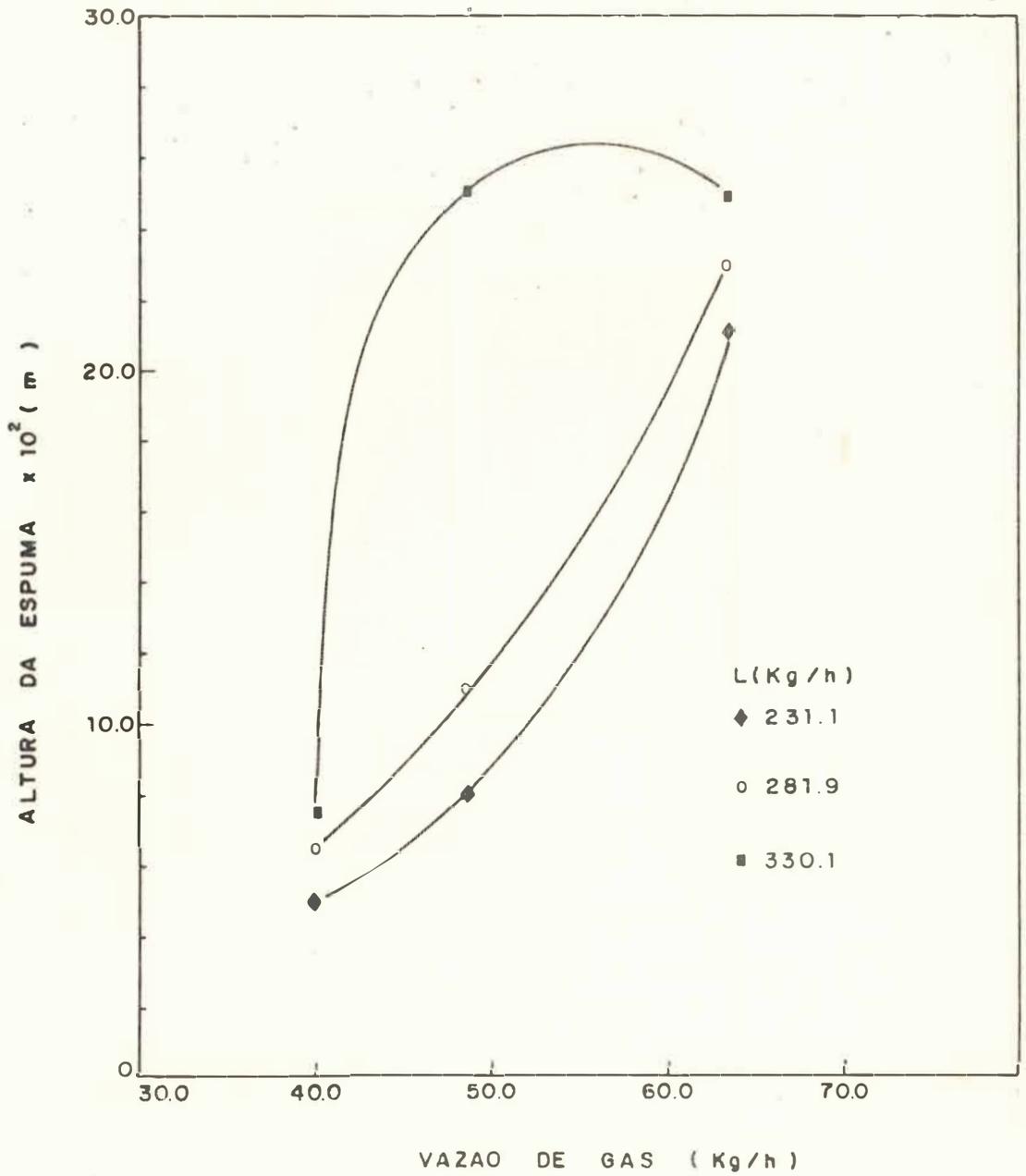


FIGURA ( 4.33 ) Altura da espuma versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - 5% etanol  
 Prato :  $D=0.18\text{m}$  , Área livre = 15 %

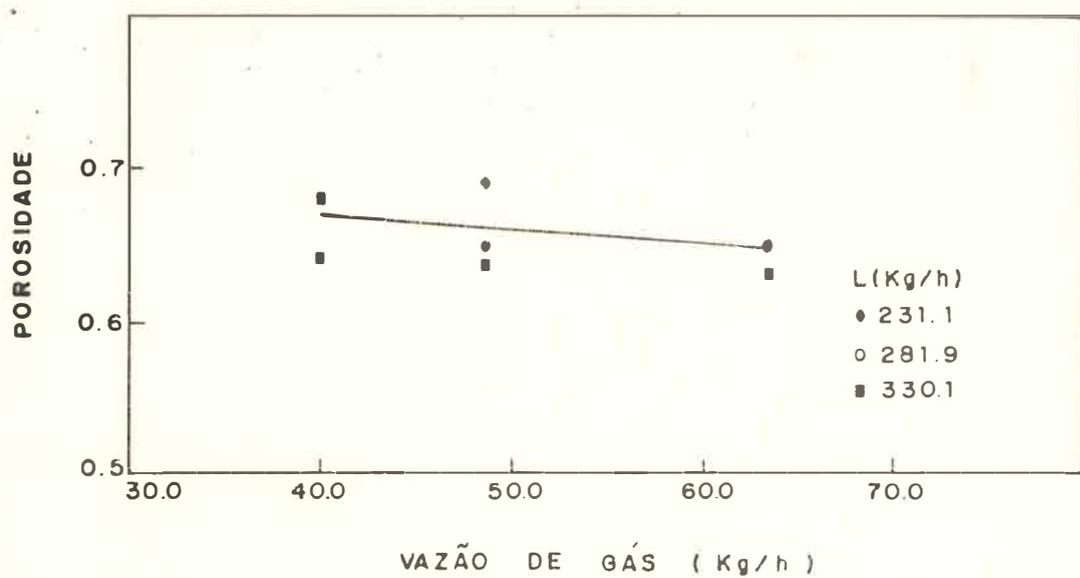


FIGURA ( 4.34 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 5% etanol

Prato :  $D = 0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

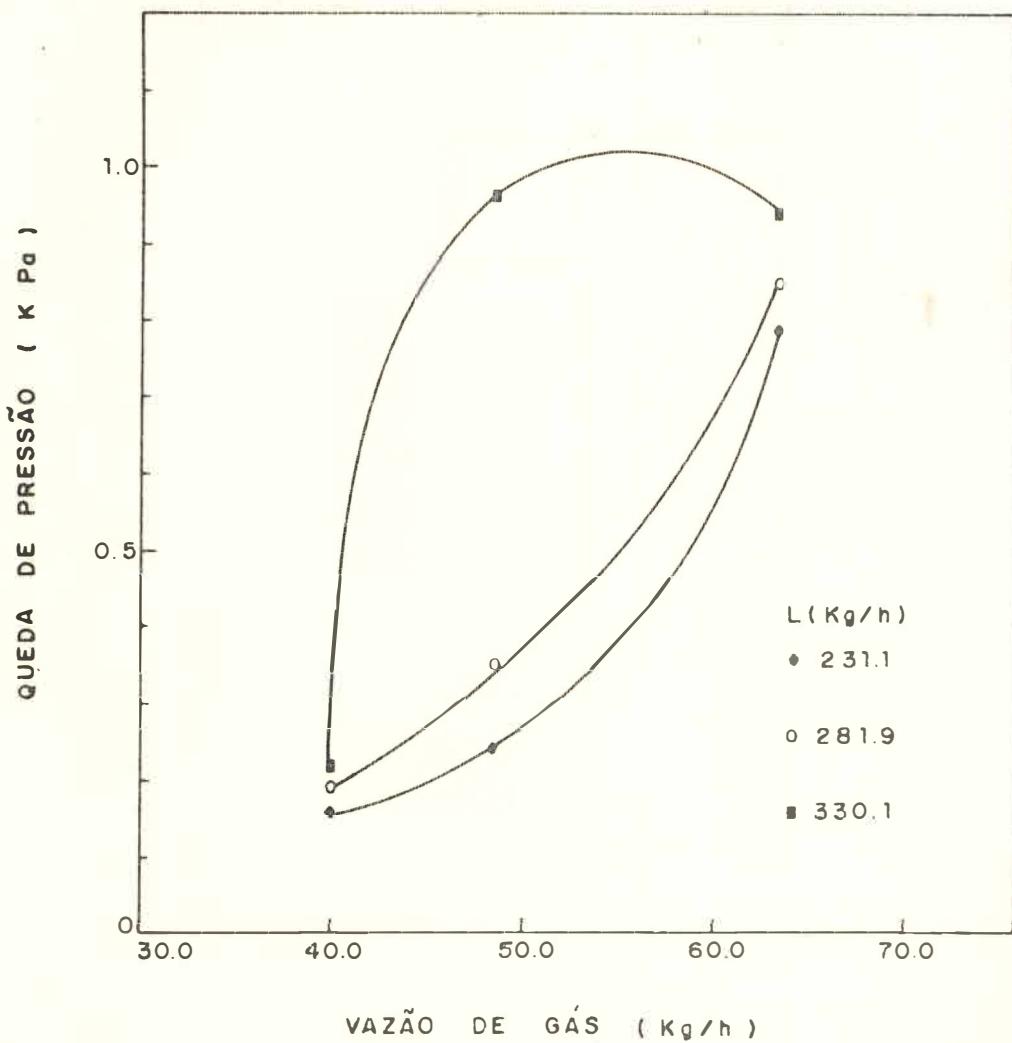


FIGURA ( 4.35 ) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - 5% etanol  
 Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 15%

