

ESTUDO TEÓRICO - EXPERIMENTAL DA FRAÇÃO
VOLUMÉTRICA DA FASE DISPERSA NUMA COLUNA DE
PRATOS PULSANTES

AUTOR: JOSÉ JAILTON MARQUES

ORIENTADOR: ELIAS BASILE TAMBOURGI

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUIMICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS QUIMICOS

ESTUDO TEÓRICO - EXPERIMENTAL DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA
DA FASE DISPERSA NUMA COLUNA DE PRATOS PULSANTES.

AUTOR: JOSÉ JAILTON [MARQUES n/348

ORIENTADOR: ELIAS BASILE [TAMBOURGI t

Tese submetida à Comissão de pós -
Graduação da Faculdade de Engenharia
Química como parte das exigências
necessárias à obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo - Brasil

Julho - 1994

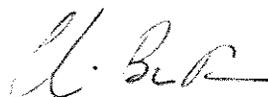
Esta versão corresponde à redação final da Tese de Mestrado,
defendida pelo Engg José Jailton Marques, e aprovada pela
Comissão Julgadora em 14 de julho de 1994.



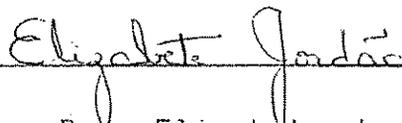
Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

(Orientador)

Tese defendida e aprovada, em 14 de julho de 1994, pela
banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi
(Orientador)



Profa. Dra. Elizabeth Jordão



Profa. Dra. Lúcia Helena Innocentini Mei

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Elias Basile Tambourgi que, de uma maneira bastante amigável, prestou uma eficiente orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Luiz Mário Nelson de Góis e Roberto Rodrigues de Souza pela ajuda e pelo intercâmbio de informações de grande importância para a realização deste trabalho.

Aos estudantes de iniciação científica da FEQ que nos assessoraram eficientemente na obtenção dos dados experimentais.

Aos professores do DESQ e, em especial ao Prof. Dr. Sérgio Pérsio Ravagnani e à Prof^a Dra. Teresa M. K. Ravagnani, pela grande colaboração.

Ao CNPq pelo suporte financeiro prestado.

Aos meus pais

e

Aos meus irmãos

RESUMO

A extração líquido-líquido em colunas agitadas vem ganhando destaque desde há algumas décadas, como uma forma alternativa para aumentar a eficiência do processo. Este aumento de eficiência está diretamente associado à taxa de transferência de massa nas operações e à redução na altura das unidades de transferência (HTU).

A transferência de massa entre fases é um fenômeno que depende fortemente da área interfacial. Dentro desse contexto, o presente trabalho trata do estudo da fração volumétrica da fase dispersa, que é um parâmetro diretamente ligado à área interfacial e, conseqüentemente, à fração de retenção da fase dispersa.

Maiores áreas interfaciais são obtidas em condições operacionais, onde a fração de retenção seja alta e o diâmetro médio das gotas seja pequeno, o que equivale a uma fina dispersão. Do exposto, verifica-se a grande importância do presente estudo, como uma contribuição para o projeto e operação de colunas de extração de discos perfurados pulsantes.

A estratégia adotada no mesmo consistiu na análise e interpretação do efeito das variáveis experimentais, sobre o comportamento da retenção da fase dispersa, no estudo da velocidade relativa e da velocidade característica, e na obtenção de correlações empíricas que permitam a predição deste parâmetro.

ÍNDICE GERAL

I - INTRODUÇÃO	01
I.1 - OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO	02
II- REVISÃO DA LITERATURA	04
II.1 - TIPOS DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXTRAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO	05
II.2 - CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS EXTRATORES PULSADOS	08
II.3 - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DOS EXTRATORES PULSADOS	12
II.3.1 - FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA FASE DISPERSA	13
II.3.2 - VELOCIDADE RELATIVA E VELOCIDADE CARACTERÍSTICA	20
III - DETALHAMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL	24
III.1 - DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM	24
III.2 - SISTEMA LÍQUIDO UTILIZADO	26
III.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MÉTODO DE CÁLCULO	27
IV - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	30
IV.1 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS ISOLADAS SOBRE A RETENÇÃO DA FASE DISPERSA	30
IV.1.1 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO	31
IV.1.2 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE PULSAÇÃO	35
IV.1.3 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DA FASE DISPERSA	42

IV.1.4 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DA FASE CONTÍNUA	46
IV.1.5 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE DISCOS	48
IV.1.6 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁREA LIVRE NOS DISCOS	51
IV.2 - ANÁLISE DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA A PARTIR DA VELOCIDADE RELATIVA	54
IV.3 - CONCLUSÕES	60
V - MODELAGEM MATEMÁTICA DA FRAÇÃO DE RETENÇÃO DA FASE DISPERSA VIA CORRELAÇÕES EMPÍRICAS	62
V.1 - ANÁLISE DIMENSIONAL	62
V.1.1 - DIMENSÕES PRIMÁRIAS	63
V.1.2 - TEOREMA Π DE BUCKINGHAM	64
V.1.3 - DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS	65
V.2 - APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL AO PROBLEMA FÍSICO	66
V.2.1 - VARIÁVEIS PERTINENTES	66
V.2.2 - MATRIZ DIMENSIONAL DAS VARIÁVEIS	67
V.2.3 - OBTENÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS E DA CORRELAÇÃO EMPÍRICA	68
V.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CORRELAÇÃO	70
V.4 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CORRELAÇÃO	73
V.5 - CONCLUSÕES	76
VI - CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES	77

APÊNDICE A - RESUMO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS JUNTAMENTE COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	81
APÊNDICE B - LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS	87
APÊNDICE C - DETALHES ENVOLVIDOS NA OBTENÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
NOMENCLATURA	103

A extração líquido-líquido, também denominada de extração por solvente, é uma das operações unitárias de maior uso industrial, ao lado da destilação, da evaporação, da filtração, dentre outras utilizadas na separação de componentes de uma mistura.

A própria operação de extração líquido-líquido encontra-se dividida em diversas modalidades, segundo o tipo de equipamento utilizado. Dentre esta gama de diferentes tipos, destacam-se os seguintes:

- Colunas de discos perfurados com fluxo pulsado;
- Colunas de discos perfurados pulsantes;
- Colunas de discos rotativos;
- Colunas recheadas agitadas ou não agitadas;
- Colunas de borrifamento ou do tipo "spray";
- Colunas de pratos perfurados não agitadas.

A literatura revela que as colunas de extração não agitadas estão se tornando obsoletas, a exemplo das colunas de borrifamento, face à pouca competitividade com os equipamentos agitados. O parâmetro de comparação é a taxa de transferência de massa, a qual é bem mais elevada em equipamentos agitados. Em decorrência deste fato, tem-se buscado desenvolver equipamentos que utilizam alguma forma de agitação mecânica, visando alcançar maiores eficiências no processo e, conseqüentemente, uma redução no tamanho das unidades, ou uma maior capacidade de processamento.

A literatura revela ainda que as colunas de discos perfurados com fluxo pulsado são mais largamente utilizadas do que as colunas de discos perfurados dotados de movimento alternativo. No entanto, os equipamentos do primeiro tipo apresentam limitações na capacidade de fluxo quando operam com altas vazões de alimentação.

Esta limitação é atribuída ao fenômeno de inundação. Além disso, a energia necessária para bombear a alimentação na coluna é excessivamente alta, quando as vazões a serem manipuladas também são altas. Neste caso, as colunas de discos pulsantes surgem como uma alternativa para reduzir o consumo de energia para agitar a massa líquida no interior da coluna.

I.1 - OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

O presente trabalho versa sobre o estudo da fração de retenção da fase dispersa numa coluna de discos alternativos, utilizando o sistema n-butanol-água. A forma adotada para a apresentação dos resultados consta basicamente de:

- Estratificação dos dados experimentais, lançando-os em gráficos, onde se possa observar o efeito de cada variável experimental sobre a retenção da fase dispersa;
- Estudo da velocidade relativa e da velocidade característica;
- Correlações empíricas para o cálculo da fração de retenção da fase dispersa.

No Capítulo II tem-se uma síntese das contribuições dadas por alguns autores que atuaram nesta área, abrangendo principalmente aspectos relacionados à hidrodinâmica dos equipamentos.

O Capítulo III trata da descrição da aparelhagem experimental e da metodologia empregada no levantamento de dados.

O estudo da retenção da fase dispersa consta do Capítulo IV, o qual apresenta uma análise da influência das variáveis experimentais isoladas, sobre o comportamento do parâmetro dependente, que é a fração volumétrica da fase dispersa. Ainda dentro deste contexto, o Capítulo IV aborda o estudo da velocidade relativa entre as fases e da velocidade característica, tendo em vista que o fenômeno da transferência de massa envolvido no processo

de extração é bastante influenciado pela velocidade com que as fases escoam ao longo do equipamento.

No Capítulo V os resultados experimentais foram tratados utilizando-se a técnica da análise dimensional, obtendo-se as correlações empíricas para o cálculo da retenção da fase dispersa, em função das variáveis experimentais, cujos valores são facilmente mensuráveis, o que confere uma elevada praticidade às equações propostas.

Finalizando este trabalho, são apresentadas as conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros, dentro desta linha de pesquisa. Estes tópicos constituem o Capítulo VI.

Após essa breve discussão, em linhas gerais, acerca dos objetivos deste trabalho, é importante ter-se em mente que o mesmo representa uma parcela de contribuição que deve ser somada aos resultados de outras pesquisas nesta área, para produzirem os recursos necessários ao projeto do processo. Além disso, até que um processo chegue à escala de produção industrial, o mesmo deve ser submetido a um estudo adicional relativo à expansão de escala ("scale-up").

A extração líquido-líquido é uma operação unitária que consiste na separação de componentes de uma mistura, por meio do contato com um segundo solvente imiscível, no qual estes devem ser preferencialmente solúveis. Os componentes distribuem-se entre as duas fases de acordo com as suas afinidades pelo solvente. Nota-se, portanto, que a extração é uma técnica de separação bastante seletiva. O grau de separação proporcionado por um único estágio raramente satisfaz às exigências práticas, de modo que a maioria dos processos industriais empregam contadores multiestágios em contracorrente.

As aplicações industriais da extração são diversas. Dentre as mais importantes está a separação de aromáticos de hidrocarbonetos alifáticos na indústria do petróleo e petroquímica. Outras aplicações bastante conhecidas estão no campo da química orgânica, incluindo a recuperação de antibióticos, desidratação de ácido acético, recuperação de materiais fenólicos de efluentes aquosos, purificação do ácido láctico, produção de vitamina C, entre outros. Na década de 70 surgiu o interesse na utilização da extração por solvente para a recuperação de metais. Além desses propósitos, esta técnica tem sido utilizada, também, na obtenção de urânio e na purificação de ácido fosfórico [Godfrey e Hanson apud Hetsroni(1982)].

II.1 - TIPOS DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXTRAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO.

Os vários tipos de equipamentos de contato podem ser divididos em duas categorias: contatores de estágios discretos e contatores diferenciais contínuos. A seleção do equipamento é governada por considerações da dificuldade de separação e da hidrodinâmica do equipamento. Este parâmetro, por sua vez, tem uma importante influência sobre a taxa de transferência de massa e governa a capacidade de fluxo do equipamento.

Os contatores do primeiro tipo são constituídos por uma série de estágios discretos, nos quais são realizadas sucessivas misturas e decantações. Durante a etapa de mistura é desejável que as fases residam no equipamento por um certo tempo, suficiente para que seja atingida uma boa aproximação do equilíbrio. Para um dado grau de separação desejado, faz-se o encadeamento de tantos estágios quantos forem necessários.

Os contatores diferenciais são geralmente construídos na forma de colunas que exercem o mesmo papel de uma cadeia de unidades de mistura e decantação isoladas. Esta modalidade de equipamentos pode ser classificada de acordo com a existência ou não de um mecanismo de agitação. Os contatores diferenciais contínuos são de simples construção, sendo os tipos mais conhecidos, resultantes de modificações feitas nas colunas de borrifamento ("spray"), onde a fase dispersa é introduzida através de um distribuidor, movendo-se ascendente ou descendente no seio da fase contínua, a depender da densidade das fases (Fig. 01a). As modificações vão desde a introdução de acessórios, tais como defletores de fluxo, peças de recheio e discos perfurados, ao fornecimento de energia à massa líquida contida na coluna, agitando-a. Como regra geral, a agitação

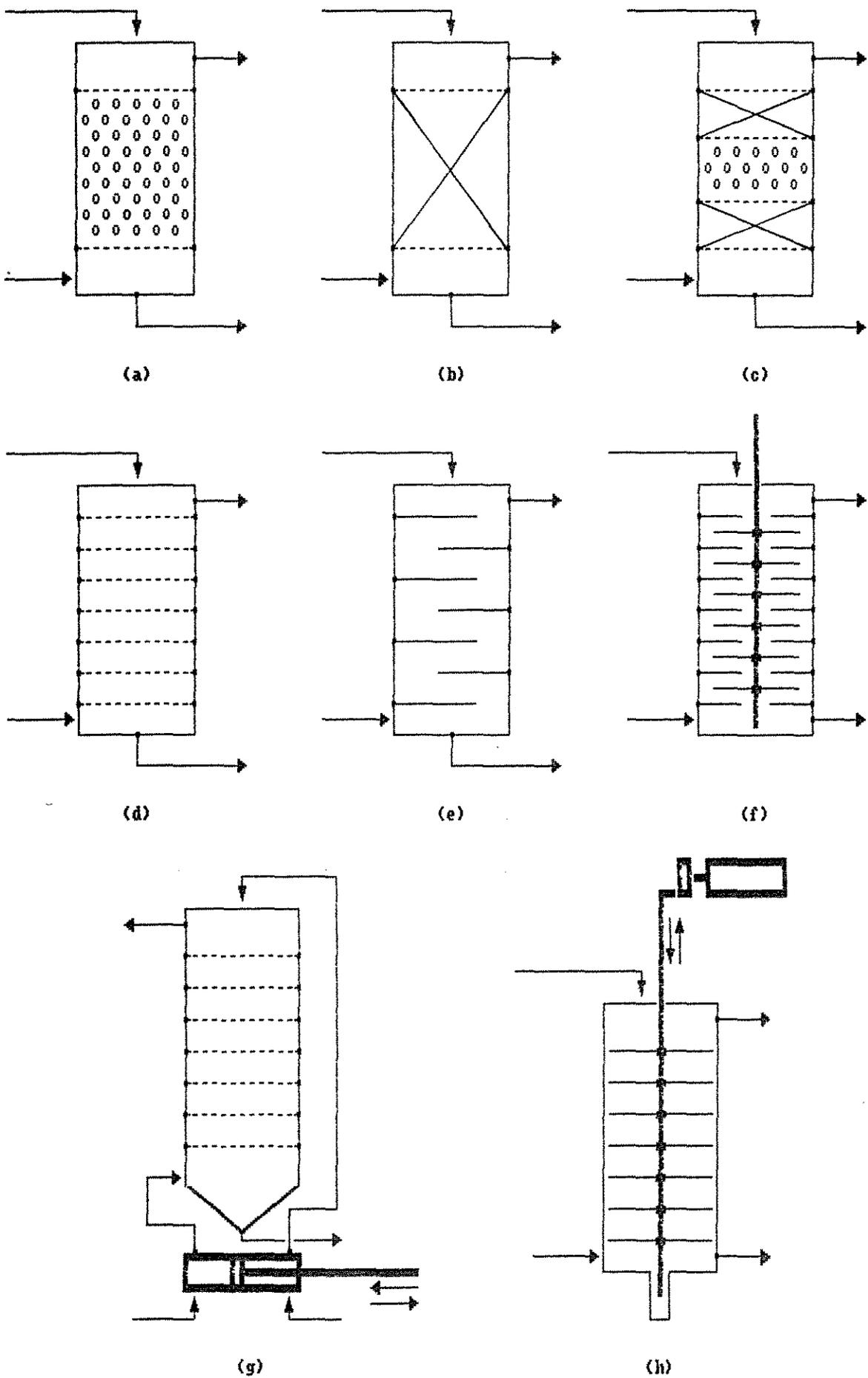


Figura 01 - Principais tipos de extratores diferenciais.

é utilizada para elevar a área interfacial, através da geração de gotas, e aumentar a efetividade da transferência de massa na operação.

A Figura 01 mostra, de forma simplificada, os principais tipos de contadores diferenciais de uso mais difundido.

O extrator Scheibel (Fig. 01c) é, provavelmente, o mais antigo dos extratores agitados e sua forma original possui seções de recheio (ou malhas metálicas) para reduzir a mistura axial. As colunas mais modernas utilizam defletores, em substituição às seções recheadas. As colunas das Figuras 01b, 01d e 01e exibem dispositivos internos que provocam a transformação da fase dispersa em gotas, através do impacto do líquido com os acessórios internos.