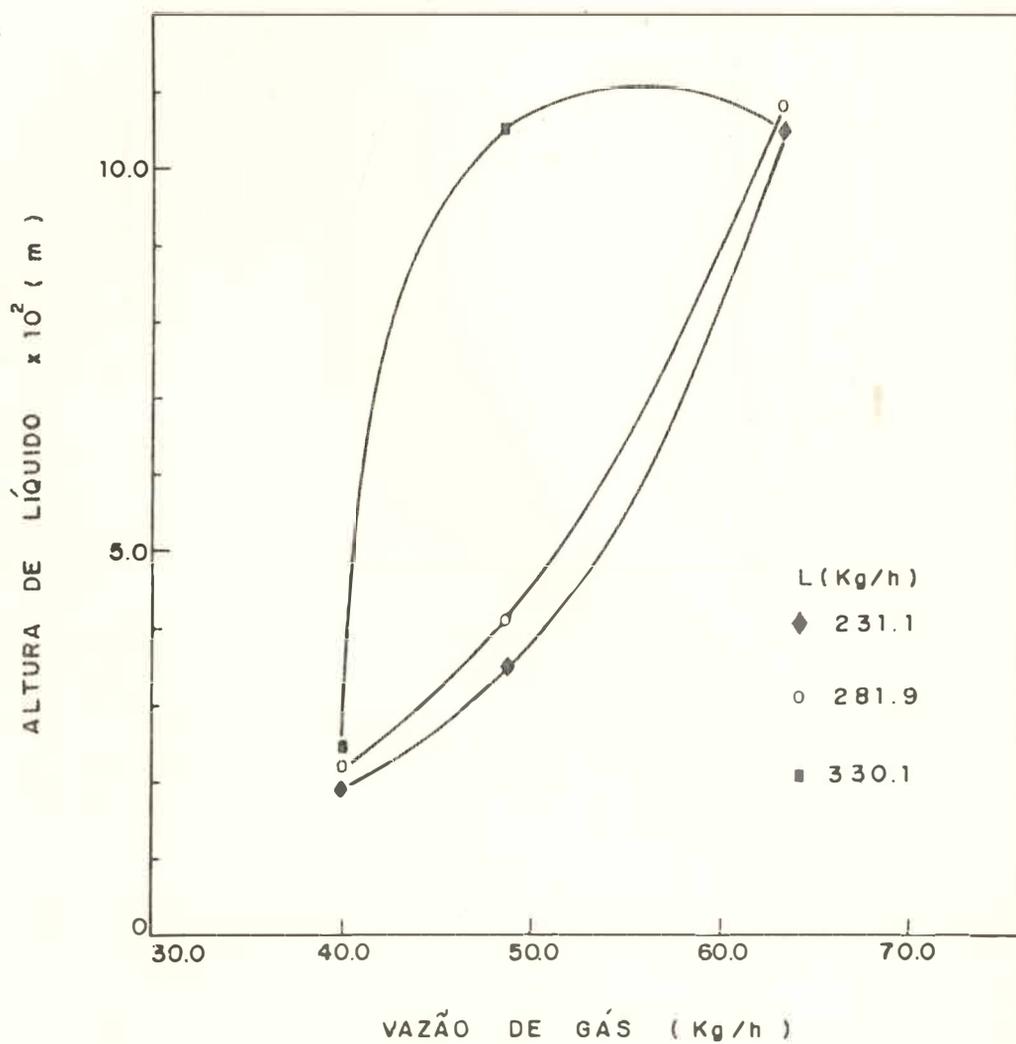


FIGURA ( 4.36 ) Altura de líquido versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 15% etanol

Prato :  $D=0.18\text{ m}$  , Área livre = 15 %

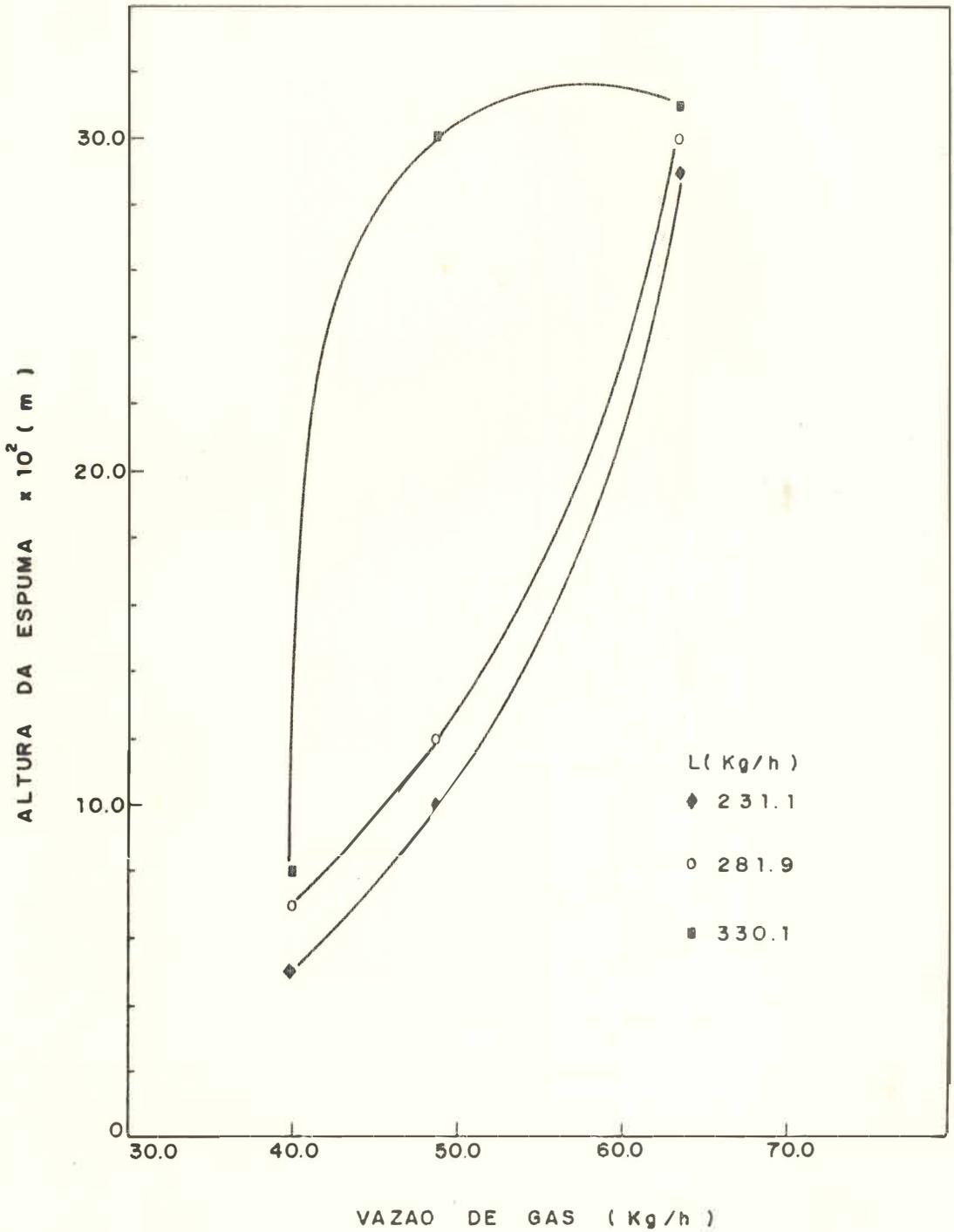


FIGURA ( 4.37 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 15% etanol

Prato : D=0.18m , Área livre = 15%

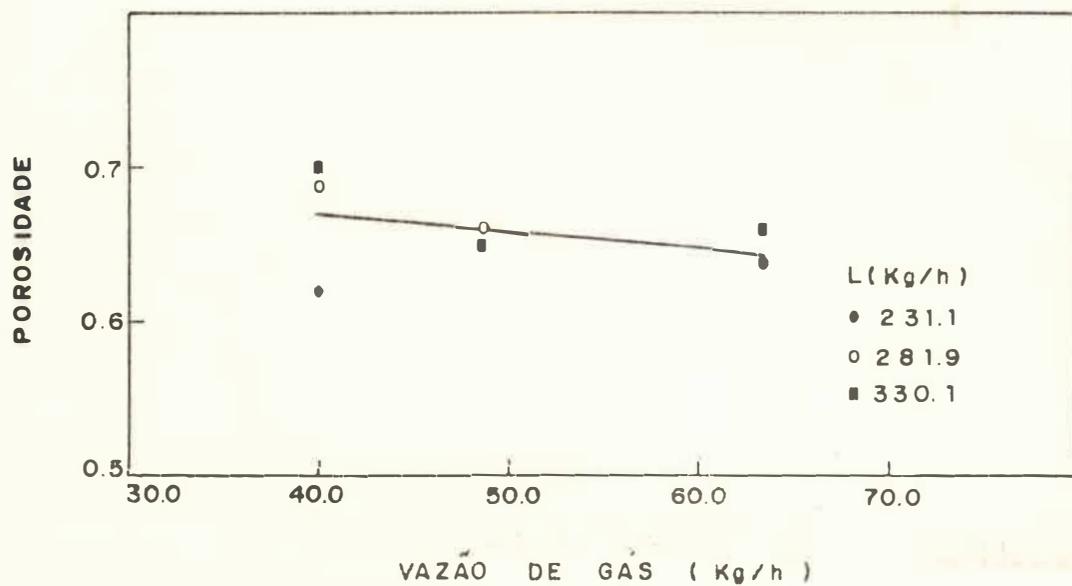


FIGURA ( 4.38 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - 15% etanol

Proto :  $D = 0.18$  m , Area livre = 15%

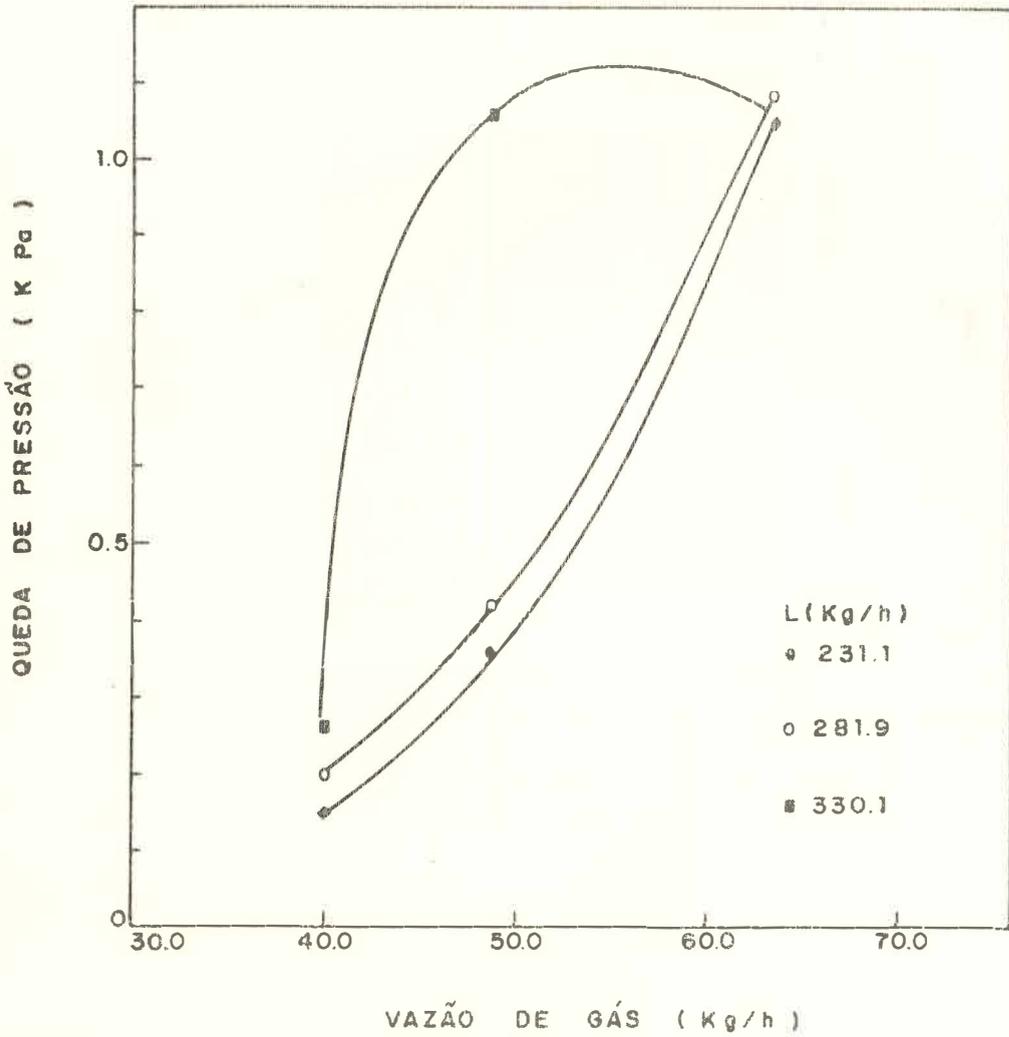


FIGURA (4.39) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - 15% etanol  
 Prato :  $D = 0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

minui levemente em relação a vazão de gás, no entanto seu valor médio foi de 0.66 em ambos os casos.

Destas figuras, verifica-se, no entanto, que com o aumento da composição da mistura na faixa 5 a 15% , os valores de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  também aumentaram, embora a tensão superficial tenha diminuído de  $45.0 \times 10^{-3}$  N/m (mistura - 5% etanol) para  $29.5 \times 10^{-3}$  N/m (mistura - 15% etanol).

Para a vazão de gás  $G = 63.4$  kg/h ( $v = 0.62$  m/s) e  $L = 231.1$  kg/h , enquanto para o sistema ar - 5% etanol  $h = 7.3 \times 10^{-2}$  m ,  $H = 21.0 \times 10^{-2}$  m e  $\Delta P = 0.79$  KPa , para o sistema ar - 15% etanol estes valores foram respectivamente,  $11.0 \times 10^{-2}$  m ,  $29.0 \times 10^{-2}$  m e 1.05 KPa.

De uma maneira geral verificou-se que para os sistemas ar - soluções de etanol, com o aumento da quantidade de álcool na mistura de 1 para 3% moles de etanol, os valores das alturas de líquido, da espuma e queda de pressão diminuiram com a tensão superficial do líquido.

No entanto, com o aumento da quantidade de álcool de 3 para 15% moles de etanol, os valores de  $h$ ,  $H$  e  $\Delta P$  aumentaram enquanto a tensão superficial diminuiu. Verifica-se desta maneira influências distintas da tensão superficial do líquido sobre os parâmetros que caracterizam a dispersão.

#### 4.11 - EFEITO DO DIÂMETRO DO ORIFÍCIO

Com o objetivo de estudar o efeito do diâmetro do orifício sobre as alturas de líquido, da espuma, porosidade da dispersão e queda de pressão, foram realizados experimentos na coluna de 0.18 m de diâmetro, utilizando-se um prato com 15% de área livre e diâmetro de orifício de  $3.5 \times 10^{-3}$  m. Os experimentos foram realizados para o sistema ar-água e seus resultados encontram-se em Apêndice B, tabela B.8.

Para todas as faixas de vazões de gás e líquido estudados a dispersão foi do tipo "Borbulhamento".

As figuras 4.40 a 4.43, mostram a variação das alturas de líquido, da espuma, porosidade da dispersão e queda de pressão, em relação a vazão de gás, para o prato com  $d = 3.5 \times 10^{-3}$  m.

Comparando-se estas figuras com as figuras 4.4, 4.8, 4.12 e 4.17 para  $h$ ,  $H$ ,  $\epsilon$  e  $\Delta P$ , respectivamente, no prato com  $d = 10.7 \times 10^{-3}$  m, verifica-se que o diâmetro do orifício, diminuiu, as alturas de líquido e da espuma, a porosidade da dispersão e a queda de pressão aumentaram.

Para  $G = 40.0$  kg/h ( $v = 0.4$  m/s) e  $L = 231.1$  kg/h, enquanto no prato com diâmetro de orifício de  $10.7 \times 10^{-3}$  m,  $h = 2.6 \times 10^{-2}$  m,  $H = 4.5 \times 10^{-2}$  m,  $\epsilon = 0.66$  e  $\Delta P = 0.19$  KPa, no prato com  $d = 3.5 \times 10^{-3}$  m, estes valores foram respectivamente,  $5.7 \times 10^{-2}$  m,  $18. \times 10^{-2}$  m,  $\epsilon = 0.68$  e  $\Delta P = 0.57$  KPa.

Desta maneira, para pratos perfurados sem vertedor, com mesmo diâmetro e área livre, as alturas de líquido, da espuma, a porosidade da dispersão e a queda de pressão, serão maiores quanto menor for o diâmetro dos orifícios utilizados, a vazões de gás e líquido constantes.

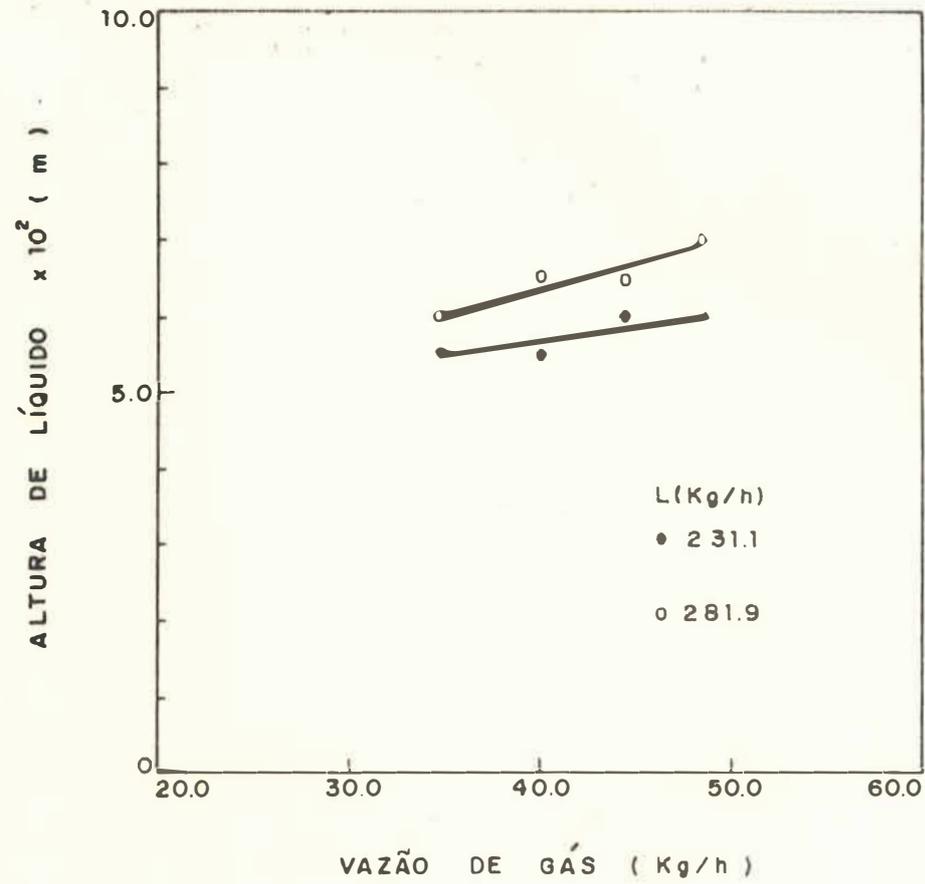


FIGURA ( 4.40 ) Altura de líquido versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D=0.18\text{m}$  , Área livre = 15%

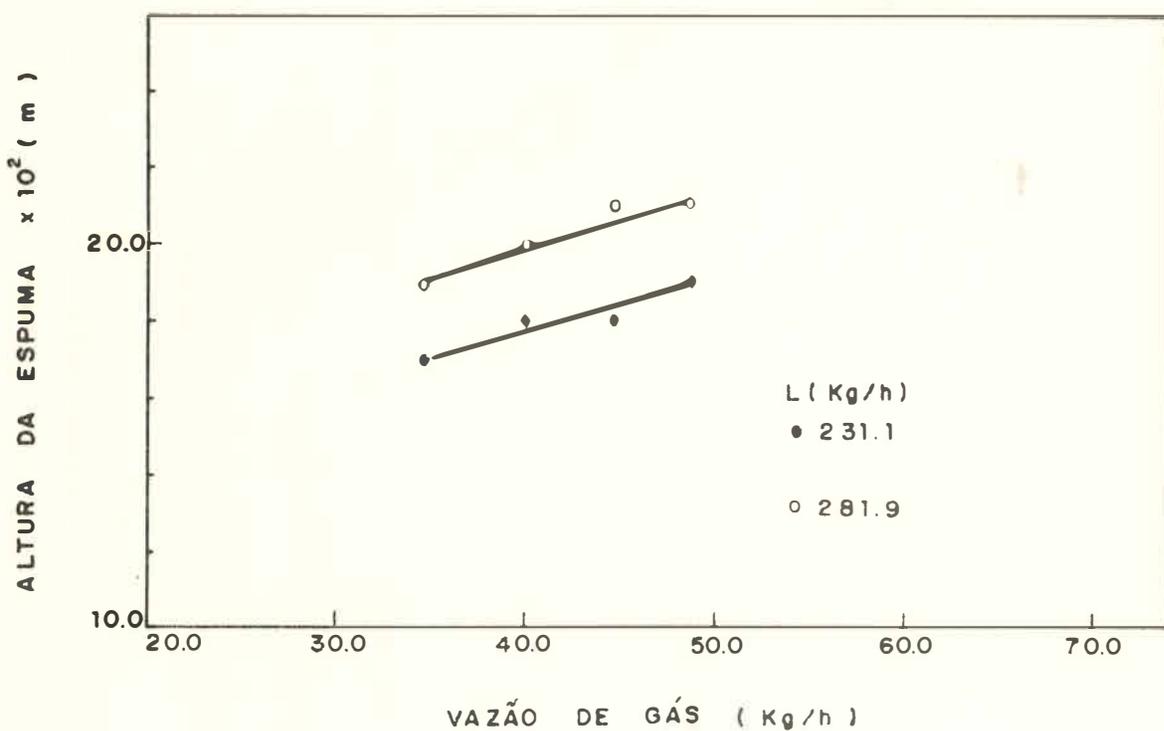


FIGURA ( 4.41 ) Altura da espuma versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 15 %