Fazendo parte da linha de extratores mecanicamente agitados tem-se o contador de discos rotativos (Fig. 01f), a coluna de fluxo pulsado (Fig. 01g) e a de discos pulsados (Fig. 01h). Na coluna de discos rotativos a dispersão é causada pelo cisalhamento estabelecido entre os discos e os anéis estatores fixos à parede da coluna ("stator rings"). Nas colunas de fluxo pulsado uma fase é dispersa na outra quando as mesmas são forçadas a atravessarem os discos perfurados, regularmente espaçados no interior da coluna, propulsionadas por um mecanismo de bombeamento, geralmente uma bomba alternativa ou um sistema de foles. Nas colunas de discos alternativos, o conjunto de discos fixos a um eixo descreve um movimento oscilatório, acionado por um motor, agitando a massa líquida no interior da coluna. Este último tipo de equipamento abordado constitui o real intuito deste trabalho e será discutido mais detalhadamente nos itens e capítulos subsequentes.

II.2 - CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS EXTRATORES PULSADOS

Os princípios gerais dos extratores pulsados originaram-se com van Dijck (1935) que concebeu as duas principais técnicas de agitação já descritas: a pulsação das correntes líquidas em colunas de pratos perfurados fixos e a pulsação dos discos acoplados a um eixo, agitando as fases líquidas dentro da coluna. No primeiro caso, as duas correntes líquidas são alimentadas continuamente em extremidades opostas da coluna e escoam em contracorrente, sendo removidas após o contato íntimo ao longo do equipamento. Se os furos dos discos são suficientemente pequenos, a fase dispersa não escoam através dos mesmos. No entanto, quando bombeiam-se as correntes de alimentação, as fases são forçadas a atravessarem as perfurações dos discos. A forma de pulsação mais comum é a do tipo senoidal, cuja ação dispersa a fase leve em gotas.

A operação dos extratores de discos alternativos guarda uma certa relação com a dos extratores de fluxo pulsado descrita no parágrafo anterior, no que diz respeito à agitação da massa líquida. De modo análogo ao anterior, as correntes de alimentação aduzem à coluna em extremidades opostas, escoando em contracorrente. Ao escoarem através do equipamento, as fases são misturadas pelo movimento alternativo dos discos, proporcionando uma dispersão uniforme e padrões de mistura similares aos das colunas de fluxo pulsado.

O uso das colunas de pratos alternativos tem aumentado significativamente nas últimas décadas, principalmente nas indústrias farmacêuticas, petroquímica, química, hidrometalúrgica e de tratamento de águas residuárias. Além dessas aplicações, pode-se citar também o processamento de misturas com tendências emulsificantes, por exemplo, mosto fermentado e de suspensões sólido-líquido. As colunas deste tipo são extensivamente empregadas

em laboratórios, plantas-piloto e em escala industrial.

Sege e Woodfield (1954) descreveram muito bem as características operacionais das colunas de fluxo pulsado, as quais têm sido citadas por vários outros autores, tanto nos estudos envolvendo colunas de fluxo pulsado quanto naqueles que utilizam colunas de pratos alternativos [Kumar e Hartland(1983c); Rama Rao et al (1983e); Sehmel e Babb (1963); Chen e Liu (1991a)].

Segundo Sege e Woodfield (1954) existem três tipos estáveis de regiões de operação e dois mecanismos de inundação, que dependem da amplitude e da frequência de pulsação, das vazões de alimentação, além das propriedades físicas do sistema líquido e das características geométricas do equipamento. Eles correlacionaram o comportamento da fase dispersa em função das vazões e das condições de pulsação, conforme é mostrado na Figura 02.

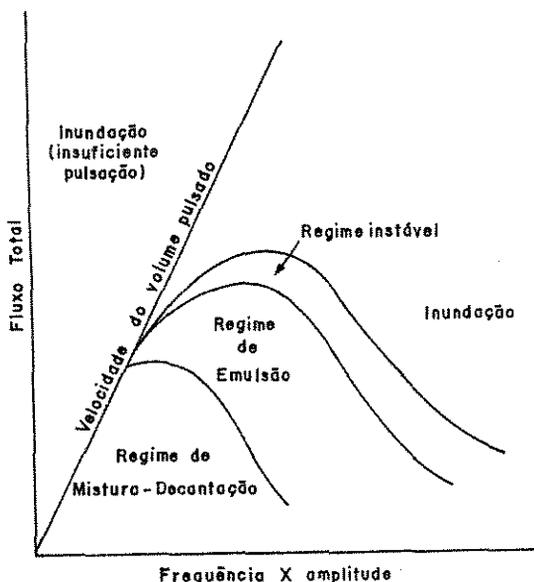


Figura 02 - Regimes de Operação segundo Sege e Woodfield (1954).

-Operação em regime de mistura-decantação ("mixer-settler"):

Este regime de operação é típico das situações que envolvem baixas vazões e baixas frequências de pulsação. É caracterizado pela separação das fases na região compreendida entre dois discos adjacentes, durante a etapa do pulso onde ocorre a inversão do sentido de pulsação. A Figura 03 mostra o comportamento das fases líquidas durante um ciclo de pulsação.

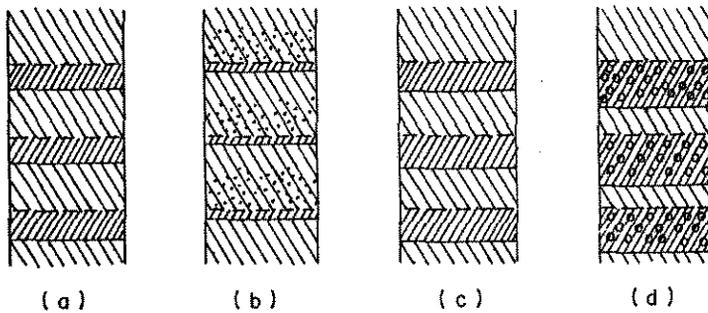


Figura 03 - Etapas de um ciclo de pulsação no regime de mistura-decantação.

O movimento do pulso provoca a dispersão das fases segundo um mecanismo alternativo. Assim, tomando-se por base a condição de quasi-reposo entre dois pulsos consecutivos (Fig. 03a e 03c), pode-se notar a dispersão da fase leve na fase pesada, à medida que o pulso movimentava-se ascendentemente (Fig. 03b). Com a inversão do sentido de pulsação, ocorre o mecanismo oposto, onde a fase pesada é dispersa na fase leve (Fig. 03d).

-Operação em regime de emulsão:

Este tipo de operação ocorre a altas taxas de fluxo e a altas frequências. Este regime é caracterizado pela presença de gotas de pequenos diâmetros e por uma dispersão aproximadamente uniforme, com pouca variação durante o ciclo de pulsação. A Figura 04 ilustra este regime de operação. A alta área interfacial, proporcionada pela grande população de gotas de pequenos diâmetros, faz deste tipo de operação a mais eficiente do ponto de vista da

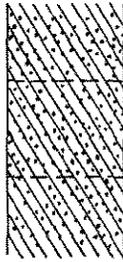


Figura 04 - Operação em regime de emulsão.

-Operação em regime instável:

Ocorre a taxas de fluxo e frequências ainda mais elevadas. O sistema líquido muda o seu comportamento e a massa líquida assume a forma de uma mistura constituída por pequenas gotas e porções maiores da fase leve, dispersa no seio da fase pesada. A Figura 05 representa este comportamento. Pode-se notar uma tendência à coalescência da fase dispersa, o que reflete na instabilidade do regime. Este fenômeno é denominado de inundação local. O mesmo é indesejável do ponto de vista operacional, pois, além de apresentar áreas interfaciais inferiores às do regime de emulsão, está no limiar da inundação total.



-  Fase leve contínua
-  Fase leve dispersa
-  Fase pesada contínua
-  Fase pesada dispersa

Figura 05 - Operação em regime instável.

Caso as vazões ou a frequência sejam aumentadas ainda mais, o efeito resultante será a inundação completa do equipamento.

Sege e Woodfield (1954) definiram este fenômeno como sendo a condição de fluxo onde as correntes são impossibilitadas de escoarem em contracorrente. As correntes de alimentação entram e saem da coluna numa mesma extremidade, de acordo com o esquema proposto na Figura 06.

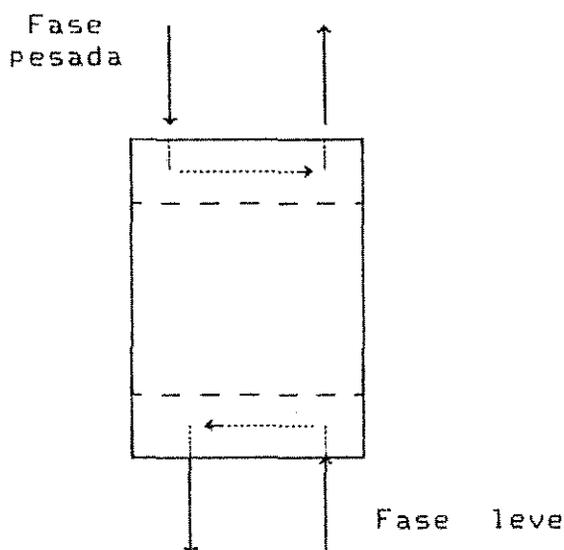


Figura 06 - Esquema representativo do regime de inundação total

II.3 - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DOS EXTRATORES PULSADOS

Uma caracterização completa dos extratores pulsados compreende o estudo da fração volumétrica da fase dispersa, do fenômeno de dispersão, da distribuição do tamanho de gotas, do fenômeno de inundação, da velocidade relativa e do consumo de energia na operação.

No presente trabalho serão abordados, apenas, os tópicos referentes à retenção da fase dispersa, ao fenômeno de inundação e à velocidade relativa de escoamento das fases.

II.3.1 - FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA FASE DISPERSA

Denomina-se por fração volumétrica global da fase dispersa a quantidade relativa desta fase dentro da coluna, expressa em termos volumétricos, segundo a relação:

$$\epsilon = \frac{\text{volume da fase dispersa}}{\text{volume total da coluna}}$$

Da forma como foi colocada, não são levadas em conta as variações deste parâmetro ao longo da coluna. Estudos mais rigorosos como os de Bell e Babb (1969); Ikeda e Kyose (1983b), que utilizaram extratores de fluxo pulsado, indicam variações da retenção da fase dispersa ao longo da coluna. No entanto, o procedimento que utiliza a retenção global tem sido descrito pela maioria dos autores, produzindo resultados altamente satisfatórios.

A retenção da fase dispersa em colunas agitadas depende das condições operacionais, das propriedades físicas do sistema líquido e da geometria do equipamento.

O processo em questão envolve um mecanismo de escoamento bifásico bastante complexo, de modo que o tratamento do problema por via analítica é uma tarefa árdua e requer bons conhecimentos matemáticos para lidar com o mesmo. Este aspecto justifica a adoção da técnica da análise dimensional, visando a descrição do problema em termos de correlações empíricas ou semi-empíricas. Existe na literatura um número razoável de correlações empíricas para a avaliação da fração volumétrica da fase dispersa, desenvolvidas para vários sistemas líquidos e sob diversas condições operacionais. Kumar e Hartland (1988a) apresentaram um resumo composto por uma série de correlações, suas faixas de aplicabilidade e regiões de operação. Estas correlações não devem ser extrapoladas além da sua faixa de aplicabilidade.

Griffith et al in Kumar e Hartland (1988a) foram, provavelmente, os primeiros a sugerirem uma correlação para a retenção da fase dispersa, válida para a região de mistura-decantação. Segundo esses autores, o volume de líquido da fase dispersa que adentra em cada seção da coluna é igual ao volume transportado pelo pulso, por unidade de tempo, resultando

$$\epsilon = \frac{V_d}{f \cdot h} \quad (1)$$

Dessa forma, a retenção não é afetada pela amplitude de pulsação, nem pelas propriedades físicas do sistema líquido.

Baseando-se na lei de Stokes para sedimentação, Crico in Kumar e Hartland (1988a) estimaram a retenção da fase dispersa equiparando a velocidade relativa das fases à velocidade de Stokes, substituindo a viscosidade da fase contínua pela da fase dispersa:

$$\epsilon = \frac{18 \cdot \mu_d \cdot V_d}{g \cdot d_g^2 \cdot |\rho_d - \rho_c| - 18 \cdot \mu_d \cdot V_c} \quad (2)$$

com todas as dimensões no S.I. Esta expressão só se aplica a uma faixa de baixos valores da retenção da fase dispersa e não considera nenhuma restrição ao movimento das gotas. Além disso, foi constatado que a faixa de diâmetros das gotas encontrada em colunas pulsadas é incompatível com a faixa de aplicação da lei de Stokes.

Miyauchi e Oya (1965) desenvolveram correlações baseadas em dados da retenção, com e sem transferência de massa, e chegaram às seguintes expressões:

$$\epsilon = 4,93 \cdot 10^2 \cdot \chi^{0,84} \cdot V_d^{2/3} \quad (3)$$

para $\chi < 0,0031 \text{ m}^{11/12} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\epsilon = 3,42 \cdot 10^6 \cdot \chi^{2,4} \cdot V_d^{2/3} \quad (4)$$

para $\chi > 0,0031 \text{ m}^{11/12} \cdot \text{s}^{-1}$

onde

$$\chi = \frac{A}{(\beta \cdot h)^{1/3}} \left[\frac{\mu_d^2}{\sigma \Delta \rho} \right]^{1/4} \quad (5)$$

sendo

$$\beta = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha) \cdot (1-\alpha^2)} \quad (6)$$

Esses autores atribuíram a não linearidade do parâmetro ϵ em relação a V_d à variação do tamanho das gotas ao longo da coluna, ou devido ao efeito da coalescência das gotas, com o aumento de V_d . Além disso, eles constataram que o efeito de V_c sobre ϵ era insignificante.

Miyanamy et al (1975) também estudaram a retenção da fase dispersa, utilizando uma coluna de pratos alternativos e três diferentes formas de pulsação, a saber: triangular, senoidal e trapezoidal. Eles deram um tratamento semi-empírico ao problema, levando em consideração a influência da turbulência na zona de esteira adjacente aos discos ("wake zone") e a tensão de cisalhamento devido às forças de empuxo. A correlação obtida foi a seguinte:

$$\text{Ln} \left[\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right] = 2,17 \left[1 - \exp(-0,8 \varphi) \right] \quad (7)$$

onde

ε_0 = fração de retenção na ausência de pulsação, com as demais condições operacionais idênticas àquelas usadas na determinação de ε .

$$\varepsilon_0 = k \cdot V_d \quad (8)$$

sendo k uma constante de proporcionalidade que depende da configuração geométrica da coluna e das propriedades físicas do sistema líquido.

$$\varphi = (\rho/\Delta\rho) \cdot We^{3/5} \cdot Fr \quad (9)$$

com os grupos adimensionais definidos da seguinte forma:

$$We = (\rho/\sigma) \cdot (n \cdot A \cdot f)^2 \cdot d_d \quad (10)$$

$$Fr = \frac{4 \cdot n \cdot (A \cdot f)^2}{g \cdot d_d} \quad (11)$$

sendo n um parâmetro que depende da forma de pulsação. Para o caso mais comum, com pulsação do tipo senoidal, $n = 2\pi$.

Esses autores constataram que o mecanismo de quebra das gotas pelos discos vibratórios é dominado pela velocidade instantânea máxima de vibração dos mesmos.

Baird e Lane (1973) chegaram à conclusão que a fração volumétrica da fase dispersa crescia com o aumento das vazões de ambas as fases e com a viscosidade da fase contínua, porém decrescia com o aumento da tensão interfacial, da diferença de densidade entre as fases e do diâmetro das perfurações nos discos. Esses autores adotaram o modelo da teoria da turbulência isotrópica e constataram que os seus resultados experimentais situavam-se entre dois limites: num dos extremos, as gotas da fase dispersa se comportavam como esferas rígidas (com escoamento governado pela equação de Ergun) e, no outro extremo, o comportamento se assemelhava ao de esferas

livremente circulantes.

A correlação por eles proposta foi a seguinte:

$$\frac{(1 - \epsilon)^3 \cdot g \cdot d_g \cdot \Delta\rho}{\rho_o \cdot V_o^2} = \frac{150 \epsilon}{Re} + 1,75 \quad (12)$$

onde:

V_o = velocidade relativa entre as fases. Este conceito será abordado com detalhes em itens subsequentes.

Re = número de Reynolds modificado, definido por:

$$Re = \frac{\rho_o \cdot V_o \cdot d_g}{\mu_o} \quad (13)$$

Baird e Lane (1973) deduziram a equação (12) a partir de um balanço de forças, utilizando a condição de que o peso líquido das gotas da fase dispersa era contrabalanceado pela força de arraste que atuava sobre as mesmas. Além dessa consideração, eles fizeram a suposição que as gotas se comportariam como esferas rígidas de tamanho uniforme. Seus resultados, quando comparados com o de outros autores, apresentaram a mesma tendência, porém com desvios relativamente altos. O maior inconveniente no uso da Eq. 12 ainda é a exigência do conhecimento prévio do diâmetro médio das gotas e da velocidade relativa, para que se possa avaliar a retenção da fase dispersa.

Rama Rao et al (1983e) constataram que o extrator de pratos alternativos por eles utilizado apresentou um comportamento similar ao dos extratores de fluxo pulsado. Eles detectaram a ocorrência dos regimes de mistura-decantação e de emulsão, de acordo com o que foi proposto por Sege e Woodfield (1954), acerca dos regimes de operação em colunas de fluxo pulsado.

As correlações resultantes desse estudo foram as seguintes:

-Regime de mistura-decantação ($Fr^{0,16} Re^{0,8} < 280$):

$$\epsilon = 0,335 We^{0,87} Re^{-0,145} (D/d)^{0,43} N^{0,4} \left[\frac{\sigma_c}{\sigma_v - \sigma_d} \right]^{-0,4} \quad (14)$$

-Regime de emulsão ($Fr^{0,16} Re^{0,8} > 280$):

$$\epsilon = 0,003 We^{0,87} Fr^{0,16} Re^{0,66} (D/d)^{0,85} N^{0,4} \left[\frac{\sigma_c}{\sigma_v - \sigma_d} \right]^{-0,15} \quad (15)$$

Os grupos adimensionais presentes nas correlações acima foram assim definidos:

$$Re = \frac{\Delta\rho (A.f) d}{\alpha \cdot \mu_c} \quad (16)$$

$$Fr = \frac{(A.f)^2}{g \cdot d} \quad (17)$$

$$We = \frac{\Delta\rho d V_d^2}{\sigma} \quad (18)$$

Das Eqs. 14 e 15 nota-se que a retenção da fase dispersa depende fortemente da vazão desta fase (implícita no número de Weber), bem como do número de discos e da velocidade de pulsação, (A.f), no entanto, mostrou-se pouco influenciada pela vazão da fase contínua e pela geometria dos discos, especialmente no regime de emulsão, que é o de maior interesse prático.

Mais recentemente, Kumar e Hartland (1983c) estudaram a fração de retenção numa coluna de fluxo pulsado, na ausência da transferência de massa. Eles constataram a ocorrência de três diferentes regimes de operação: mistura-decantação, dispersão e

emulsão, e estabeleceram correlações para cada um destes regimes. Como critério de transição entre os regimes de dispersão e de emulsão eles utilizaram um parâmetro de dissipação de energia por unidade de massa da mistura líquida, E, dado por.

$$E = \frac{(A \cdot f)^2}{\beta \cdot h} \frac{\rho_c}{\Delta \rho^{3/4} \cdot \sigma^{1/4} \cdot g^{5/4}} \quad (19)$$

Assim, para o regime de dispersão ($E < 0,05$):

$$\epsilon = 6,91 \left[\frac{(A \cdot f)^3 \cdot \rho_c^{1/4}}{\beta \cdot h \cdot \sigma^{1/4} \cdot g^{5/4}} \right]^{0,31} \times \left[\frac{V_d^4 \cdot \rho_c}{g \cdot \sigma} \right]^{0,30} \times \left[1 + \frac{V_c}{V_d} \right]^{0,14} \times \left[\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right]^{-0,75} \times \left[\frac{\mu_d \cdot g}{\rho_c \cdot \sigma^3} \right]^{-0,01} \quad (20)$$

e para o regime de emulsão ($E \geq 0,05$):

$$\epsilon = 3,73 \times 10^{-3} \left[\frac{(A \cdot f)^4 \cdot \rho_c}{g \cdot \sigma} \right]^{0,02} \times \left[\frac{V_d^4 \cdot \rho_c}{g \cdot \sigma} \right]^{0,31} \times \left[1 + \frac{V_c}{V_d} \right]^{0,45} \times \left[\frac{\mu_d^4 \cdot g}{\rho_c \cdot \sigma^3} \right]^{-0,29} \times \left[\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right]^{-2,20} \quad (21)$$

Adicionalmente, para o regime de mistura-decantação, foi proposta a seguinte correlação:

$$\epsilon = 3,91 \times 10^{-3} \left[\frac{A^2 \cdot \rho_c \cdot g}{\sigma} \right]^{-0,28} \times \left[\frac{f^4 \cdot \sigma}{\rho_c \cdot g^3} \right]^{-0,19} \times \left[1 + \frac{V_c}{V_d} \right]^{0,19} \times \left[\frac{\mu_d^4 \cdot g}{\rho_c \cdot \sigma^3} \right]^{-0,13} \times \left[\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right]^{-0,81} \times \left[\frac{V_d^4 \cdot \rho_c}{g \cdot \sigma} \right]^{0,28} \quad (22)$$

As correlações apresentadas por Kumar e Hartland (1983c) envolvem um grande número de variáveis experimentais e foram obtidas

a partir de resultados próprios e de um apanhado de resultados experimentais obtidos por outros autores, sendo, portanto, válidas para vários sistemas líquidos. Assim, suas faixas de aplicabilidade são mais amplas.

As correlações aqui apresentadas e discutidas foram selecionadas como sendo as mais importantes, procurando tanto dar ênfase aos trabalhos dos precursores, quanto citar aquelas correlações que servem como parâmetros de comparação em diversos trabalhos publicados. Muitas outras correlações estão disponíveis na literatura. Um resumo mais completo das principais correlações é apresentado por Kumar e Hartland (1988).

II.3.2 - VELOCIDADE RELATIVA E VELOCIDADE CARACTERÍSTICA

No item anterior foi abordado o aspecto hidrodinâmico referente à fração de retenção da fase dispersa. Os próximos parágrafos tratarão do estudo da velocidade relativa entre as fases, que é um outro parâmetro hidrodinâmico diretamente ligado à fração de retenção da fase dispersa. A literatura apresenta um razoável número de trabalhos, onde podem ser constatadas as relações entre a velocidade relativa entre as fases, a retenção e o fenômeno de inundação, a exemplo dos que foram propostos por Thornton (1957), Rama Rao et al (1983e), Baird e Shen (1984), Kumar e Hartland (1989) e Chen e Liu (1991a).

As correlações existentes na literatura para a avaliação da velocidade relativa de escoamento das fases são, de uma maneira geral, funções que envolvem as velocidades de escoamento de cada fase, a fração de retenção, além de outras grandezas experimentais e propriedades físicas do sistema líquido.

O conceito de velocidade relativa foi primeiramente abordado por Pratt et al apud Lo, Baird e Hanson (1983d). A

velocidade relativa ("slip velocity"), para um escoamento bifásico em contracorrente, é dada por:

$$V_s = \frac{V_d}{\varepsilon} + \frac{V_o}{(1 - \varepsilon)} \quad (23)$$

A velocidade relativa é um resultado da ação de forças externas e internas sobre as fases contínua e dispersa, sujeitas ao campo gravitacional [Heyberger et al (1983a)]. Este parâmetro é de grande importância no estudo da transferência de massa entre fases, pois o mesmo tem grande influência sobre o coeficiente de transferência de massa [Kumar e Hartland (1989)].

A velocidade característica, V_o , é derivada a partir da velocidade relativa, numa condição em que a fração volumétrica da fase dispersa tende a zero. Assim, pode-se interpretá-la como sendo a velocidade de sedimentação ou ascensão de gotas da fase dispersa, no seio da fase contínua, desconsiderando quaisquer efeitos de interações envolvendo as gotas como, por exemplo, a coalescência. De acordo com Heyberger et al (1983a), a relação existente entre a velocidade relativa e a velocidade característica é dada pela expressão:

$$V_s = V_o \cdot \phi(\varepsilon, \rho_d, \rho_c, \mu_d, \mu_c, d/D) \quad (24)$$

sendo ϕ uma expressão que obedece à seguinte restrição:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \phi = 1 \quad (25)$$

Uma série de relações já foram propostas para a função ϕ , dentre as quais pode-se citar:

i) Relação de Richardson e Zaki apud Heyberger et al (1983a):

$$\phi = (1 - \varepsilon)^a \quad (26)$$

onde "a" é uma constante que depende das condições operacionais.

ii) Relação de Mises apud Heyberger et al (1983a):

$$\phi = (1 - \varepsilon) \cdot \exp(b\varepsilon) \quad (27)$$

onde "b" deve ser ajustado a partir de dados experimentais.

iii) Relação de Ishii e Zuber apud Heyberger et al (1983a):

$$\phi = \frac{(1 - \varepsilon) \varphi_1(\mu_c, \mu_d)}{1 + c \cdot [(1 - \varepsilon) \varphi_2(\mu_c, \mu_d) - 1]} \quad (28)$$

onde

$$\varphi_1(\mu_c, \mu_d) = 1 + 2,5 \left[\frac{\mu_d + 0,4\mu_c}{\mu_d + \mu_c} \right] \quad (29)$$

$$\varphi_2(\mu_c, \mu_d) = \frac{6}{7} \left[\frac{1}{2} + 2,5 \left[\frac{\mu_d + 0,4\mu_c}{\mu_d + \mu_c} \right] \right] \quad (30)$$

$$c = \frac{\varphi(r^*)}{1 + \varphi(r^*)} \quad (31)$$

sendo

$$\varphi(r^*) = 0,55 \left[\left[1 + 0,08 \cdot r^{*3} \right] - 1 \right]^{3/4} \quad (32)$$

com

$$r^* = \frac{d}{2} \left[\rho_c \cdot g \cdot \frac{\mu_c^2}{\Delta\rho} \right]^{1/3} \quad (33)$$

iv) Relação proposta por Thornton (1957):

Este autor baseou-se na Eq. 26, obtendo um valor para "a" igual a unidade, resultando em

$$\phi = (1 - \varepsilon) \quad (34)$$

As relações de (i) a (iv) foram utilizadas em estudos experimentais com colunas de fluxo pulsado. Em seguida será apresentada uma relação válida para colunas de discos alternativos.

v) Relação proposta por Baird e Shen (1984):

$$\phi = \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{1/3}} \quad (35)$$

Por uma questão de compatibilidade, esta última relação será utilizada no presente estudo para avaliação da velocidade característica. Uma combinação das expressões (23), (24) e (35) fornece uma expressão mais adequada para o cálculo da velocidade característica:

$$\frac{V_d}{\varepsilon} + \frac{V_c}{1 - \varepsilon} = V_o \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^{1/3}} \quad (36)$$

Esta última equação será utilizada mais adiante, no capítulo referente à análise dos resultados, onde será descrito detalhadamente o procedimento para determinar V_o a partir dos resultados experimentais. Após a determinação de V_o , tomando-se por base a Eq. (36), será abordado um tópico relativo ao fenômeno de inundação, utilizando-se alguns recursos analíticos associados com condições fenomenológicas do problema.

III - DETALHAMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL

III.1 - DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM

A Figura 07 representa esquematicamente a aparelhagem utilizada no levantamento dos dados para subsidiar o estudo da fração volumétrica da fase dispersa na operação de contato entre as duas fases líquidas.

A coluna em si consiste de um tubo de aproximadamente 97 cm de comprimento e 5,5 cm de diâmetro interno, constituído por seções de vidro interconectadas através de acessórios de PVC (policloreto de vinila) rígido. As seções do topo e do fundo da coluna são dotadas de terminais reservados à alimentação e à retirada das correntes líquidas.

Dos 97 cm de comprimento da coluna, apenas uma seção de 70 cm é efetivamente agitada, pois compreende a região de ação dos discos pulsantes. O restante da coluna funciona como seções de separação, as quais localizam-se nas extremidades da mesma, cuja finalidade é permitir que as duas fases líquidas separem-se, após o contato íntimo dentro da coluna.

No interior da coluna instalou-se um arranjo de discos perfurados, construídos em PVC, fixos a uma haste cilíndrica do mesmo material. Este arranjo foi adaptado à coluna, com a extremidade superior conectada ao mecanismo de pulsação, cujo funcionamento será descrito posteriormente.

Os discos foram perfurados de modo a fornecerem percentuais de área livre de 20 e 38%, a depender do número e do diâmetro dos furos presentes em cada disco. Para 20% de área livre foram utilizados discos com 62 furos de 0,3 cm de diâmetro. Já para uma fração de área livre de 38%, foram utilizados discos com 12 furos de

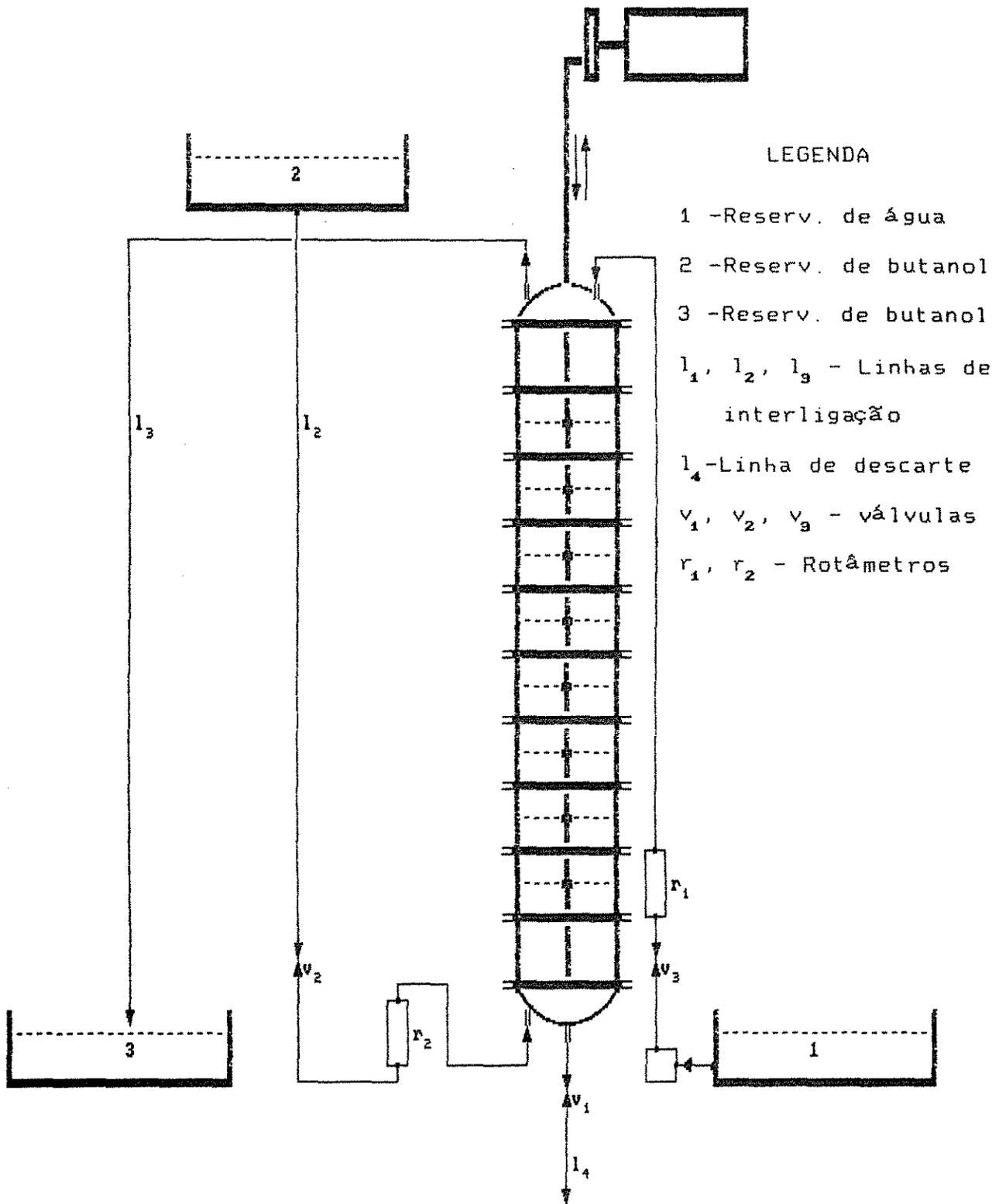


Figura 07 - Representação esquemática da aparelhagem experimental.

0,9 cm de diâmetro cada.

O mecanismo de pulsação consiste de um motor de velocidade variável, associado a um sistema de polias capaz de adequar a velocidade de rotação às condições de agitação exigidas.

Os tanques 1 e 2 destinam-se à armazenagem das fases contínua e dispersa, respectivamente. A linha l_1 conecta o tanque 1 ao topo da coluna, passando antes pela bomba elevatória b e pelo rotâmetro r_1 , utilizado como medidor de vazão da fase contínua. Através da linha l_2 , o tanque 2 conecta-se à base da coluna, passando antes pelo rotâmetro r_2 , que funcionou como medidor de vazão da fase dispersa. As linhas de saída presentes nas extremidades da coluna foram reservadas à retirada das fases, após o contato no interior da coluna. Dessa forma, a linha l_3 conduz a fase leve ao tanque 3, com fins de reaproveitamento, e a linha l_4 conduz a fase contínua a um dreno para fins de descarte.

III.2 - SISTEMA LÍQUIDO UTILIZADO

O presente estudo foi desenvolvido utilizando-se o sistema n-butanol - água, ocasionando, portanto, uma operação na ausência da transferência de massa, cuja restrição é comum à maioria dos estudos desenvolvidos nesta área.

Como o sistema é único, de antemão, as suas propriedades físicas serão consideradas constantes, as quais estão resumidas no Quadro 01. Estas propriedades, juntamente com as variáveis operacionais e geométricas serão empregadas na obtenção das correlações empíricas, assunto esse que será abordado em capítulos posteriores.

Componente	Massa Específica (g/cm ³)	Viscosidade (Poise)	Tensão Interfacial (dyn/cm)
Água	0,997	0,009	1,9
n-butanol	0,803	0,0261.	

Fonte: Reid, Prausnitz e Sherwood (1988b).

III.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E MÉTODO DE CÁLCULO

O equipamento utilizado nos estudos experimentais da fração de retenção e de operação relativamente simples, porém a marcha experimental é um tanto laboriosa. Todas as corridas experimentais foram realizadas obedecendo a uma programação previamente planejada, visando a variação sistemática dos parâmetros estudados, de modo a cobrir determinadas faixas de cada variável operacional. O quadro 02 apresenta um resumo das variáveis, juntamente com as situações estudadas.