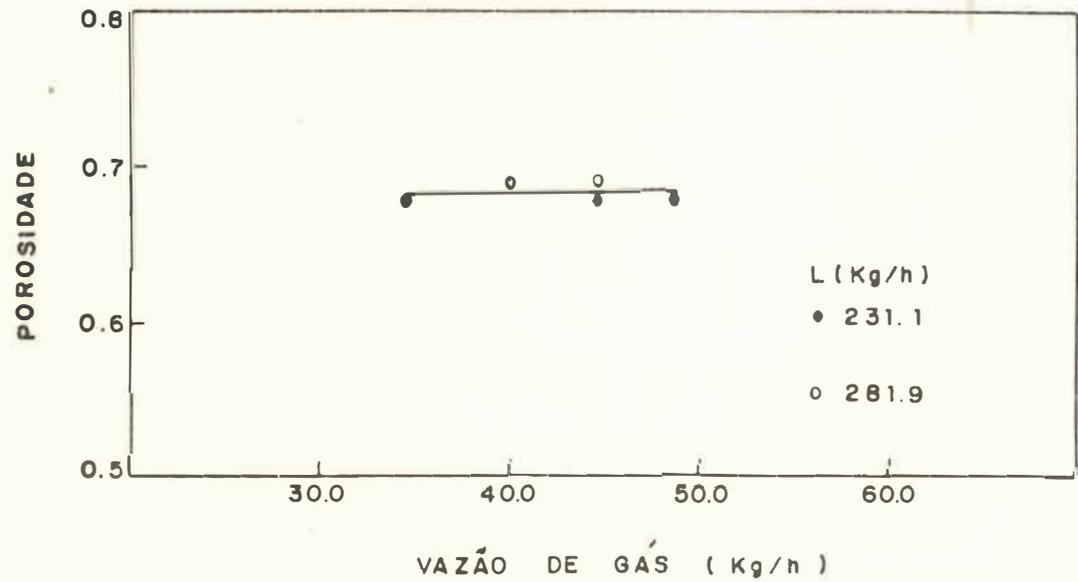


FIGURA ( 4.42 ) Porosidade da dispersão versus vazão de gás

Parâmetro : Vazão de líquido

Sistema : ar - água

Prato :  $D = 0.18 \text{ m}$  , Área livre = 15 %

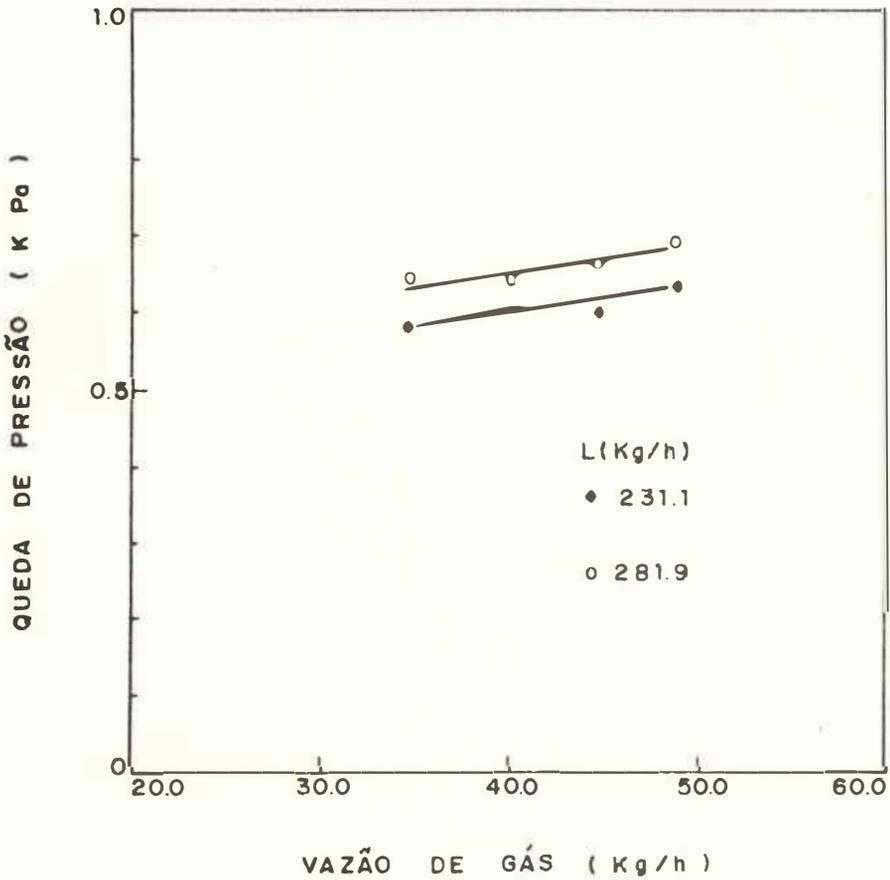


FIGURA (4.43) Queda de pressão versus vazão de gás  
 Parâmetro : Vazão de líquido  
 Sistema : ar - água  
 Prato :  $D = 0.18\text{m}$  , Área livre = 15 %

A dispersão gás-líquido em pratos perfurados, depende da velocidade de gás através dos orifícios. No entanto, no caso dos pratos sem vertedor, devido a que o gás e o líquido fluem através das mesmas aberturas, a velocidade do gás no orifício não pode ser calculada através da simples relação:

$$v_o = v/\phi.$$

Sob estas condições, as velocidades de gás no orifício, para os diâmetros estudados ( $d = 3.5 \times 10^{-3}$  e  $10.7 \times 10^{-3}$  m) são diferentes, influenciando de maneira distinta, os parâmetros que caracterizam a dispersão gás-líquido.

#### 4.12 - CONCLUSÃO

Dos resultados apresentados neste capítulo, verificamos a influência das vazões de gás e líquido sobre os tipos de dispersões que se formam em pratos perfurados sem vertedor.

Durante a realização do presente trabalho foram observados os movimentos oscilatórios da dispersão gás - líquido, principalmente, o movimento "rotacional", certamente um tipo de oscilação característica de pratos sem vertedor.

Observou-se então, que a presença de oscilações na dispersão gás - líquido aumenta significativamente a instabilidade de operação do prato.

Dos resultados experimentais verificou-se que a área livre de escoamento, o diâmetro da coluna, o diâmetro do orifício e a tensão superficial do líquido influenciam fortemente nos valores dos parâmetros que caracterizam o comportamento da dispersão, tais como altura de líquido e da espuma e queda de pressão.

CAPÍTULO - 5

ANÁLISE DIMENSIONAL

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, estabelecemos que as con  
dições de fluxo que se desenvolvem em um prato perfurado sem  
 vertedor, são de intensa agitação e dispersão de fase. Desta  
 maneira, é unânime entre a maioria dos autores (4), (5), (6),  
 (8), que a descrição de tais condições hidrodinâmicas por  
 um modelo simples é sempre muito difícil. Nestas condições,  
 devido ao complicado fenômeno de fluxo que se desenvolve nos  
 pratos perfurados sem vertedor, a modelagem matemática dos re  
sultados experimentais, só é possível utilizando-se a teoria  
 da análise dimensional.

No presente trabalho, foram estudados os efeitos  
 das vazões de gás e líquido e dos parâmetros geométricos do  
 prato sobre a altura de líquido, porosidade e estabilidade da  
 dispersão gás-líquido. Deste modo, no presente capítulo são  
 apresentadas correlações empíricas, desenvolvidas com base  
 nos resultados experimentais, que permitirão prever a altura  
 de líquido, a porosidade da dispersão gás-líquido e a máxima  
 velocidade de gás para a qual esta dispersão é estável.

Mahendru e Hackl (5) propuseram uma equação empí  
 rica para o cálculo da altura de líquido, como função da ve  
 locidade de gás, vazão de líquido, de suas densidades e da  
 geometria do prato. A equação proposta é a seguinte:

$$h = 0.065 \frac{L^{*n} \left( v \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_{ar}}} \right)^{0.75}}{\rho_L \phi^{0.5} (T/d)^{0.42}} \tag{5.1}$$

onde

$$n = 0.3162 \phi^{-0.25} \tag{5.2}$$

Da equação (5.1) verifica-se de uma maneira geral , a influência das massas específicas do líquido e do gás e da geometria do prato. No entanto, segundo estes autores, o modelo é válido apenas para sistemas pouco ou não espumantes. Embora tenham utilizado em seus experimentos , sistemas ar-água e ar-soluções de etanol, de glicerina e de cloreto de cálcio, o modelo proposto foi baseado em resultados experimentais para o sistema ar-água, o qual é certamente menos espumante do que soluções de álcoois e soluções de glicerina, por exemplo.

A teoria da análise dimensional, tem sido utilizada também para correlacionar a porosidade da dispersão em função da velocidade de gás e da geometria do prato.

Rylek e Standart (6) propuseram a seguinte equação para o cálculo de  $\epsilon$ :

$$\epsilon = 1 - \frac{0.21}{\phi^{0.5}} \left[ \frac{gH}{v_o^2} \right]^{0.2}$$

Nesta equação a porosidade da dispersão é determinada para os pratos sem vertedor do tipo "grelha" (Gridtray) em função da velocidade de gás no orifício, uma quantidade muito difícil de ser determinada, para estes tipos de prato.

Mahendru e Hackl (5) correlacionaram a porosidade da dispersão segundo a equação:

$$\varepsilon = 1 - 0.0946 \left[ \frac{v^2}{gh} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \right]^{-0.2}$$

Nesta equação a porosidade da mistura gás-líquido é correlacionada com base em dados experimentais somente do sistema ar-água.

Verifica-se ainda da equação (5.1) a relação da altura de líquido em função da razão entre as densidades do gás e do ar, embora os autores tenham utilizado em seus experimentos apenas o ar, como fase gás. Outro aspecto a considerar é a dupla influência da área livre do prato sobre a altura de líquido, na forma de um parâmetro independente e na forma de um expoente da vazão de líquido. Desta maneira, a equação (5.1) não permite prever a altura de líquido, para sistemas com propriedades físicas, diferentes do sistema ar-água, tais como tensão superficial e viscosidade, não consideradas.

Rylek e Standart (6) correlacionaram a altura de líquido, para os pratos, sem vertedor, do tipo "grelha" (Gridtray) de acordo com a equação:

$$h^{0.6} = 2.3 \times 10^4 \frac{H \sigma^{1.3} \mu_L^{0.25}}{\rho_L^{0.25} G^{0.5}} \quad (5.3)$$

Da equação (5.3) verifica-se a influência das propriedades físicas do líquido e da vazão de gás. No entanto, estes autores correlacionaram a altura de líquido em função da altura da espuma, um parâmetro que assim como o primeiro, deve ser determinado em função das vazões de gás e líquido, de suas propriedades físicas e da geometria. Outro aspecto verificado da equação (5.3) é o de que as influências da geometria do prato e da vazão de líquido, sobre a altura de líquido, não consideradas. Desta maneira a equação (5.3) não pode ser utilizada para prever a altura de líquido para os pratos perfurados sem vertedor, geometricamente diferentes dos pratos tipo "grelha" (Gridtray).

Em artigo citado em (6), Molokanov propôs a seguinte expressão, baseada em análise dimensional, para o cálculo da altura de líquido em pratos perfurados sem vertedor:

$$h = c \cdot \frac{v_o^2 \rho_G}{\rho_L g} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^a \cdot \left(\frac{2L}{d}\right)^{1.5} \cdot \phi \quad (5.4)$$

onde

$$a = 1.0 \quad ; \quad c = 1.3 \times 10^{-3} \quad \text{para } (L/G) < 0.35$$

e

$$a = 0.5 \quad ; \quad c = 1.87 \times 10^{-3} \quad \text{para } (L/G) > 0.35$$

No caso de (L/G) ser igual a 0.35 nada foi encontrado na literatura.

Da equação (5.4) verifica-se a influência na altura de líquido, das vazões de gás e líquido, do diâmetro dos orifícios, das densidades do gás e do líquido, da área livre do prato e da velocidade de gás no orifício. Verifica-se no entanto uma incoerência na equação (5.4), no que diz respeito à razão entre a vazão de líquido e o diâmetro do orifício, pois

esta não é adimensional, além de não serem incluídas as propriedades físicas dos elementos da mistura, tais como a viscosidade e a tensão superficial.

## 5.2 - PARÂMETROS FUNDAMENTAIS EM DISPERSÕES GÁS-LÍQUIDO

A fim de se obterem correlações para a predição da altura de líquido (clear liquid height), porosidade da dispersão, altura da espuma e velocidade máxima de operação estável dispersões do tipo Froth, iremos analisar os parâmetros fundamentais que caracterizam as dispersões gás-líquido.

### 5.2.1 - ALTURA DE LÍQUIDO

As características das dispersões gás-líquido em pratos perfurados sem vertedor, tem sido determinadas através de um balanço entre as forças de inércia através dos orifícios e as forças de gravidade no líquido próximo ao orifício. Para expressar este balanço, de uma forma adimensional, o número de Froude no orifício ( $v_0^2 / gh$ ) tem sido utilizado, com a altura de líquido como comprimento característico. Para representar a influência das vazões de gás e líquido e de suas densidades, sobre as características da dispersão tem sido utilizados dois números adimensionais: a razão entre as vazões de gás e de líquido ( $L/G$ ) e a razão entre suas massas específicas ( $\rho_L / \rho_G$ ). Do mesmo modo, a influência da geometria do prato sobre as características da dispersão gás-líquido tem sido representada através da razão entre a espessura do prato e o diâmetro do orifício ( $T/d$ ) e da área livre ( $\phi$ ).

No presente trabalho, verificou-se que a altura de líquido depende das vazões de gás e líquido, de suas propriedades físicas e da geometria do prato.

Considerando a influência da viscosidade e da tensão superficial do líquido, representos através do número adimensional  $(\mu_L v/\sigma)$  e tendo em vista que no caso do fluxo em contracorrente, a velocidade real do gás no orifício é uma quantidade difícil de ser determinada, pois a área de escoamento do gás no orifício não é constante durante a operação do prato, propomos que a altura de líquido seja calculada através da seguinte equação :

$$\left( \frac{hg}{v^2} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) = 13.34 \left( \frac{L}{G} \right)^{0.9} \left( \frac{T}{d} \right)^{0.8} \phi^{-3.0} \left( \frac{\sigma}{\mu_L v} \right)^{-0.2} \quad (5.5)$$

$$\text{ou } h = \frac{1.0 \times 10^{-2} L^{0.9} v^{1.3} \rho_G^{0.1} (\mu_L/\sigma)^{0.2}}{1.0 \times 10^{-2} g \rho_L \phi^{3.0} D^{1.8} (d/T)^{0.8}} \quad (5.5a)$$

A figura 5.1 mostra a altura de líquido calculada através da equação (5.5), para todos os resultados experimentais obtidos.

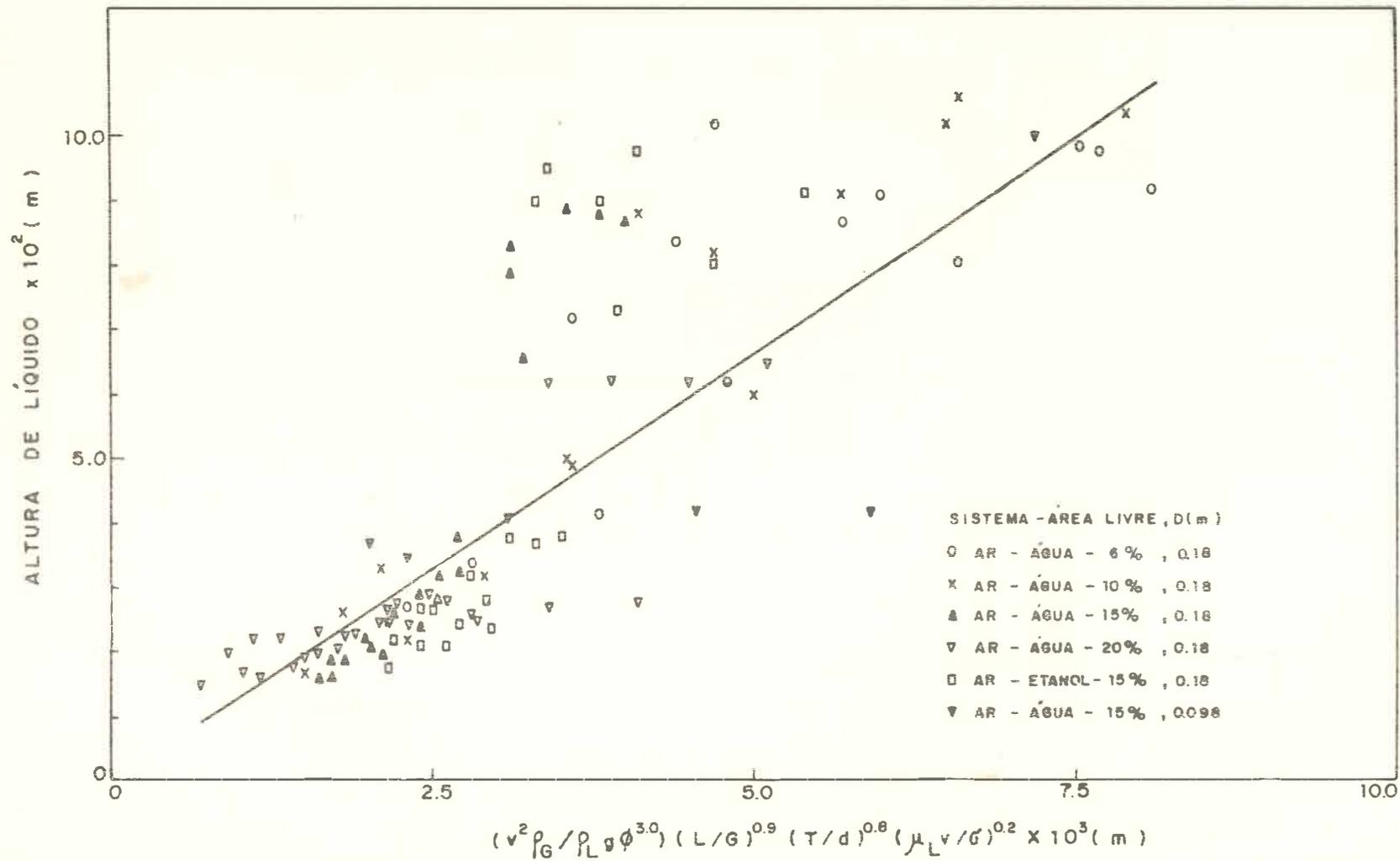


FIGURA 5.1

### 5.2.2 - POROSIDADE DA DISPERSÃO GÁS-LÍQUIDO

No presente trabalho, verificamos que a porosidade da dispersão gás líquido, depende da velocidade de gás e da área livre do prato perfurado utilizado.

Considerando a influência destas variáveis sobre a porosidade de mistura, propomos que esta seja calculada através da seguinte equação:

$$\varepsilon = 0.72 \left( \frac{v^2}{gh} \right)^{0.05} \phi^{0.03} \quad (5.6)$$

A figura 5.2 mostra a curva da equação (5.6) para todos os pontos experimentais (apêndice B, tabelas 2 a 7), obtida com um erro médio de 4%.

Desta maneira, a porosidade da mistura pode ser calculada, para uma dada velocidade de gás, área livre do prato e altura de líquido, podendo esta última ser calculada através da equação, proposta neste trabalho.