Quadro 02 - Resumo das variáveis e suas faixas estudadas.

Variável Experimental	Situações Estudadas
Número de discos	4 ; 7
Área livre nos discos (%)	20 ; 38
Frequência de pulsação (s ⁻¹)	0,4 ; 0,7 ; 1,2 ; 1,9
Amplitude de pulsação (cm)	4 ; 6 ; 8
Vazão da fase contínua (cm ³ /s)	3,8 ; 10,0 ; 11,2
Vazão da fase dispersa (cm ³ /s)	7,3 ; 8,4 ; 10,8 ; 14,2

As combinações de variáveis estudadas totalizaram 260 pontos experimentais, os quais encontram-se registrados no Apêndice A deste trabalho.

Visando dar mais consistência aos resultados, adotou-se a mesma marcha experimental em todos os ensaios. O procedimento empregado será descrito na forma de passos, de modo a proporcionar

mais clareza e melhor orientar o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta área.

1) Com as válvulas de alimentação de butanol (v_2) e a de drenagem da fase aquosa (v_1) fechadas, alimenta-se a coluna com água (fase contínua) até enchê-la;

2) Aciona-se o mecanismo de agitação, ajustando-se a frequência e a amplitude de pulsação desejadas. A frequência pode ser ajustada através da contagem do número de ciclos de pulsação completos num intervalo de tempo prefixado. Já a amplitude é ajustada mediante o deslocamento de um engate conectado à polia, a uma certa distância do centro da mesma, interligando o eixo vertical da coluna ao sistema rotativo acionado pelo motor;

3) Na sequência, ajusta-se a vazão da fase contínua através da manipulação da válvula v_3 , seguindo a indicação do rotâmetro r_1 ,

4) Abre-se a válvula v_2 e alimenta-se a fase dispersa à coluna, ajustando-se sua vazão com o auxílio da válvula v_2 e do rotâmetro r_2 ;

5) Executados todos esses passos, espera-se até que a operação atinja o estado estacionário. O tempo necessário para tanto pode ser obtido a partir de um ensaio com acompanhamento do estado transiente, medindo-se a quantidade da fase dispersa que deixa a coluna numa dada unidade de tempo. Quando esta quantidade se aproximar o suficiente da vazão de alimentação desta fase, considera-se o estado estacionário, registrando-se o tempo dispendido;

6) Atingido o regime estacionário, interrompe-se a alimentação das duas fases, simultaneamente, pára-se o mecanismo de pulsação e deixa-se o conteúdo da coluna em repouso, até que ocorra a separação das fases.

O método de cálculo adotado para avaliação da fração volumétrica da fase dispersa foi o da medição das quantidades de água e butanol, através da drenagem do conteúdo da coluna, após a separação das fases, coletando-os em cilindros graduados. A partir dos volumes de ambas as fases, calcula-se facilmente a fração de retenção da fase dispersa, de acordo com a seguinte expressão:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Fração de retenção} \\ \text{da fase dispersa} \end{array} \right] = \frac{\text{Volume da fase dispersa retido}}{\text{Volume total das fases}}$$

Determinada a fração de retenção dá-se como encerrada a marcha experimental para realização de um ensaio. Os resultados deste parâmetro obtidos nos diversos ensaios, juntamente com as condições experimentais constituem a base deste estudo. Os capítulos subsequentes deste trabalho estão fundamentados nestes resultados, consistindo na análise e interpretação dos mesmos e na proposição de conclusões.

No capítulo anterior foram abordados a descrição da aparelhagem e o procedimento experimental empregado no levantamento de dados. No presente capítulo, estes dados serão tratados de modo a proporcionar uma boa descrição do processo. Os recursos algébricos e computacionais se constituíram ferramentas indispensáveis na análise e interpretação dos resultados experimentais.

IV.1 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS ISOLADAS SOBRE A RETENÇÃO DA FASE DISPERSA

O objetivo deste estudo é interpretar o comportamento do parâmetro dependente, aqui representado pela fração de retenção da fase dispersa, observando-se a influência das variáveis experimentais sobre o mesmo. O procedimento consiste numa análise gráfica, na qual a variável dependente é sempre a fração de retenção da fase dispersa, selecionando-se como variável independente a grandeza cuja influência deseja-se verificar. Em cada uma dessas análises as demais variáveis são mantidas constantes.

As situações a serem estudadas podem ser resumidas conforme mostrado a seguir:

- Estudo da influência da frequência de pulsação,
- Estudo da influência da amplitude de pulsação,
- Estudo da influência da vazão da fase dispersa,
- Estudo da influência da vazão da fase contínua,
- Estudo da influência do número de discos,
- Estudo da influência da fração de área livre nos discos.

Os itens subsequentes abordarão a análise sistemática da influência das variáveis experimentais, segundo as situações anteriormente descritas.

IV.1.1 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO

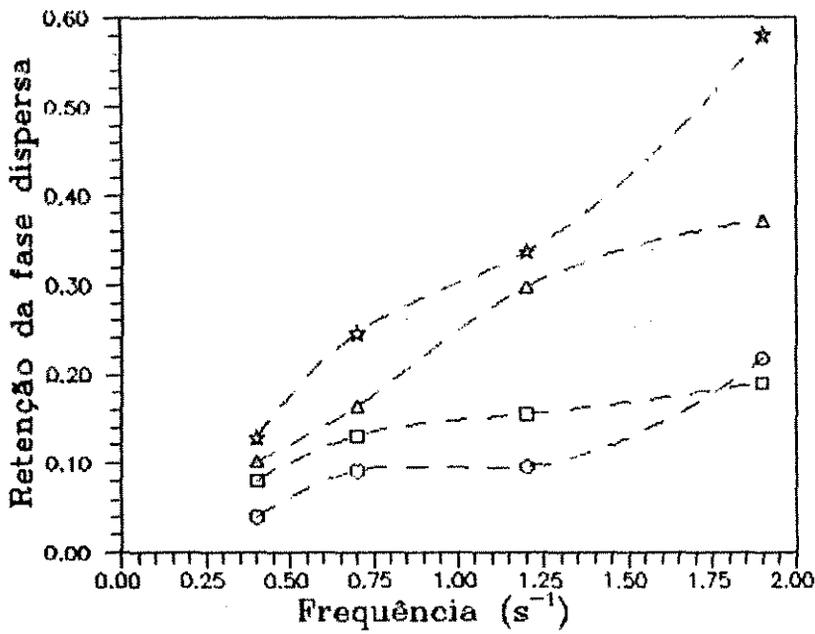
A fração volumétrica da fase dispersa está diretamente ligada à população de gotas no interior da coluna, numa dada situação operacional.

O fenômeno de geração de gotas é um tanto complexo e é fortemente dependente da condição de agitação imposta às fases no equipamento de contato. Isto enfatiza a importância da frequência de pulsação sobre a retenção da fase dispersa numa coluna de discos alternativos.

É importante fazer uma breve consideração a respeito do fenômeno da coalescência, o qual se opõe à geração de gotas. A coalescência consiste na recombinação de gotas originando gotas maiores, ou verdadeiras porções da fase dispersa. Este fenômeno está relacionado com a quantidade de gotas presente na mistura, pois, entre outros fatores, a frequência de colisão de gotas é um dos mais importantes. Por outro lado, se a agitação imposta às fases é pouco intensa, a coalescência poderá ocorrer em maior escala, desde que não haja o fornecimento de energia suficiente para promover a fragmentação do líquido em gotas.

O conjunto de resultados que será apresentado e discutido procura revelar as tendências mais marcantes observadas a partir do tratamento dos resultados experimentais.

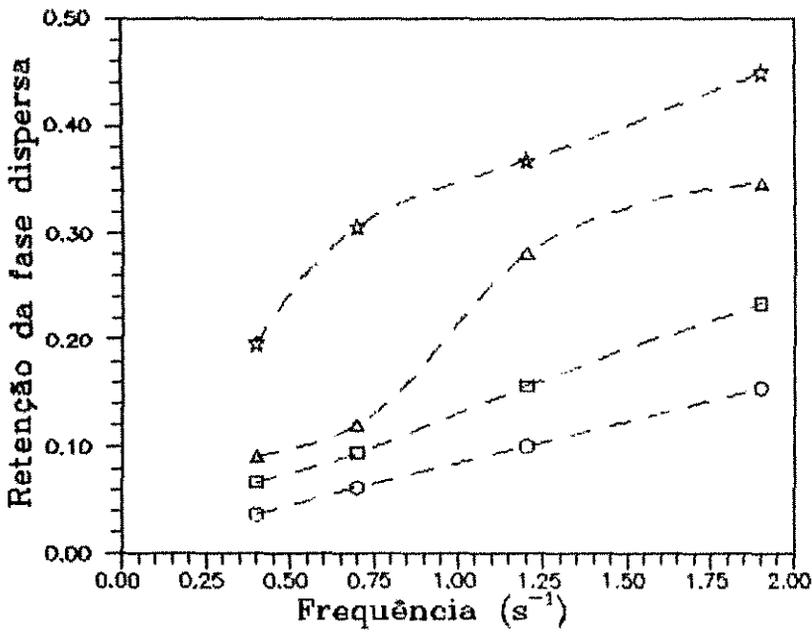
As Figs. 08 e 09 mostram que, nas situações experimentais nelas representadas, a fração de retenção cresce com o aumento da



Q_d (cm³/s)

- 7,3
- 8,4
- △ 10,8
- ☆ 14,2

Figura 08 - Gráfico fração de retenção vs. frequência
 Área livre = 20%, N = 7, A = 4 cm, Q_c = 10,0 cm³/s



Q_d (cm³/s)

- 7,3
- 8,4
- △ 10,8
- ☆ 14,2

Figura 09 - Gráfico fração de retenção vs. frequência
 Área livre = 20%, N = 7, A = 4 cm, Q_c = 11,2 cm³/s

frequência de pulsação. Pode-se notar ainda que o crescimento da retenção com a frequência é menos intenso para baixas vazões da fase dispersa. O comportamento exibido nessas figuras dá indícios de um regime de operação estável, onde a retenção mostrou-se crescente tanto com a frequência de pulsação, quanto com a vazão da fase dispersa, o que está em pleno acordo com as observações experimentais.

Situações experimentais similares às anteriormente mostradas estão representadas nas Figuras 10 e 11, com a ressalva de que a amplitude de pulsação passou de 4 para 6 cm.

As curvas presentes nessas figuras exibem um máximo atribuído, muito provavelmente, ao fenômeno de arraste, que provoca a redução da quantidade da fase dispersa no interior da coluna e se intensifica com o aumento da frequência de pulsação.

O fenômeno de arraste é indesejável na operação de contato entre fases líquidas, pois o mesmo provoca a perda de eficiência da operação e exige um processo de separação adicional, sob pena de causar problemas nas operações que se sucedem. O mecanismo do arraste consiste basicamente na incorporação de material de uma fase líquida na corrente de saída reservada à outra fase. Assim, no caso que se discute, isto equivale à corrente aquosa arrastar uma quantidade significativa de butanol, conduzindo-a ao descarte.

Observando-se cuidadosamente a mudança de comportamento ocorrida entre as Figs. 08 e 10, ou 09 e 11, nota-se que a mesma foi provocada pelo aumento da amplitude. Associando-se o efeito da amplitude e da frequência, pode-se interpretá-lo em termos da energia de pulsação, cujo aumento favoreceu a intensificação do

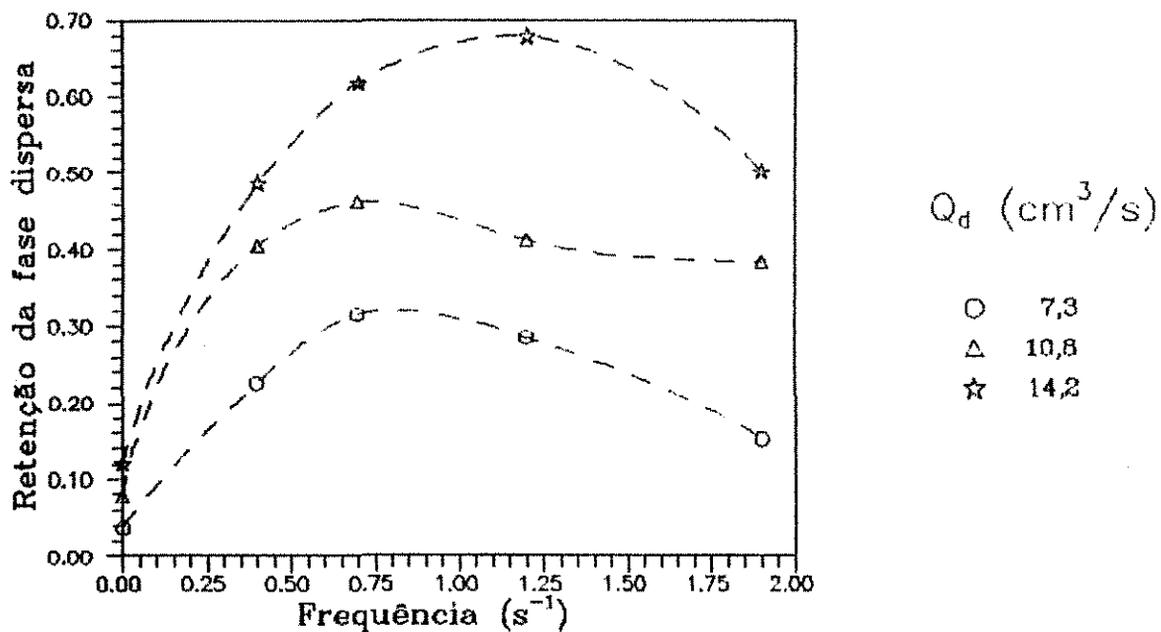


Figura 10 - Gráfico fração de retenção vs. frequência
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_c = 10,0$ cm^3/s

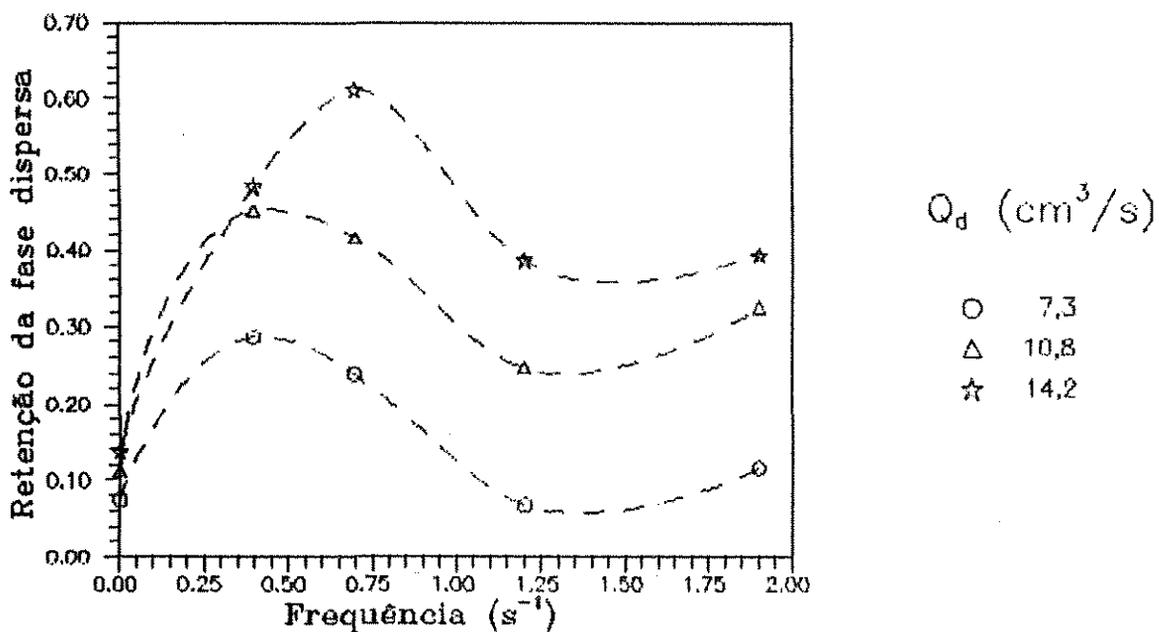


Figura 11 - Gráfico fração de retenção vs. frequência
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_c = 11,2$ cm^3/s

fenômeno de arraste. Este, por sua vez, provocou a redução da fração de retenção da fase dispersa, quando a frequência ultrapassou um valor que, para as situações representadas, pode ser considerado como crítico. Pode-se notar ainda que este valor da frequência de pulsação assumiu valores tais, que dependiam da vazão da fase dispersa, sob as quais foram realizados os experimentos.

O gráfico da Figura 12 também enfatiza a redução da retenção da fase dispersa com o aumento da frequência. Novamente, suspeita-se que o arraste tenha provocado este comportamento. As evidências são reforçadas pelo fato de a amplitude (e consequentemente a energia de pulsação) ter aumentado e, também, a vazão da fase contínua ter sido elevada de 10,0 para 11,2 cm³/s.

Os resultados experimentais analisados nas Figuras 08 a 12 mostraram as tendências gerais do comportamento da retenção da fase dispersa em função da frequência de pulsação. Nota-se facilmente que há faixas de frequências onde seria indesejável operar o equipamento, visto que se estaria restringindo a eficiência do mesmo, pois este parâmetro está ligado à retenção da fase dispersa, a qual, em certas situações, sofreu um declínio quando a frequência ultrapassou valores julgados críticos (Figuras 10, 11 e 12). É preciso levar também em consideração o efeito combinado frequência-amplitude de pulsação, já que a combinação destas duas variáveis pode ser interpretada em termos da energia de pulsação. O ítem seguinte irá abordar o efeito da amplitude de pulsação sobre a fração de retenção, onde esta última observação poderá ser reforçada.

IV.1.2 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE PULSAÇÃO

No presente trabalho, a amplitude de pulsação é definida como sendo a máxima diferença de cota atingida pelos discos ao longo

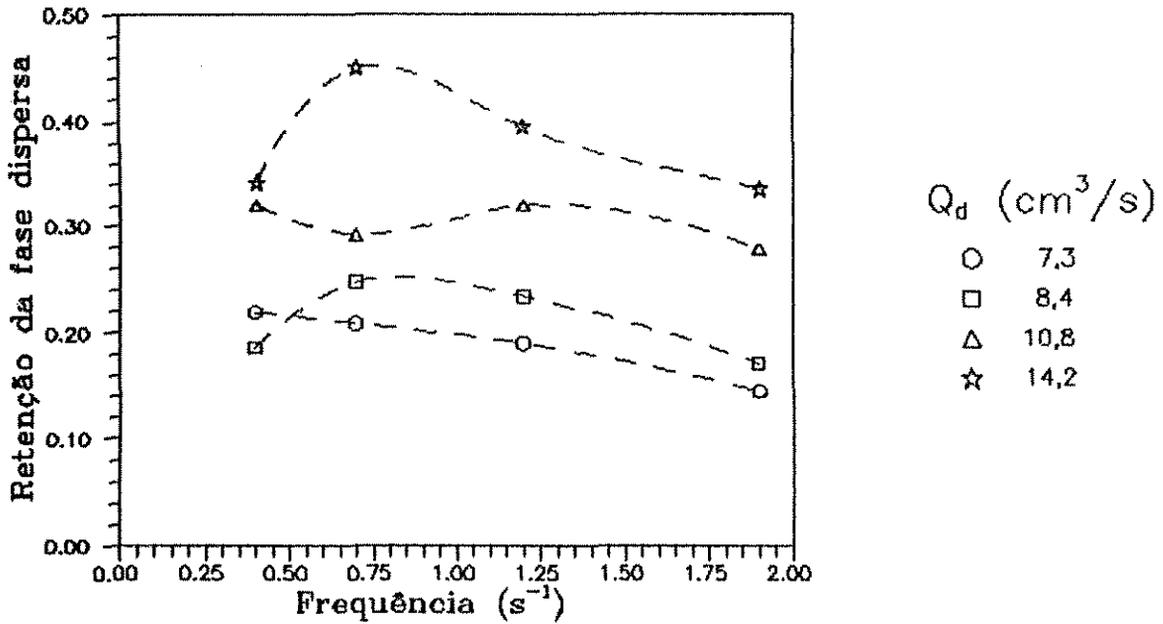


Figura 12 - Gráfico fração de retenção vs. frequência
 Área livre = 20%, N = 7, A = 8 cm, Q_c = 11,2 cm³/s

de um ciclo de pulsação completo, correspondendo, portanto, ao curso total do eixo vertical pulsante.

O tipo de pulsação escolhido para a realização dos ensaios experimentais foi a senoidal, cuja expressão matemática para o deslocamento do eixo pulsante, em função do tempo, pode ser escrita na seguinte forma:

$$z(t) = \frac{A}{2} \text{sen}(w.t) \quad (37)$$

onde

$z(t)$ = posição de um dado ponto do eixo pulsante, em relação a um referencial horizontal, num tempo t ;

A = amplitude de pulsação definida anteriormente;

$$w = 2.\pi.f \quad (38)$$

sendo f a frequência de pulsação.

A partir da Eq. 37 pode-se deduzir uma expressão para a velocidade instantânea de pulsação, aplicando-se a derivação em relação ao tempo, para uma dada frequência de pulsação, resultando

$$V_p(t) = \frac{\omega \cdot A}{2} \cos(\omega \cdot t) \quad (39)$$

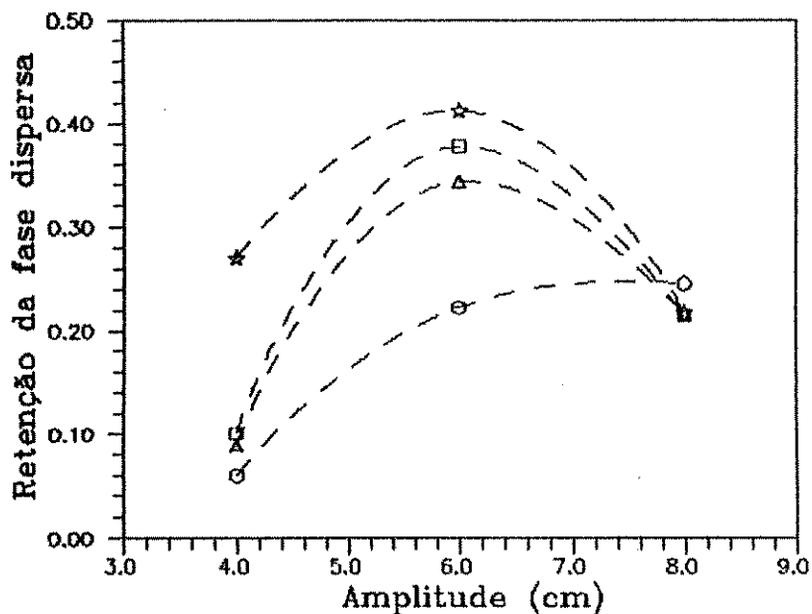
Substituindo-se a expressão (38) na Eq. acima, obtém-se:

$$V_p(t) = (\pi \cdot f \cdot A) \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (40)$$

Levando-se em consideração que a velocidade de pulsação dos discos é um dos fatores responsáveis pela transformação da fase dispersa em gotas, e que, de acordo com a Eq. 40, há uma dependência desta variável para com o produto (A.f), verifica-se a influência da amplitude de pulsação sobre a retenção da fase dispersa em colunas de discos alternativos.

Dentro da faixa de amplitudes utilizada nos experimentos (4 - 8 cm), constatou-se uma tendência predominante, associada à presença de um máximo nos gráficos da retenção da fase dispersa versus amplitude de pulsação. A princípio, pode-se verificar este aspecto observando-se as Figs. 13 e 14, que representam situações experimentais semelhantes, a menos da vazão da fase dispersa.

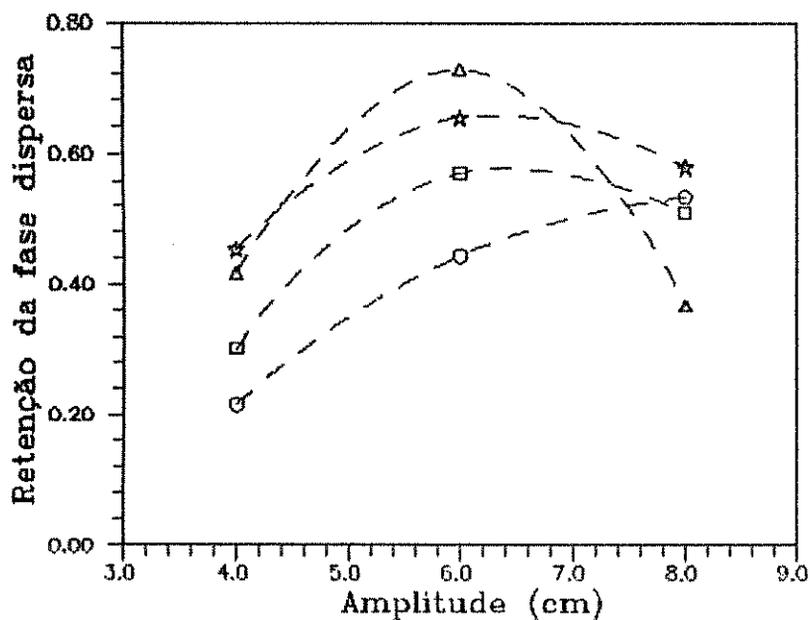
Nota-se que, para a menor frequência de pulsação ($0,4 \text{ s}^{-1}$), a presença do máximo não é tão evidente. Neste caso, o aumento da amplitude contribuiu para o aumento da fração de retenção da fase dispersa. O comportamento exibido pelos gráficos das Figs. 13 e 14 pode ser interpretado em termos da energia de pulsação fornecida à massa líquida, provocando a formação de uma dispersão líquido - líquido. Como já fora citado anteriormente, a energia transferida ao líquido depende fortemente das variáveis amplitude e frequência de pulsação, cujo produto representa a velocidade máxima de pulsação. Quanto maior for essa velocidade de pulsação, maior é a energia transferida ao sistema líquido. A absorção dessa energia na



Frequência(s⁻¹)

- 0,4
- 0,7
- △ 1,2
- ☆ 1,9

Figura 13 - Gráfico fração de retenção vs. amplitude, Área livre = 20%, N = 7, Q_c = 3,8 cm³/s, Q_d = 7,3 cm³/s



Frequência(s⁻¹)

- 0,4
- 0,7
- △ 1,2
- ☆ 1,9

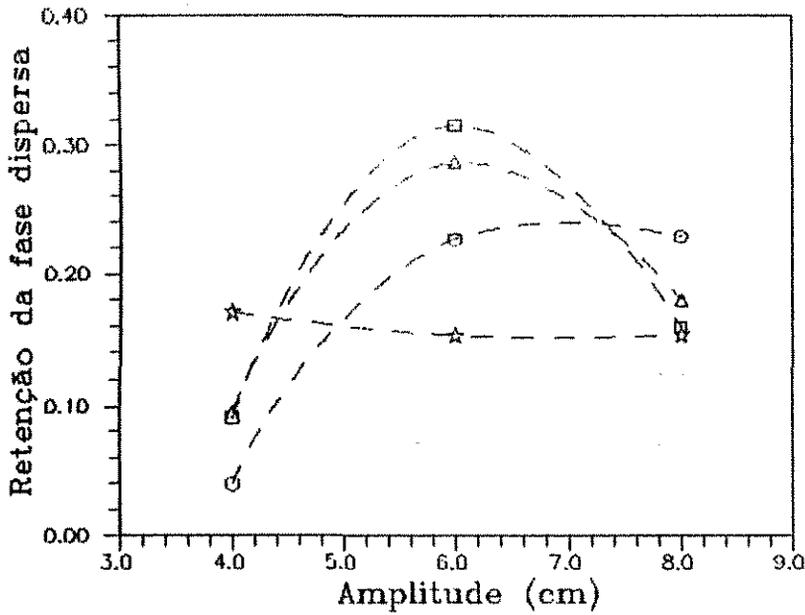
Figura 14 - Gráfico fração de retenção vs. amplitude, Área livre = 20%, N = 7, Q_c = 3,8 cm³/s, Q_d = 14,2 cm³/s

fragmentação de gotas não é ilimitada. Portanto, deve existir uma condição, além da qual, o fornecimento de energia torna-se indesejável.

Ainda com referência às Figs. 13 e 14, percebe-se que a máxima fração volumétrica da fase dispersa está associada à amplitude intermediária, correspondente a 6,0 cm. Isto não quer dizer que esta seja a amplitude ótima, nem que o máximo da fração de retenção ocorra exatamente a esta frequência amplitude, pois nada sabe-se a respeito dos outros valores de amplitude compreendidos entre os extremos da faixa estudada. Sabe-se sim, que, quando a amplitude passou de intermediária (equivalente a 6,0 cm) a máxima (8 cm), a retenção sofreu um decréscimo, exceto no caso da frequência igual a $0,4 \text{ s}^{-1}$. A causa desta redução é provavelmente devida ao arraste da fase dispersa, em concordância com a conclusão tirada na análise do efeito da frequência de pulsação.

A Fig. 15 representa uma situação experimental similar à do gráfico da Fig. 13. No entanto, a vazão da fase contínua cresceu de 3,8 para $10,0 \text{ cm}^3/\text{s}$. Neste caso, pode-se verificar com mais evidência, o efeito do fenômeno de arraste da fase dispersa, principalmente na situação correspondente à frequência máxima ($1,9 \text{ s}^{-1}$), na qual a retenção mostrou-se decrescente em toda a faixa de amplitude estudada. Isto vem reforçar aquilo que fora anteriormente discutido, em relação à excessiva agitação da massa líquida, proporcionada pela alta frequência de pulsação. Acredita-se que a excessiva agitação possa causar a formação de uma dispersão muito fina (emulsão), facilitando o transporte das gotas da fase dispersa pela corrente aquosa. Além disso, o fato de a vazão da fase contínua ter aumentado pode também ter favorecido o mecanismo de arraste.

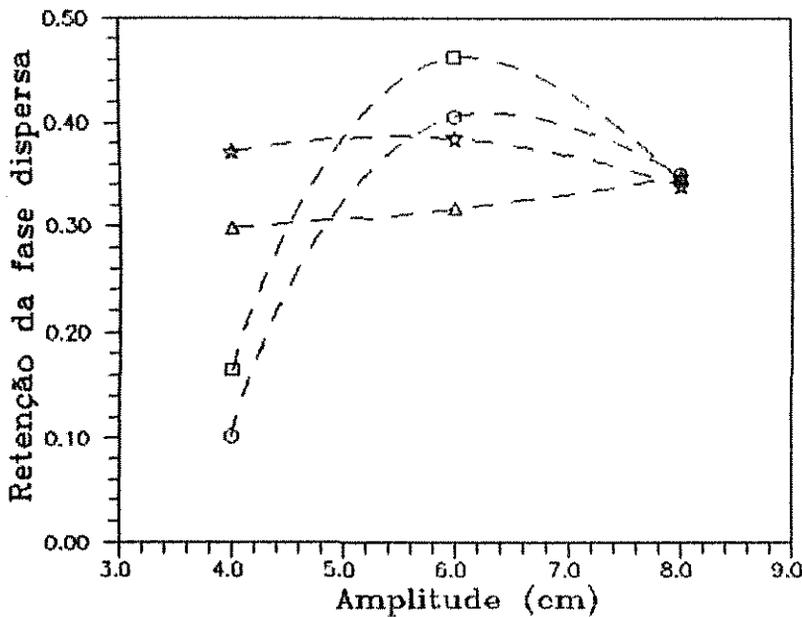
Outras situações experimentais, como as representadas nas Figs. 16 e 17, vêm reforçar as observações anteriores. Nesses casos,



Frequência(s⁻¹)

- 0,4
- 0,7
- △ 1,2
- ☆ 1,9

Figura 15 - Gráfico fração de retenção vs. amplitude
 Área livre = 20%, N = 7, Q_e = 10,0 cm³/s, Q_d = 7,3 cm³/s



Frequência(s⁻¹)

- 0,4
- 0,7
- △ 1,2
- ☆ 1,9

Figura 16 - Gráfico fração de retenção vs. amplitude
 Área livre = 20%, N = 7, Q_e = 10,0 cm³/s, Q_d = 10,8 cm³/s

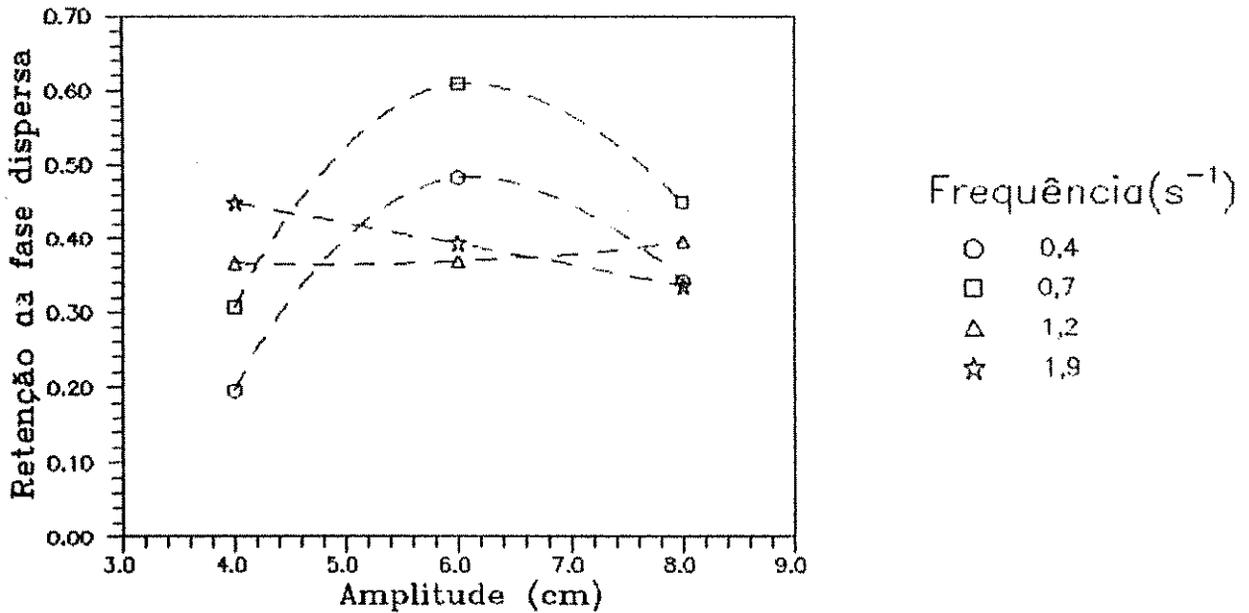


Figura 17 - Gráfico fração de retenção vs. amplitude
 Área livre = 20%, N = 7, Q_c = 11,2 cm³/s, Q_d = 14,2 cm³/s

a carga líquida da coluna; ou seja, a soma das vazões de ambas as fases, foi superior às dos casos anteriores. Comparando-se esses resultados com aqueles da Figura 15, verifica-se que houve uma extensão daquilo que ocorreu para a frequência máxima. Nas Figs. 16 e 17, provavelmente, devido à influência da maior carga líquida da coluna, notou-se um achatamento da curva correspondente à frequência de 1,2 s⁻¹, não apresentando o ponto de máximo. Atribui-se o ocorrido ao excesso de energia de pulsação e à maior velocidade de escoamento das fases, devido ao aumento da carga líquida.