### 5.2.3 - ALTURA DA ESPUMA

Como foi estabelecido em capítulos anteriores, a porosidade da dispersão representa a relação entre a altura de líquido e a altura da espuma.

$$\varepsilon = 1 - \frac{h}{H} \quad (5.7)$$

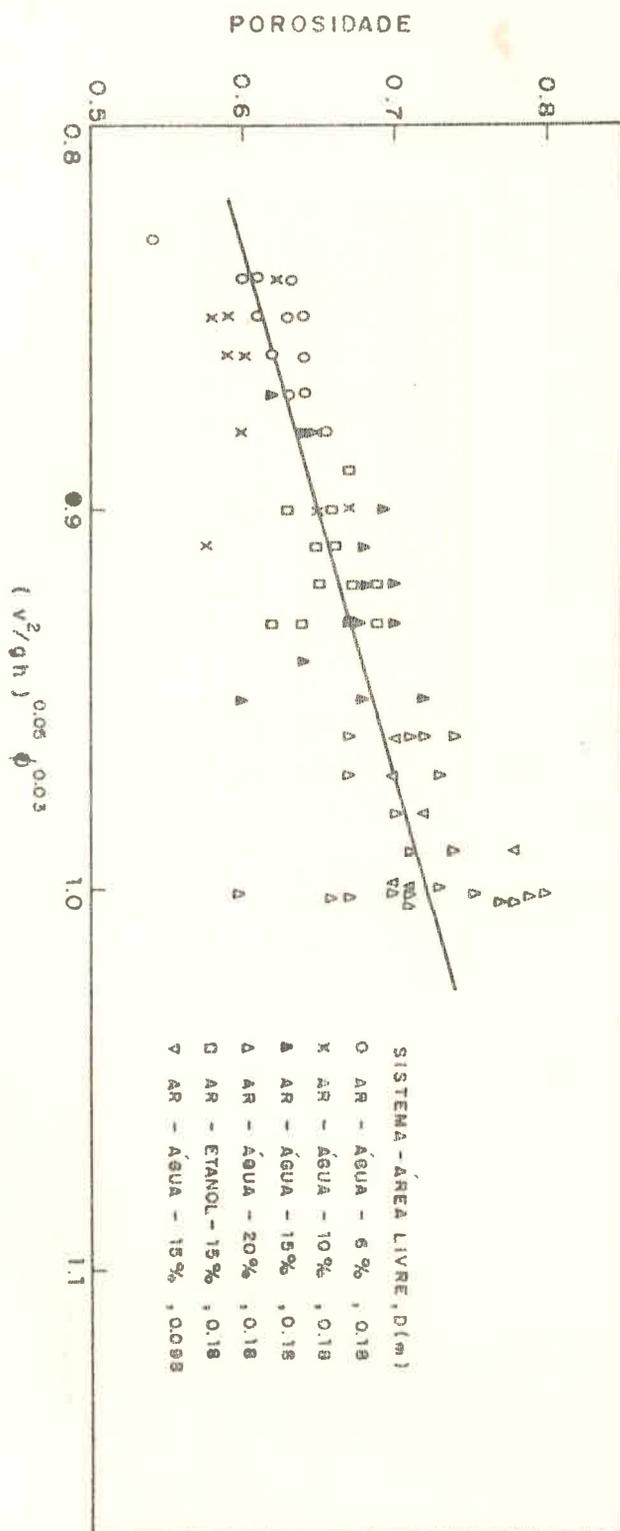


FIGURA 5.2

Deste modo, considerando as equações para o cálculo da porosidade da dispersão e da altura de líquido, propomos que a altura da espuma seja calculada através da seguinte equação:

$$H = \left[ 1 - 0.72 \left( \frac{v^2}{gh} \right)^{0.05} \phi^{0.03} \right]^{-1} \cdot h \quad (5.8)$$

onde a altura de líquido pode ser calculada através da equação (5.5a).

#### 5.2.4 - VELOCIDADE LIMITE DE OPERAÇÃO ESTÁVEL DO REGIME "FROTH"

Alguns autores (5) têm tentado correlacionar a velocidade ótima de gás, para a operação de um prato sem vertedor. Estes mesmos autores, definem esta velocidade ótima, como a velocidade superficial de gás correspondente ao início da fase "oscilação".

Em artigo citado em (6), Foldos sugere que a velocidade ótima de gás seja calculada em função dos seguintes grupos adimensionais:

$$v_{\text{ótima}} = f \left( \frac{L}{G}, \left( \frac{\rho_{\text{ar}}}{\rho_{\text{G}}} \right)^{0.5}, \phi \right)$$

Em 1978, Mahendru e Hackl (5) correlacionaram a velocidade ótima de gás, segundo a equação:

$$v_{\text{ótima}} = 0.129 \phi \sqrt{gD} \left[ \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \left( \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \left( \frac{D}{b} \right) \right) \right]^{-0.185} \quad (5.9)$$

onde  $b = \sqrt{2\sigma / (g \cdot \rho_L)}$  (5.10)

No presente trabalho, foi observado um movimento oscilatório, no qual a dispersão executava um movimento de lado a lado na coluna simultaneamente com um movimento rotacional. Este tipo de oscilação foi predominante na fase Froth e ainda não havia sido descrito.

Com base nos parâmetros que possam caracterizar a velocidade de gás na qual tal movimento oscilatório tem início, a seguinte equação é proposta para o cálculo desta velocidade:

$$v_L = 1.2 \sqrt{gD} \left[ \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right]^{-0.31} \phi^{0.85} \quad (5.11)$$

A figura 5.3 mostra o gráfico da equação (5.11).

Os pontos experimentais utilizados para correlacionar esta equação, são os pontos correspondentes ao início do movimento "rotacional", como descrito no capítulo 4, item 4.3. Os pontos experimentais utilizados na construção da figura 5.3 são dados na tabela 5.1.

Area livre (%)	6	10	15	15	20
Diametro do prato (m)	0.18	0.18	0.18	0.098	0.18
Vel. limite (m/s)	0.62	0.30	0.50	0.94	1.10
$\sqrt{gD} \left[ \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right]^{0.31} \phi^{0.85} \text{ (m/s)}$	0.51	0.30	0.37	0.62	1.14

TABELA 5.1

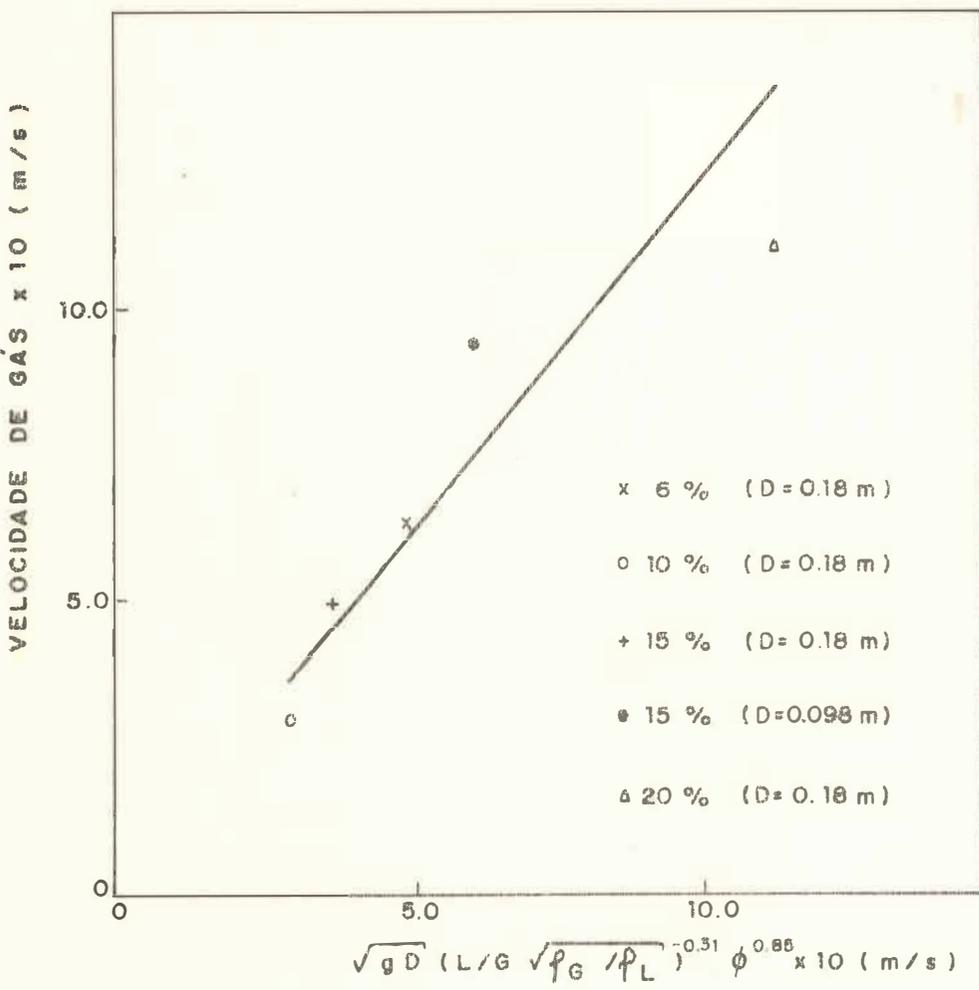


FIGURA 5.3

### 5.2.5 - CONCLUSÃO

No presente capítulo, foram propostas equações para o cálculo das alturas de líquido e da espuma, da porosidade da dispersão gás - líquido e para a máxima velocidade de gás em que a dispersão é estável.

As equações propostas foram obtidas a partir da teoria da análise dimensional e nos dá uma estimativa dos parâmetros acima mencionados, para o caso de pratos perfurados que não utilizam vertedor.

## CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

No presente trabalho, foram estudados os regimes de fluxo das dispersões gás líquido formadas em pratos perfurados sem vertedor, com áreas livres de 6 a 20% , sendo testados os sistemas ar - água e ar - soluções de etanol. Foram utilizadas colunas de 0.18 e 0.098 m de diâmetro. Durante o trabalho experimental, verificou-se a presença de movimentos oscilatórios por parte da dispersão gás - líquido. De um modo geral, a presença de oscilações aumentou significativamente a instabilidade da operação do prato, causando intensas vibrações na coluna. Os parâmetros que caracterizam a dispersão gás líquido, tais como a altura de líquido, da espuma e queda de pressão total, foram medidas experimentalmente, sendo calculada então, a porosidade da dispersão.

Dos resultados apresentados, podemos concluir que a dispersão gás - líquido que se forma nos pratos perfurados sem vertedor é de característica extremamente complexa, tornando difícil uma análise exata dos parâmetros que a caracterizam. A altura de líquido (clear liquid height) é de grande significado para a compreensão das características da dispersão formada. No presente trabalho, a altura de líquido foi correlacionada em termos das vazões de gás e líquido, de suas propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do prato , com base em análise dimensional. Verifica-se da equação obtida, uma elevada dispersão dos valores da altura de líquido, principalmente para os pratos perfurados com menores áreas livres. Os valores da altura de líquido para o prato com 20% de área livre, são menos dispersos ( $\pm 25\%$ ) em relação a curva obtida; neste prato a dispersão do tipo "Froth" está presente a valores das altura de líquido e espuma e da queda de pressão, inferiores aos obtidos para os pratos com menores áreas livres, mesmo a altas vazões de gás e líquido.

Desta maneira, obtém-se para pratos com maiores áreas livres, dispersão do tipo "Froth", na qual a taxa de transferência de massa é maior comparativamente maior em relação a outros tipos de dispersão, a baixas quedas de pressão total.

No entanto, para os pratos com maiores áreas livres, as altas vazões de gás, necessárias para reter o líquido no prato, leva a dispersão gás - líquido a oscilar e de forma acentuada, mesmo para as mais baixas vazões. Assim a região de estabilidade da dispersão é menor, em relação aos pratos com 15 e 10% de área livre.

Os resultados experimentais permitiram-nos desenvolver uma equação para o cálculo da porosidade média da mistura gás - líquido. Esta equação foi obtida com um erro médio de 3.5%, para todos os pratos testados, e mostra a pequena variação da porosidade da mistura em relação a velocidade de gás e área livre.

Dos resultados apresentados conclui-se que a geometria circular da coluna de pratos sem vertedor, induz a dispersão gás - líquido a movimentos oscilatórios, para uma maior faixa de vazões de gás e líquido, comparativamente aquela onde ocorrem oscilações semelhantes as que tem lugar nos pratos com vertedor. Para prever a velocidade de gás onde os movimentos oscilatórios das dispersões gás - líquido tem início, desenvolvemos uma equação em função das vazões de gás e líquido, de suas densidades e do diâmetro da coluna.

Levando-se em conta as conclusões deste trabalho apresenta-se como sugestões para futuros trabalhos os seguintes itens:

- Um estudo semelhante, utilizando-se colunas de maiores diâmetros e pratos de diferentes espessuras.

- Um estudo mais profundo dos movimentos oscilatórios da dispersão gás - líquido, em função das vazões de gás e líquido e dos parâmetros geométricos do prato.

- Um estudo mais profundo do efeito das propriedades físicas do gás e do líquido sobre a altura de líquido, da espuma e queda de pressão, utilizando-se um número maior de sistemas gás-líquido.

- Sugere-se um estudo semelhante utilizando-se uma coluna com maior número de estágios.

- Um estudo dos coeficientes de transferência de massa em conexão com o tipo de dispersão formada no prato.

- Um estudo do efeito da temperatura e das propriedades físicas dos fluídos, quando uma coluna com maior número de estágios, acoplada a um refulvedor e um condensador for utilizado (coluna de destilação).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS

- 1 - Biddulph, N.W. and Stephens D.J., "Oscillating Behavior on Distillation Trays", A.I.Ch.E.J., vol. 20, 60 , 1974.
- 2 - Biddulph, N.W. and Stephens D.J., "Oscillating Behavior on Distillation Trays - II", A.I.Ch.E.J., vol. 21,41 , 1975.
- 3 - Holland, C.D., "Multi-component Distillation", Prentice-Hall, INC. (1963).
- 4 - Kreis, H. and Raab, N., "Industrial Application of Sieve Trays with hole diameters from 1 a 25 mm with and without downcomers", Inst. Chem. Engrs Symp. Ser. nº 56, 3.2/63 , 1979.
- 5 - Mahendru, H.L. and Hackl, A., "Contribution to the Design of Sieve Trays without downcomers", Inst. Chem. Engrs Symp. Ser. nº 56, 3.2/35, 1979.
- 6 - Rylek, N. and Standart, G., "The Hydraulic of Sieve Trays", Int. Chem. Engng., vol. 4, 711, 1964.
- 7 - Sharma, N.N. and Gupta, R.K., "Mass Transfer Characteristics of Plate Columns without downcomer", Trans. Instn Chem. Engrs, vol. 45, T169, 1967.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS E NÃO CITADAS

- 1 - Davies, B.T. and Porter, K.E., "Some Observations on Sieve Tray Froths", Proceedings of the Symposium on Two Phase Flow, University of Exeter, Depart. of Chem. Engng, vol.2, F301, 1965.
- 2 - Hofhuis, P.A.M. and Zuiderweg, F.J., "Sieve Plates : Dispersion Density and Flow Regimes", Inst. Chem. Engrs Symp. Ser. nº 56, 2.2/1, 1979.
- 3 - Ower, E. and Pankhurst, R.C., "The Measurement of Air Flow", Pergamon Press.
- 4 - Payne, G.J. and Prince, R.G.H., "The Relationship between the Froth and Spray Regimes, and the orifice process occurring on perforated distillation plates" , Trans. Instn Chem. Engrs, vol. 55, 266, 1977.
- 5 - Perry, R.H. and Chilton, C.H., " Chemical Engineers' Handbook", 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill.
- 6 - Pinczewski, B.E. and Fell, C.J.D., "The Transition from Froth - to - Spray Regime on Commercially Loaded Sieve Trays" , Trans. Instn Chem. Engrs, vol. 50, 102, 1972.
- 7 - Prince, R.G.H., Jones, A.P. and R.J. Panic, "The Froth Spray Transition", Inst. Chem. Engrs Symp. Ser. nº 56 , 2.2/27, 1979.
- 8 - Selix, M., "Pressure drops on turbogrid trays", Int. Chem. Engng, vol.2, nº 3, 394, 1962.

- 9 - Valentin, F.H.H., "Absorption in gas-liquid dispersions: some aspects of bubble technology", E. & F.N. SPON LTD-London, 1967.
- 10 - Zuiderweg, F.J. and Harmes, A., "The influence of surface phenomena on the performance of distillation columns", Chem. Engng Sc., vol.9, n<sup>o</sup>s 2/3, 89, 1958.
- 11 - Zuiderweg, F.J., "Sieve Trays": a view on the state of the art", Chem. Engng Sc. , vol. 37 , n<sup>o</sup> 10 , 1441 , 1982.

APENDICE A

CÁLCULOS DA CALIBRAÇÃO

DA PLACA DE ORIFÍCIO

APÊNDICE A

Cálculos de calibração da placa de orifício de entrada A.1 - Instalação da placa de orifício de entrada.

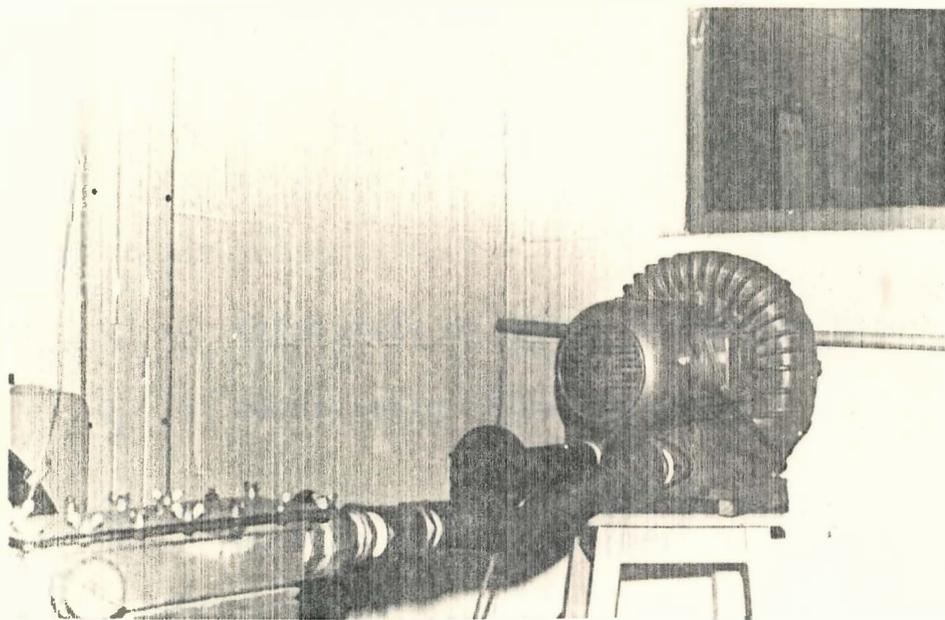


FIGURA A.1 - INSTALAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO DE ENTRADA

O medidor de vazão consistiu de uma placa de orifício de 15.7 mm de diâmetro fixada em um tubo de 54 mm de diâmetro. A placa de orifício foi instalada a 0.3 m de distância do soprador.

### A.2.1 - TUBO DE PITOT

Utilizou-se um tubo de Pitot para medir a velocidade de pontual do ar no interior do tubo.

A velocidade medida pelo tubo de Pitot, pode ser calculada por:

$$v_r = C_1 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ar}}} \quad (A.1)$$

onde:  $v_r$  = velocidade na ponta do tubo de Pitot (m/s)

$C_1$  = coeficiente adimensional

$\Delta P$  = diferença entre a pressão de impacto e a pressão estática (N/m<sup>2</sup>)

$\rho_{ar}$  = massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>)

A diferença entre a pressão de impacto e a pressão estática é dada pela seguinte equação:

$$\Delta P = \rho_{H_2O} g \Delta h \quad (A.2)$$

onde:  $\rho_{H_2O}$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$\Delta h$  = diferença de pressão do fluido (mH<sub>2</sub>O)

A massa específica do ar foi calculada através da seguinte equação:

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{0.46 P}{273 + t} \quad (\text{A.3})$$

onde: P = pressão no local da medida (mmHg)

t = temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )

Para  $t = 25^{\circ}\text{C}$  e  $P = 710$  mmHg ,  $\rho_{\text{ar}} = 1.11$  kg/m<sup>3</sup> sabendo que para o caso de Pitot ideal  $C_1 = 1.0$ .

A equação (A.1) reduz para:

$$v_r = 13.3 \sqrt{\Delta h} \quad (\text{A.4})$$

onde:  $\Delta h$  é dada em cmH<sub>2</sub>O.

Da equação (A.4) foram traçadas as curvas  $v_r \times r$ , onde r é a distância a partir da parede do tubo.

### A.2.2 - PLACA DE ORIFÍCIO DE ENTRADA

A equação da taxa de fluxo para a placa de orifício é:

$$Q = 3.44 \epsilon_1 \alpha a_2 \sqrt{\frac{1}{(1-q^2)} \Delta h \frac{710}{(273 + t)}} \quad (A.5)$$

onde:  $Q$  = vazão mássica (kg/h)

$\epsilon_1$  = fator de compressibilidade

$\alpha$  = coeficiente de descarga

$a_2$  = área do orifício (cm<sup>2</sup>)

$q$  = diâmetro do orifício/diâmetro do tubo

Para instalação utilizada no presente trabalho,  $\alpha = 0.625$ .

Da equação (A.5), a vazão de ar foi calculada, para a placa de orifício de 15.7 mm de diâmetro, sendo que todo o procedimento foi realizado também para a placa com 27.5 mm de diâmetro.