A análise do efeito da amplitude de pulsação sobre a retenção da fase dispersa corroborou as observações feitas durante o estudo da influência da frequência de pulsação. Constatou-se que a energia de pulsação é um fator determinante no comportamento da fração volumétrica da fase dispersa.

IV.1.3 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DA FASE DISPERSA

Nos itens anteriores foram estudadas as influências das variáveis ligadas à pulsação sobre a retenção da fase dispersa. No presente, será estudada a influência da fase dispersa para uma série de situações experimentais.

A fase líquida escolhida para ser dispersa é geralmente aquela que não molha preferencialmente os dispositivos internos e as paredes do equipamento, além de possuir uma maior tensão superficial. Na grande maioria dos casos, esta fase também é a que possui menor densidade. No procedimento experimental utilizado neste trabalho o n-butanol atuou como fase dispersa, escoando ascendentemente na coluna, em contracorrente com a água (fase contínua).

Como o objetivo principal do presente trabalho é o estudo do comportamento da fração volumétrica da fase dispersa no equipamento de contato, então, é de se esperar que a vazão volumétrica desta fase seja uma variável bastante influente neste estudo. Em condições normais de operação, espera-se que a retenção seja diretamente proporcional à vazão da fase dispersa. Por outro lado, sabe-se que existem limitações no que diz respeito às vazões das fases que devem ser alimentadas à coluna, pois, sabe-se que, nas operações em contracorrente, uma fase impõe restrição ao escoamento da outra. O limite desta restrição seria a inundação total do equipamento.

Conforme foi previsto, a tendência geral dos resultados obtidos via análise do comportamento da fração de retenção, em função da vazão volumétrica da fase dispersa, revelou um efeito positivo; ou seja, o aumento da vazão de butanol contribuiu para o crescimento da retenção desta fase. Isto pode ser notado, por exemplo, analisando-se as situações representadas nas Figs. 18 e 19, válidas

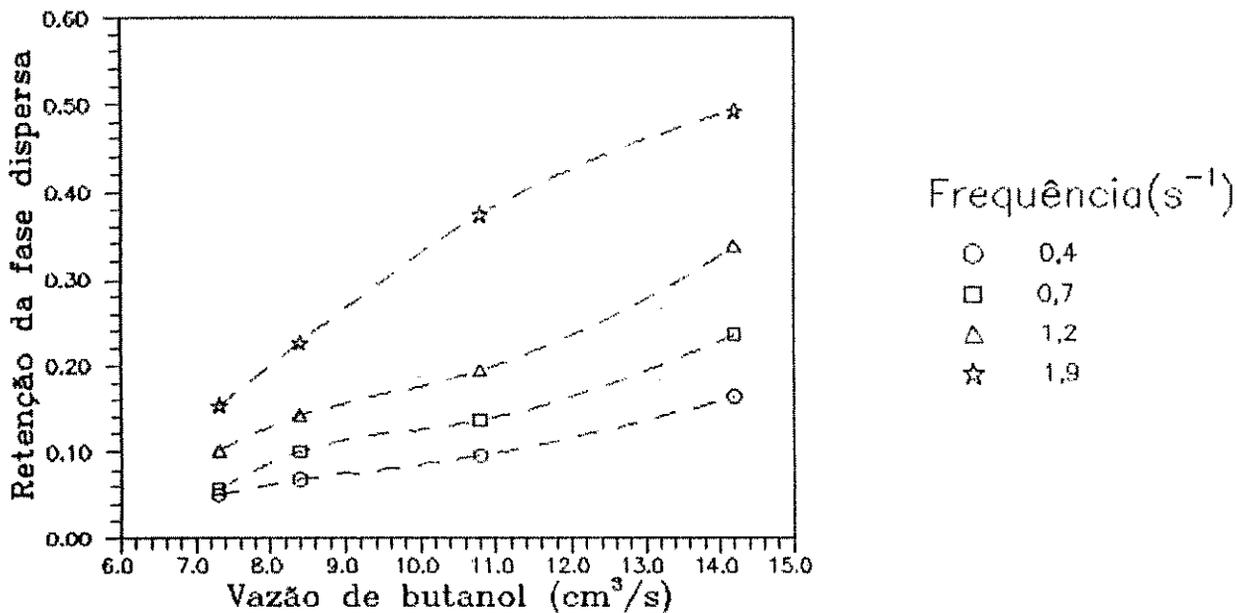


Figura 18 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase dispersa
 Área livre = 20%, $N = 4$, $A = 4\text{cm}$, $Q_c = 10,0\text{ cm}^3/\text{s}$

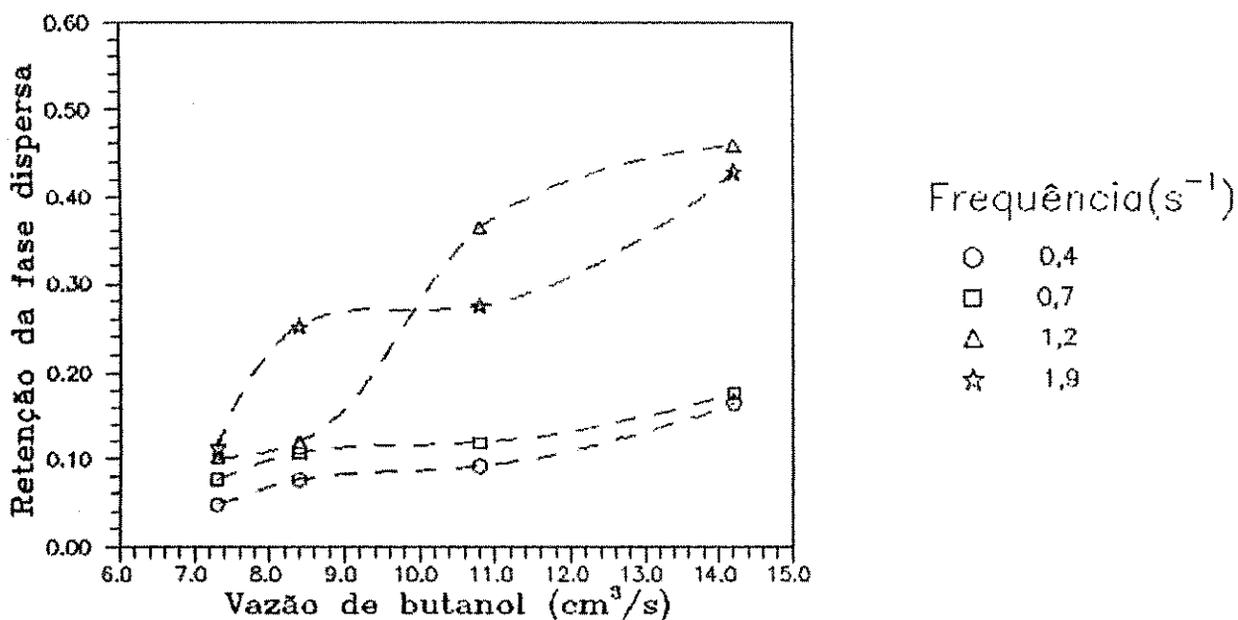


Figura 19 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase dispersa
 Área livre = 20%, $N = 4$, $A = 4\text{ cm}$, $Q_c = 11,2\text{ cm}^3/\text{s}$

para diferentes vazões da fase contínua.

Dessas figuras, torna-se evidente que, na maioria das situações, a retenção mostrou-se crescente com a frequência de pulsação, a menos da situação representada pela curva referente à frequência de $1,9 \text{ s}^{-1}$ na Fig. 19. Levando-se em conta a outra condição mostrada no gráfico da Fig. 20, constata-se que houve uma tendência à inversão da posição relativa das curvas correspondentes às frequências de $1,2$ e $1,9 \text{ s}^{-1}$. Mais uma vez depara-se com uma situação, onde a possível explicação para tal comportamento pode ser dada em termos do excesso de energia de pulsação. É importante notar, também, que a amplitude aumentou de 4 para 6 cm nas Figs. 19 e 20, respectivamente, o que contribuiu ainda mais para o aumento da energia de pulsação. A manifestação do aumento excessivo da energia de pulsação seria a produção de uma fina dispersão, mais susceptível ao transporte.

Ainda analisando-se o efeito da vazão da fase dispersa, porém utilizando-se um arranjo com 7 discos pulsantes, nota-se uma mudança mais marcante no comportamento das curvas. A princípio, as Figs. 21 e 22, válidas para uma mesma amplitude e diferentes vazões da fase contínua, exibem as características de uma operação estável, onde a capacidade de retenção aumentou com o crescimento da vazão de butanol. Apenas a curva relativa à frequência máxima na Fig. 21 exibiu uma maior ascensão do que a sua correspondente na Fig. 22. Isto deve-se, possivelmente, à mudança sofrida pela vazão da fase contínua, pois suspeita-se que esta variável influencie negativamente na retenção da fase dispersa.

De acordo com os resultados apresentados, constata-se que a vazão da fase dispersa é uma variável que exerce grande influência sobre a quantidade relativa desta fase na coluna, em toda a faixa de vazões estudada. Portanto, as observações condizem com o esperado,

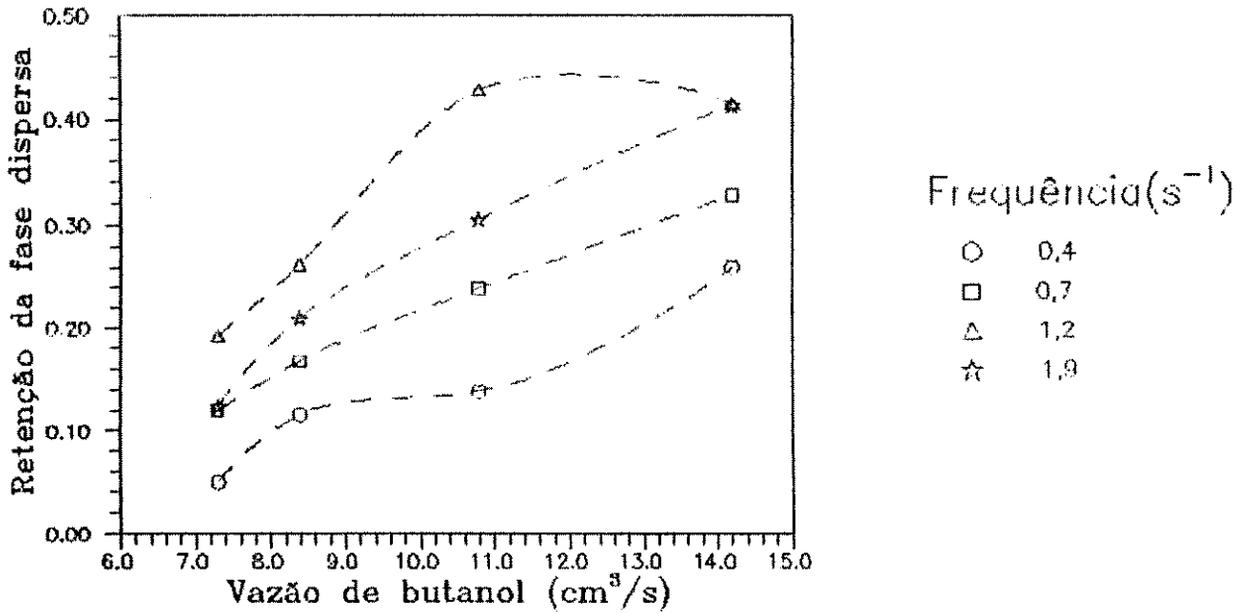


Figura 20 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase dispersa
 Área livre = 20%, $N = 4$, $A = 6$ cm, $Q_c = 10,0$ cm^3/s

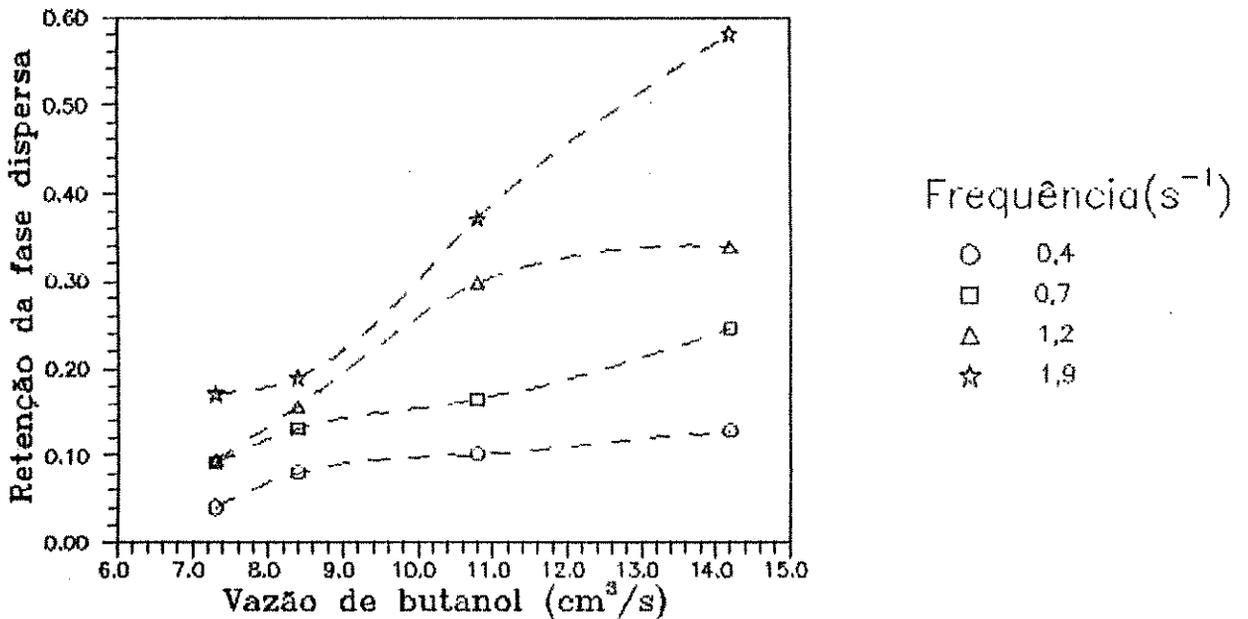


Figura 21 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase dispersa
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 4$ cm, $Q_c = 10,0$ cm^3/s

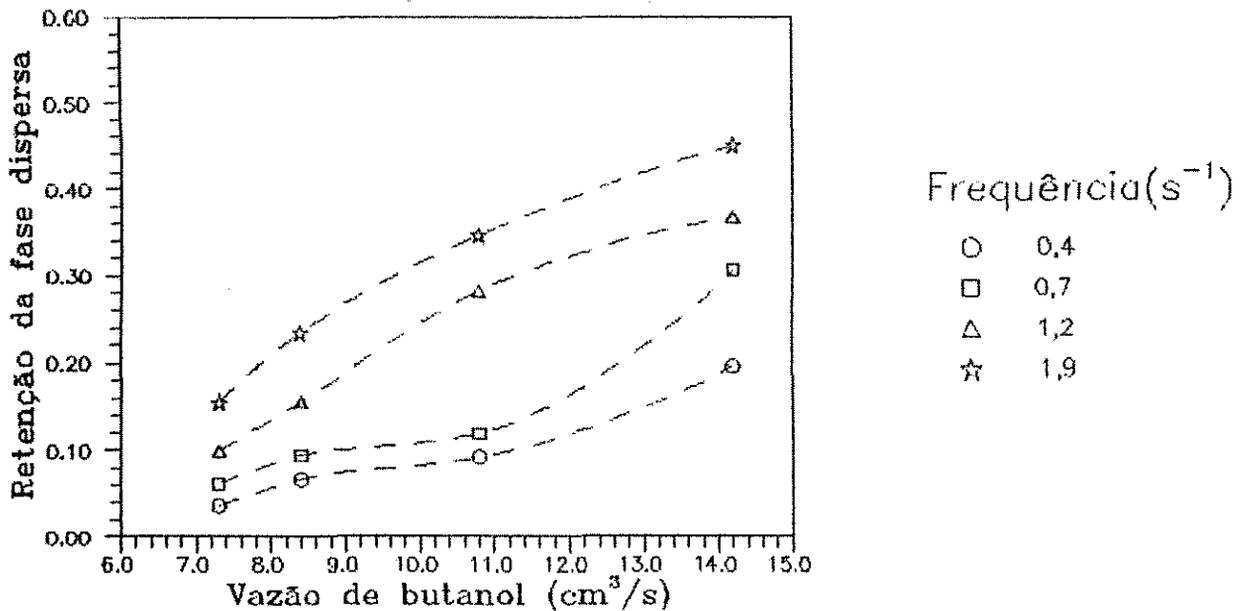


Figura 22 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase dispersa
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 4$ cm, $Q_c = 11,2$ cm^3/s

conforme foi proposto no início deste ítem.