## APENDICE B

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

TABELA B.1 - QUEDA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO PRATO SECO (D = 0.18 m)

Área Livre %	G (kg/h)	$v_0$ (m/s)	$\Delta P_d$ (KPa)
6	28.4	4.4	0.023
	40.0	6.1	0.043
	48.6	7.6	0.067
	63.4	9.8	0.109
10.0	28.4	2.7	0.011
	34.6	3.2	0.015
	40.0	3.7	0.020
	44.6	4.2	0.025
15.0	34.6	2.2	0.008
	40.0	2.6	0.011
	44.6	2.9	0.014
	48.6	3.1	0.016
	63.4	4.1	0.027
20	63.4	3.1	0.018
	79.9	4.0	0.029
	90.7	4.5	0.036
	110.9	5.5	0.053
	128.2	6.4	0.072

TABELA B.2 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 6%)

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
28.4	22.2	2.7	7.5	0.64	0.30
	27.6	3.4	9.5	0.64	0.38
	39.1	4.2	11.5	0.63	0.46
	50.7	6.2	13.5	0.54	0.68
40.0	22.2	7.2	18.5	0.61	0.80
	27.6	8.4	22.5	0.63	0.95
	39.1	9.1	23.5	0.61	0.99
	50.7	9.9	24.5	0.60	1.07
48.6	22.2	8.2	23.0	0.64	0.93
	27.6	8.7	23.5	0.63	0.99
	39.1	9.8	25.5	0.62	1.10
	50.7	9.9	26.5	0.63	1.12
63.4	22.2	8.1	23.5	0.65	0.97
	27.6	9.2	25.0	0.63	1.08
	39.1	9.6	26.5	0.64	1.12
	50.7	9.9	27.5	0.64	1.16

TABELA B.3 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 10%)

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
28.4	135.0	2.2	5.5	0.60	0.21
	231.1	4.9	12.0	0.59	0.49
	330.1	6.0	16.0	0.62	0.59
34.6	63.0	1.7	4.0	0.57	0.16
	135.0	3.2	8.0	0.60	0.32
	231.1	8.2	20.0	0.59	0.89
	330.1	10.2	25.5	0.60	1.10
40.0	63.0	2.6	7.5	0.65	0.28
	135.0	5.0	14.5	0.65	0.53
	231.1	9.1	22.0	0.59	0.96
	330.1	10.4	25.0	0.58	1.09
44.6	63.0	3.3	10.0	0.67	0.36
	135.0	8.8	22.0	0.60	0.89
	231.1	10.6	26.0	0.59	1.07
	330.1	13.3	32.0	0.58	1.41

TABELA B.4 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 15%)

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
34.6	281.9	1.9	6.0	0.68	0.19
	330.1	2.2	7.0	0.69	0.23
	443.9	2.8	9.0	0.69	0.28
40.0	231.1	1.6	4.5	0.64	0.16
	281.9	2.0	6.0	0.67	0.20
	330.1	2.4	8.0	0.70	0.24
	443.9	7.9	21.0	0.62	0.77
44.6	180.0	1.6	4.0	0.60	0.17
	231.1	2.1	7.0	0.70	0.20
	281.9	2.9	9.0	0.68	0.24
	330.1	3.2	10.0	0.68	0.28
	443.9	8.9	24.0	0.63	0.94
48.6	180.0	1.9	6.0	0.68	0.18
	231.1	2.6	8.0	0.67	0.27
	281.9	3.8	12.0	0.68	0.40
	330.1	8.3	23.0	0.64	0.85
	443.9	8.7	24.0	0.64	0.92
63.4	180.0	3.2	11.5	0.72	0.32
	231.1	6.6	22.0	0.70	0.69
	281.9	8.8	25.5	0.65	0.92

TABELA B.5 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 20%)

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
63.4	281.9	2.0	6.0	0.67	0.17
	384.1	2.5	9.0	0.72	0.25
	443.9	2.9	10.0	0.71	0.30
79.9	135.0	1.6	4.0	0.60	0.14
	180.0	1.9	7.0	0.73	0.18
	231.1	2.3	8.0	0.71	0.21
	281.9	2.7	9.0	0.70	0.25
90.7	63.0	1.5	4.0	0.62	0.15
	96.1	1.7	5.0	0.66	0.17
	135.0	1.8	5.5	0.67	0.18
	180.0	2.0	6.9	0.71	0.20
	231.1	2.6	9.0	0.71	0.29
	281.9	2.8	11.0	0.74	0.31
	384.1	6.2	19.0	0.67	0.68
	443.9	6.2	24.0	0.74	0.69

TABELA B.5 - CONTINUAÇÃO

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
110.9	63.0	2.0	7.0	0.71	0.22
	96.1	2.2	7.5	0.71	0.24
	135.0	2.3	8.0	0.71	0.25
	180.0	2.4	9.0	0.73	0.26
	231.1	2.5	10.0	0.75	0.30
	281.9	2.7	11.0	0.75	0.30
	384.1	6.2	23.0	0.73	0.70
	443.9	6.5	24.0	0.73	0.75
128.2	63.0	2.2	9.0	0.76	0.30
	96.1	2.3	10.0	0.77	0.31
	135.0	2.5	11.0	0.77	0.33
	180.0	2.6	12.0	0.78	0.34
	231.1	2.7	13.0	0.79	0.35
	281.9	2.8	14.0	0.80	0.36

TABELA B.6 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.098 m - ÁREA LIVRE 15%)

SISTEMA - AR - ÁGUA

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
28.4	22.2	3.7	13.0	0.71	0.49
	39.1	4.1	16.0	0.74	0.53
	56.3	4.2	17.0	0.75	0.56
34.6	22.2	3.5	14.0	0.75	0.51
	39.1	4.2	17.0	0.75	0.54
	56.3	4.3	19.0	0.78	0.59
40.0	22.2	4.1	15.0	0.73	0.61
	39.1	4.2	18.0	0.77	0.64
	56.3	10.0	35.0	0.71	1.21

TABELA B.7 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 15%)  
SISTEMA - AR-1% ETANOL

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
40.0	231.1	1.9	5.0	0.62	0.15
	281.9	2.2	7.0	0.66	0.20
	330.1	2.7	8.0	0.69	0.23
48.6	231.1	2.8	8.5	0.67	0.27
	281.9	3.2	10.0	0.68	0.32
	330.1	9.0	25.0	0.64	0.94
63.4	231.1	9.5	28.0	0.66	0.99
	281.9	9.8	29.0	0.65	1.01
	330.1	10.2	30.0	0.66	1.03

TABELA B.7 - CONTINUAÇÃO

SISTEMA - AR-3% ETANOL

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
40.0	231.1	2.0	6.0	0.67	0.15
	281.9	2.1	7.0	0.70	0.20
	330.1	2.4	8.0	0.70	0.22
48.6	231.1	2.4	7.0	0.66	0.25
	281.9	3.6	10.0	0.64	0.36
	330.1	3.8	12.0	0.68	0.37
63.4	231.1	3.0	9.0	0.67	0.34
	281.9	7.4	20.0	0.63	0.79
	330.1	9.2	24.0	0.62	0.97

TABELA B.7 - CONTINUAÇÃO  
SISTEMA - AR-5% ETANOL

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
40.0	231.1	1.8	5.0	0.64	0.16
	281.9	2.1	6.5	0.68	0.19
	330.1	2.4	7.5	0.68	0.22
48.6	231.1	2.8	8.0	0.65	0.24
	281.9	3.4	11.0	0.69	0.35
	330.1	9.0	25.0	0.64	0.96
63.4	231.1	7.3	21.0	0.65	0.79
	281.9	7.6	23.0	0.65	0.85
	330.1	9.2	25.0	0.63	0.94

TABELA B.7 - CONTINUAÇÃO  
 SISTEMA - AR-15% ETANOL

G (kg/h)	L (kg/h)	$h \times 10^2$ (m)	$H \times 10^2$ (m)	$\epsilon$	$\Delta P$ (KPa)
40.0	231.1	1.9	5.0	0.62	0.15
	281.9	2.2	7.0	0.69	0.20
	330.1	2.4	8.0	0.70	0.26
48.6	231.1	3.5	10.0	0.65	0.36
	281.9	4.1	12.0	0.66	0.42
	330.1	10.5	30.0	0.65	1.06
63.4	231.1	10.5	29.0	0.64	1.05
	281.9	10.8	30.0	0.64	1.08
	330.1	10.5	31.0	0.66	1.05

TABELA B.8 - ALTURAS DE LÍQUIDO, DA ESPUMA, POROSIDADE DA DISPERSÃO E QUEDA DE PRESSÃO (D = 0.18 m - ÁREA LIVRE 15% , d = 3.5x10<sup>-3</sup>m)  
SISTEMA - AR - ÁGUA

G (kg/h)	L (kg/h)	h x 10 <sup>2</sup> (m)	H x 10 <sup>2</sup> (m)	ε	ΔP (KPa)
34.6	231.1	5.5	17.0	0.68	0.58
	281.9	6.0	19.0	0.68	0.64
40.0	231.1	5.5	18.0	0.69	0.60
	281.9	6.5	20.0	0.69	0.64
44.4	231.1	6.0	18.0	0.68	0.60
	281.9	6.5	21.0	0.69	0.66
48.6	231.1	6.0	19.0	0.68	0.63
	281.9	7.0	21.0	0.68	0.69

NOMENCLATURA

- $D$  = diâmetro da coluna (m)
- $d$  = diâmetro do orifício (m)
- $d_e$  = diâmetro equivalente do orifício (m)
- $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
- $G$  = vazão mássica de gás (kg/h)
- $h$  = altura de líquido (m)
- $H$  = altura da espuma (m)
- $L^*$  = vazão mássica de líquido por unidade de área ( $kg/m^2 \cdot h$ )
- $L$  = vazão mássica de líquido (kg/h)
- $P$  = espaçamento entre os orifícios (m)
- $T$  = espessura do prato (m)
- $v$  = velocidade superficial do gás (m/s)
- $v_o$  = velocidade do gás no orifício (m/s)
- $v_{ótima}$  = velocidade ótima de gás (m/s)
- $v_\ell$  = velocidade limite de operação estável do regime "Froth" (m/s)
- $\Delta P$  = queda de pressão total (KPa)

$\Delta P_d$  = queda de pressão através do prato seco (KPa)

$\Delta P_e$  = queda de pressão na espuma (KPa)

$\epsilon$  = porosidade da dispersão gás - líquido

$\phi$  = área livre do prato (= área dos orifícios/área total do prato)

$\mu_L$  = viscosidade do líquido (kg/m.s)

$\rho_G$  = massa específica do gás (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_L$  = massa específica do líquido (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  = tensão superficial do líquido (N/m)

$\rho_{ar}$  = massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_{H_2O}$  = viscosidade da água (Kg/m.s)