IV.1.4 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO DA FASE CONTÍNUA

No ítem precedente foram analisadas as influências da vazão da fase dispersa sobre a retenção do material desta fase na coluna com seus dispositivos internos. Em todos os experimentos realizados utilizou-se a água como fase contínua.

Do ponto de vista da contribuição para a carga líquida total, seria esperado que a influência da vazão de água sobre o comportamento da retenção da fase dispersa fosse tão marcante quanto a da vazão de butanol. No entanto, na faixa de vazões da fase aquosa estudada, isto não se verificou.

As Figs. 23 e 24 demonstram que as variações sofridas pela fração volumétrica da fase dispersa, devido às mudanças provocadas

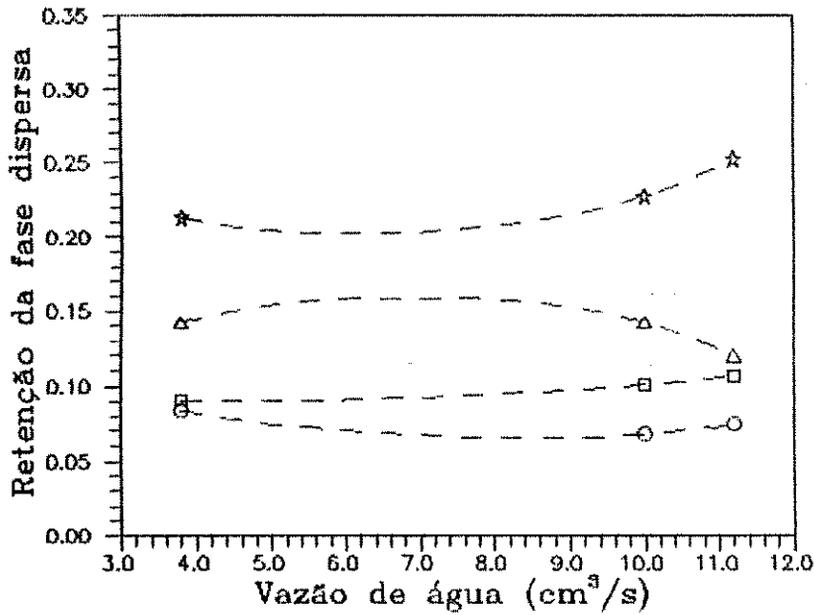


Figura 23 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase contínua
 Área livre = 20%, $N = 4$, $A = 4$ cm, $Q_d = 8,4$ cm^3/s

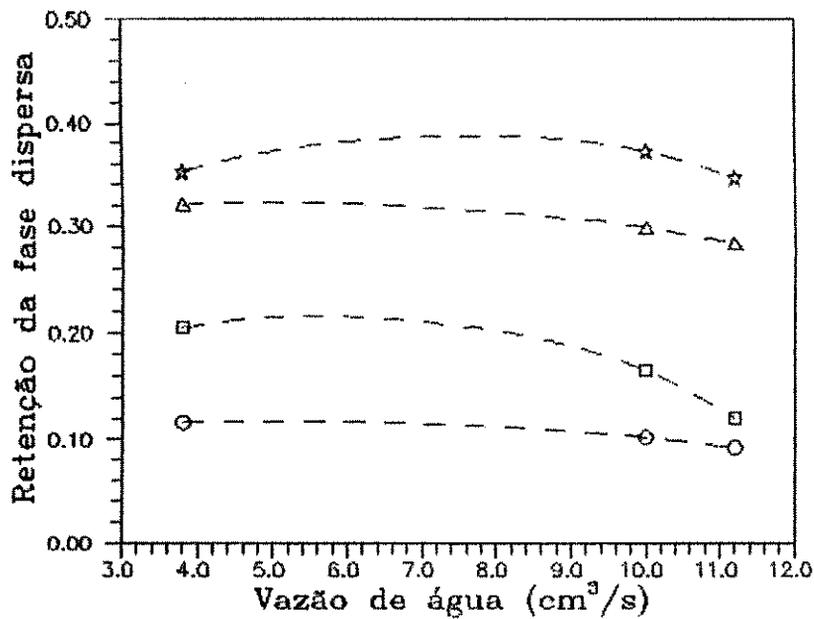


Figura 24 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase contínua
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 4$ cm, $Q_d = 10,8$ cm^3/s

na vazão da fase contínua, não foram tão notáveis. Esses resultados foram levantados em regime de operação estável, de acordo com as observações experimentais.

Para as condições experimentais representadas nas Figs. 23 e 24 pode-se dizer que, praticamente, não houve variação na retenção da fase dispersa, já que as curvas apresentaram-se bastante planas. No entanto, observando-se mais cuidadosamente a Fig. 24, nota-se uma tendência sistemática ao decréscimo da retenção da fase dispersa, à medida que a vazão da fase contínua aumenta. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da carga líquida da coluna, o que reflete no aumento da velocidade de escoamento das fases.

Analisando-se as situações das Figs. 25 e 26, nota-se uma mudança de comportamento em relação aos resultados apresentados nas Figs. 23 e 24. Levando-se em conta que a amplitude sofreu uma variação de 50%, o que implica na elevação da energia de pulsação, vê-se claramente que a explicação recai no mesmo aspecto já abordado, que é supostamente o principal responsável pela redução da fase dispersa: o arraste promovido pela excessiva agitação da massa líquida.

IV.1.5 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE DISCOS

Nos dois últimos itens foram estudadas as influências das vazões de ambas as fases sobre a fração de retenção da fase dispersa, as quais são grandezas tipicamente operacionais.

O presente ítem trata da influência do número de discos, que é uma grandeza de caráter geométrico-operacional, sobre a retenção da fase dispersa.

O número de discos que constitui o dispositivo de agitação é, certamente, uma variável de grande importância no estudo da fração de retenção da fase dispersa, uma vez que a efetividade de

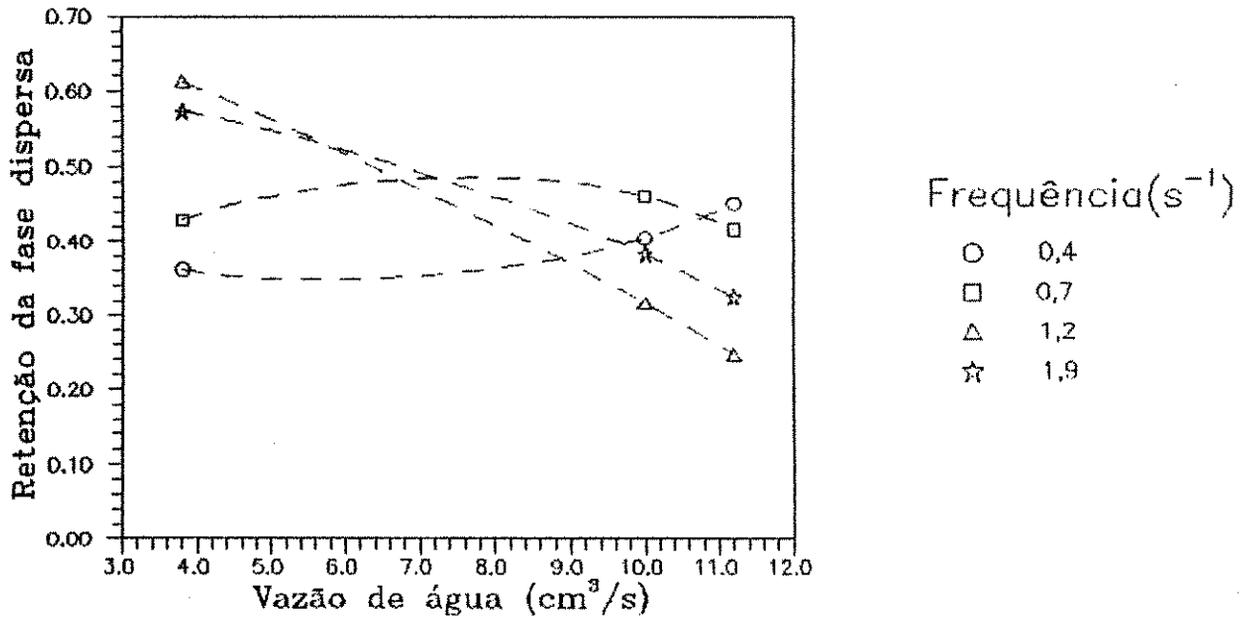


Figura 25 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase contínua
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_d = 10,8$ cm^3/s

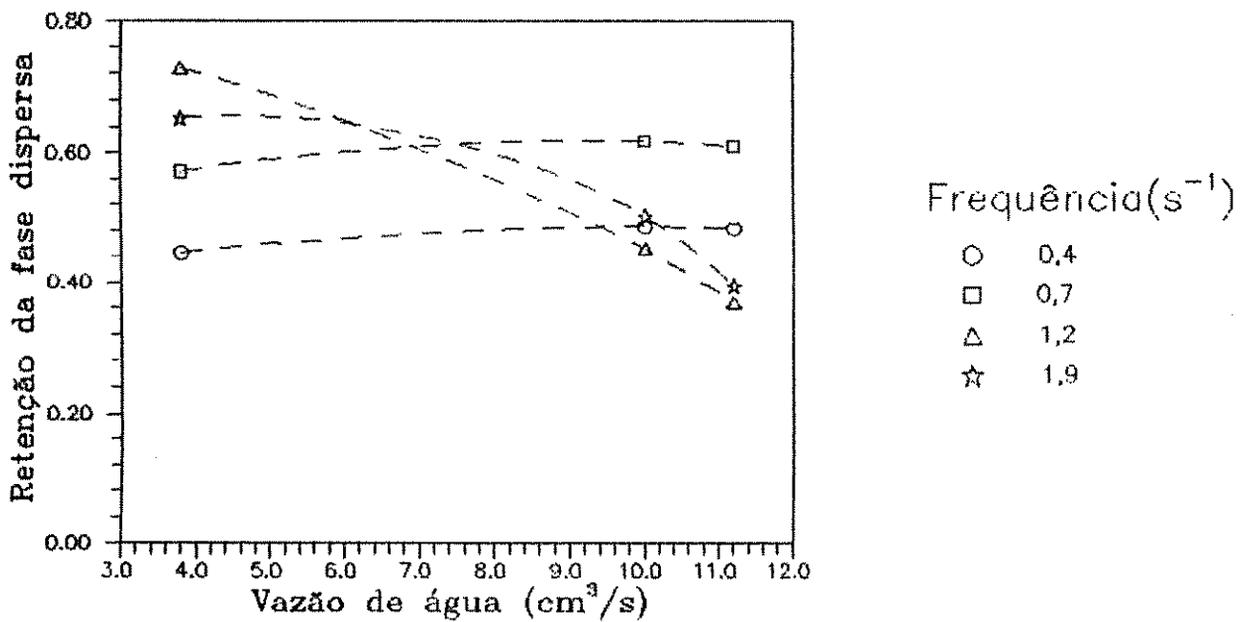


Figura 26 - Gráfico fração de retenção vs. vazão da fase contínua
 Área livre = 20%, $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_d = 14,2$ cm^3/s

agitação está intrinsecamente ligada à quantidade e à geometria dos discos utilizados nos experimentos.

A transferência da energia de pulsação à massa líquida é realizada por meio do movimento alternativo dos discos através da mesma. Conforme já foi citado em itens anteriores, a manifestação da agitação se reflete na formação de gotas da fase dispersa. Sabe-se também que o mecanismo de geração de gotas depende, entre outros fatores, da passagem do líquido através dos furos dos discos. Assim, é de se esperar que a quantidade de discos presente no equipamento aumente significativamente a retenção da fase dispersa, devido à maior eficiência de agitação conferida à massa líquida.

O Quadro 03 apresenta uma situação experimental onde se verificou a tendência ao aumento da retenção da fase dispersa com o número de discos. O comportamento crescente foi marcante para todas as vazões da fase dispersa, exceto para a de $10,8 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Quadro 03 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo o número de discos, para várias vazões da fase dispersa, com $\alpha = 20\%$, $A = 6 \text{ cm}$, $Q_c = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$, $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$.

N ^o de discos	Retenção da fase dispersa			
	$7,3 \text{ cm}^3/\text{s}$	$8,4 \text{ cm}^3/\text{s}$	$10,8 \text{ cm}^3/\text{s}$	$14,2 \text{ cm}^3/\text{s}$
4	0,120	0,168	0,240	0,329
7	0,226	0,373	0,405	0,486

Um maior suporte à última observação é dado pelos Quadros 04 e 05. Nota-se que as condições experimentais características dessas situações são bastante diferentes daquelas do Quadro 03. Ainda assim, pode-se notar mais claramente que o aumento do número de discos favorece o crescimento da retenção da fase dispersa.

Quadro 04 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo o número de discos, para várias vazões da fase dispersa, com $\alpha = 20\%$, $A = 4 \text{ cm}$, $Q_c = 3,8 \text{ cm}^3/\text{s}$, $f = 1,9 \text{ s}^{-1}$.

N ^o de discos	Retenção da fase dispersa			
	7,3 cm ³ /s	8,4 cm ³ /s	10,8 cm ³ /s	14,2 cm ³ /s
4	0,121	0,213	0,356	0,371
7	0,271	0,287	0,353	0,453

Quadro 05 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo o número de discos, para várias vazões da fase dispersa, com $\alpha = 20\%$, $A = 6 \text{ cm}$, $Q_c = 11,2 \text{ cm}^3/\text{s}$, $f = 0,7 \text{ s}^{-1}$.

N ^o de discos	Retenção da fase dispersa			
	7,3 cm ³ /s	8,4 cm ³ /s	10,8 cm ³ /s	14,2 cm ³ /s
4	0,094	0,170	0,281	0,347
7	0,239	0,229	0,417	0,610

De acordo com o que foi observado nos Quadros 03 a 05, verifica-se que, nas condições estudadas, o aumento do número de discos elevou a capacidade da coluna de reter a fase dispersa, o que está em pleno acordo com as expectativas teóricas.

IV.1.6 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁREA LIVRE NOS DISCOS

A área livre de escoamento nos discos é uma variável de caráter geométrico que, de modo análogo ao número de discos, desempenha um importante papel no mecanismo de agitação da massa líquida e que, conseqüentemente, exerce influência sobre a geração de gotas e a retenção da fase dispersa na coluna.

A natureza do fenômeno de escoamento das fases através dos discos é bastante complexa, pois, além de se considerar o fluxo em contracorrente, deve-se levar em conta o movimento dos discos relativo ao líquido. A combinação das forças associadas ao movimento

do dispositivo de pulsação e ao escoamento das fases forçam a passagem do líquido através das perfurações dos discos. No ato em que o líquido atravessa os discos, ocorre uma intensa dispersão, que é bastante influenciada pelo diâmetro das perfurações dos mesmos. Assim, em condições normais de operação, quanto menor esse diâmetro, mais fina tende a ser a dispersão.

Na realização dos experimentos inerentes ao presente trabalho, foram utilizados dois tipos de discos, conforme já descrito no Capítulo II. O primeiro tipo, possuindo uma área livre de 20%, com furos de 0,3 cm de diâmetro, e o segundo possuindo uma área livre de 38%, com furos de 0,9 cm de diâmetro.

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 06, nota-se que o aumento na área livre dos discos de 20 para 38% refletiu na diminuição da retenção da fase dispersa. Este comportamento pode ser atribuído à formação de uma dispersão mais grosseira, à medida que a área livre nos discos cresceu, pois isto ocorreu às custas de um aumento no diâmetro dos furos. O aumento do tamanho das gotas da fase dispersa influenciou na redução da retenção desta fase na coluna.

Quadro 06 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo a área livre nos discos para várias frequências, com $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_c = 3,8$ cm³/s, $Q_d = 7,3$ cm³/s.

Área livre (%)	Retenção da fase dispersa			
	0,4 Hz	0,7 Hz	1,2 Hz	1,9 Hz
20	0,224	0,378	0,344	0,413
38	0,073	0,139	0,138	0,142

Os Quadros 07 e 08 mostram outras situações onde a carga líquida da coluna aumentou significativamente. Nestes casos, pode-se notar que, para baixas frequências de pulsação, onde a energia

fornecida ao líquido é relativamente pequena, a queda da fração de retenção com o aumento da área livre foi mais acentuada. Já para as frequências de pulsação mais elevadas, a redução da retenção não ocorreu tão significativamente. A mais provável explicação para o ocorrido é que o aumento da energia de pulsação produziu uma dispersão mais fina, com o fenômeno de geração de gotas menos sensível à geometria dos discos. Neste caso, a quebra das gotas devida à turbulência na região da esteira ("wake zone"), formada pelo movimento dos discos, deve ser mais relevante, somando-se à geração de gotas no ato em que o líquido atravessa as perfurações, contribuindo, assim, para contrabalancear, em parte, o efeito do aumento da fração de área livre sobre a retenção da fase dispersa.

Quadro 07 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo a área livre nos discos para várias frequências, com $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_c = 10,0$ cm³/s, $Q_d = 14,2$ cm³/s.

Área livre (%)	Retenção da fase dispersa			
	0,4 Hz	0,7 Hz	1,2 Hz	1,9 Hz
20	0,486	0,618	0,450	0,503
38	0,178	0,243	0,442	0,377

Quadro 08 - Resultados da retenção da fase dispersa segundo a área livre nos discos para várias frequências, com $N = 7$, $A = 6$ cm, $Q_c = 11,2$ cm³/s, $Q_d = 14,2$ cm³/s.

Área livre (%)	Retenção da fase dispersa			
	0,4 Hz	0,7 Hz	1,2 Hz	1,9 Hz
20	0,483	0,610	0,368	0,393
38	0,210	0,420	0,393	0,382

De uma maneira geral, os resultados apresentaram uma tendência regular, com a retenção diminuindo com o aumento da fração de área livre nos discos. Este comportamento está em pleno

acordo com o que foi anteriormente previsto.

IV.2 - ANÁLISE DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA A PARTIR DA VELOCIDADE RELATIVA

No ítem II.3.2 fez-se uma abordagem da velocidade relativa e da velocidade característica, inclusive apresentando as principais correlações existentes na literatura. Utilizando-se a equação que define a velocidade relativa e adotando-se o modelo de Baird e Shen (1984), válido para colunas de pratos alternativos, chegou-se à seguinte expressão, que é a própria Eq. 35:

$$\frac{V_d}{\epsilon} + \frac{V_c}{1 - \epsilon} = V_o \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^{1/3}}$$

Neste ítem, a última equação será manipulada com base nos resultados experimentais, utilizando-se artifícios de linearização, juntamente com o auxílio de recursos computacionais.

Observando-se a Eq. 35, nota-se que é preciso conhecer as velocidades de escoamento das fases e a fração de retenção da fase dispersa, para a avaliação da velocidade característica. Esta última variável foi determinada diretamente numa série de experimentos que constam do Apêndice A. Já as velocidades de escoamento das fases necessitam de cálculos e de uma consideração adicional, para que as mesmas possam ser avaliadas. Esta consideração está baseada no fato de se desprezar o fenômeno de incorporação de material de uma fase na corrente da outra fase. No jargão técnico, este fenômeno é denominado de "entrainment". Utilizando-se esta consideração, as velocidades V_c e V_d foram calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$V_i = \frac{Q_i}{S} \quad (41)$$

onde

V_i = velocidade aparente de escoamento da fase i ($i = c, d$);

Q_i = vazão volumétrica da fase i ;

S = área da seção transversal da coluna.

A divisão de V_i pelos termos que envolvem a fração de retenção, ε , corrige estas velocidades para seus valores reais.

Aplicando-se o artifício da linearização na Eq. 35, pode-se obter o valor do parâmetro V_o , o qual tem como interpretação geométrica a inclinação da curva obtida num gráfico do tipo y versus x , onde

$$x = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^{1/a}} \quad (42)$$

$$y = \frac{V_d}{\varepsilon} + \frac{V_c}{1 - \varepsilon} \quad (43)$$

Os valores de x e y foram calculados com base nos resultados experimentais.

A Figura 27 representa o resultado do procedimento anteriormente descrito e engloba todas as situações experimentais estudadas.

Já que foi aplicada a linearização na Eq. 35, esperava-se que o comportamento do gráfico y versus x fosse mais ou menos linear. No entanto, a Fig. 27 apresenta os pontos experimentais distribuídos de tal forma, que nota-se uma tendência de os mesmos serem melhor ajustados por uma função exponencial crescente, ou por um polinômio em x .

Neste caso, V_o pode ainda ser interpretada como sendo a inclinação da curva que melhor ajusta os pontos experimentais, só que, neste caso, a inclinação varia ponto a ponto. Assim, pode-se aplicar uma diferenciação envolvendo as variáveis x e y , resultando

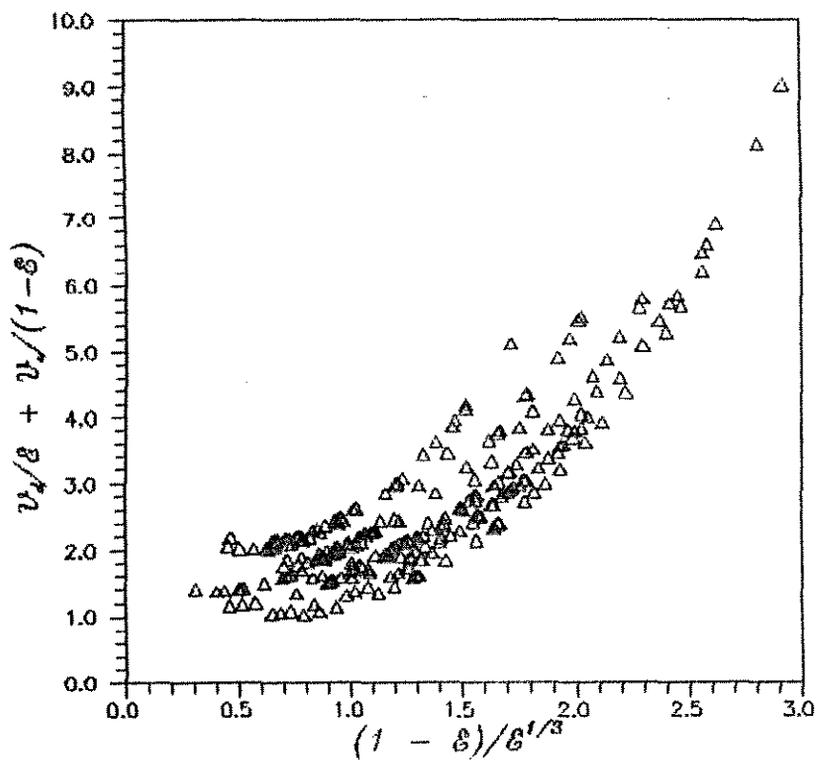


Figura 27 - Gráfico da Velocidade Característica V_0
Modelo de Baird & Shen (1984)

na seguinte expressão:

$$V_0 = \frac{dy}{dx} \quad (44)$$

A Figura 28 mostra o ajuste dos pontos por um polinômio de grau 3, revelando-se ser a melhor aproximação dentre uma série de possibilidades estudadas. O polinômio ajustado foi o seguinte:

$$y = 0,213x^3 + 0,312x^2 - 0,311x + 1,746 \quad (45)$$

Aplicando-se a condição dada pela Eq. 44 obtém-se:

$$V_0(x) = 0,639x^2 + 0,624x - 0,311 \quad (46)$$

Esta é a equação para o cálculo da velocidade característica em função da retenção da fase dispersa, que está implícita na variável x .

Segundo Baird e Shen (1984), a velocidade característica é

um parâmetro que depende do diâmetro das gotas e das propriedades físicas do sistema, mas independe das vazões das fases. Dessa forma, pode-se interpretar o comportamento não linear apresentado nas Figs. 27 e 28, em termos da influência dos fenômenos de coalescência das gotas, o qual provoca a redução da retenção, com um conseqüente aumento na velocidade característica, e do arraste da fase dispersa, que provoca desvios no cálculo das velocidades reais de escoamento das fases.

Aplicando-se uma regressão linear aos pontos da Fig. 27, pode-se ter um valor médio para o parâmetro V_0 , nas condições experimentais estudadas. O resultado obtido deste procedimento está exposto na Figura 29.

A equação da melhor reta ajustada é a seguinte:

$$y = 2,095x - 0,062 \quad (47)$$

A partir desta última equação, deduz-se que V_0 é dado pelo coeficiente de x , que é a própria inclinação da reta. Assim

$$V_0 \cong 2,1 \text{ cm/s}$$

Este resultado está bastante coerente com o que foi apresentado por Baird e Shen (1984), autores do modelo utilizado no presente trabalho, obtido para o sistema Água - querosene, que possui propriedades físicas que se assemelham às do sistema n-butanol - Água. Para efeito de ilustração, o Quadro 09, a seguir, apresenta uma comparação dos resultados deste trabalho com os obtidos por aqueles autores.

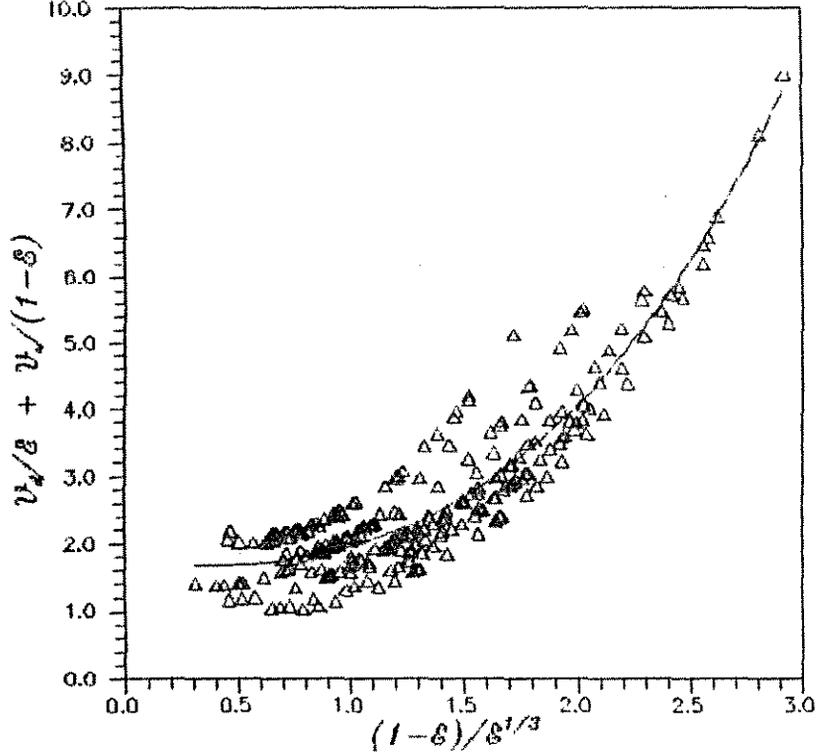


Figura 28 - Gráfico da Velocidade Característica V_c , Aproximação Polinomial.

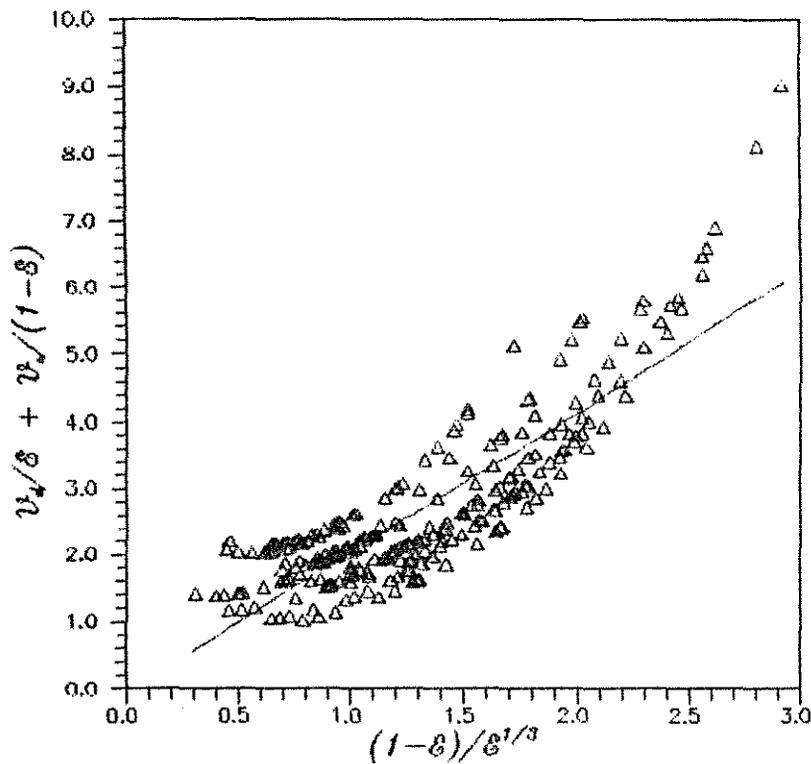


Figura 29 - Gráfico da Velocidade Característica V_c , Aproximação Linear.

Sistema líquido	V_o (cm/s)
Querosene - água	2,12
n-butanol - água	2,10

A substituição do valor médio de V_o na Eq. 35 resulta em

$$\frac{V_d}{\epsilon} + \frac{V_c}{1 - \epsilon} = 2,1 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^{1/3}} \quad (48)$$

De acordo com Thornton (1957b), pode-se fazer uma predição da condição de inundação a partir da Eq. 35, aplicando-se a seguinte condição:

$$\left[\frac{\partial V_o}{\partial \epsilon} \right] V_d, V_o = 0 \quad (49)$$

Dessa forma, fazendo-se $\theta = V_d/V_o$ na Eq. 35, obtém-se:

$$V_o = \frac{(1 - \epsilon)^2 V_o}{\epsilon^{1/3} (1 - \theta) + \theta \epsilon^{-2/3}} \quad (50)$$

Aplicando-se a condição (49) e rearranjando-se os resultados, chega-se a

$$\epsilon_f = \frac{(9\theta^2 + 54\theta + 1)^{1/2} - 7\theta - 1}{10(1 - \theta)} \quad (51)$$

onde o índice f refere-se à condição de inundação.

A última equação possibilita a predição da fração volumétrica da fase dispersa no limiar da inundação total. Para tanto, é necessário, apenas, o conhecimento da razão entre as vazões volumétricas das fases.

É importante salientar que o tratamento da velocidade relativa e da velocidade característica envolveu equações de modelagem propostas para outros sistemas líquidos, sob diferentes

condições experimentais. Portanto, a validade dessas equações, para as condições experimentais nas quais foram levantados os dados para o presente trabalho, deve ser testada, o que exige um estudo adicional.

IV.3 - CONCLUSÕES

O estudo da influência das variáveis experimentais sobre a retenção da fase dispersa proporcionou um meio adequado para a observação do efeito de cada variável, isoladamente, sobre o parâmetro de interesse. Na forma como foi desenvolvido o estudo, foram obtidas uma série de observações importantes para o projeto e operação de colunas de extração de discos alternativos.

Quando se estudou o efeito da frequência e da amplitude de pulsação sobre a fração de retenção da fase dispersa, verificou-se que existe uma condição de agitação representada pela combinação da frequência com a amplitude, além da qual, qualquer aumento na energia de pulsação, provoca a redução da retenção. Em termos da amplitude, este efeito se pronunciou quando a mesma passou de intermediária (6 cm) a máxima (8 cm). Já no caso da frequência, a tendência à redução da retenção da fase dispersa foi mais pronunciada para os valores de 1,2 e 1,7 s^{-1} . Do exposto, conclui-se que deve haver uma condição ótima de agitação, a qual também é função da carga líquida fornecida à coluna.

A vazão da fase dispersa, conforme já era esperado, influenciou positivamente sobre a retenção; ou seja, o aumento da vazão se refletiu no crescimento da quantidade desta fase retida na coluna. Este comportamento se verificou em toda a faixa de operação estudada.

No caso da vazão da fase contínua, constatou-se que esta variável não influenciou muito sobre a retenção da fase dispersa.

Além disso, pôde-se notar claramente que predominou a influência negativa; ou seja, o aumento da vazão da fase contínua se manifestou na redução da fração volumétrica da outra fase, o que é perfeitamente aceitável, uma vez que, nas operações em contracorrente, o fluxo de uma fase impõe restrição ao fluxo da outra.

A análise do efeito do número de discos sobre as características operacionais do equipamento revelou que, nas situações estudadas, o aumento da quantidade de discos no dispositivo de agitação contribuiu para o aumento da capacidade de retenção do equipamento, relativa à fase dispersa. Isto pode ser interpretado em termos do aumento da efetividade de agitação, associado à elevação do número de discos pulsantes.

Um comportamento oposto ao anteriormente descrito se verificou ao analisar-se o efeito da fração de área livre de escoamento nos discos pulsantes. A redução da fração de retenção deveu-se, provavelmente, à perda de eficiência na quebra das gotas, decorrente do aumento no diâmetro dos furos contidos nos discos, já que este aumento foi o responsável pela maior área livre conferida aos mesmos.

Quanto ao estudo da velocidade relativa e da velocidade característica, utilizando-se o modelo de Baird e Shen (1984), observou-se uma redução na inclinação da curva que melhor ajustou os pontos experimentais (vide Fig. 28). Este comportamento está associado, possivelmente, ao fenômeno de coalescência, ou de arraste das gotas da fase dispersa. Nota-se também que, coincidentemente, a redução da inclinação correspondeu ao aumento na fração de retenção da fase dispersa. Assim, aumenta a possibilidade das gotas da fase dispersa coalescerem, o que é bastante coerente.

V - MODELAGEM MATEMÁTICA DA FRAÇÃO DE RETENÇÃO VIA CORRELAÇÕES EMPÍRICAS

No Capítulo anterior abordou-se uma análise sistemática do efeito das variáveis operacionais sobre a fração de retenção da fase dispersa. Essa análise consistiu basicamente na observação das tendências exibidas pelo parâmetro dependente (retenção da fase dispersa), quando representado em função de cada uma das variáveis operacionais. Além disso, foi feito um estudo acerca da velocidade relativa entre as fases, utilizando-se o modelo de Baird e Shen (1984) para a determinação da velocidade característica.

No presente capítulo pretende-se desenvolver correlações empíricas utilizando-se a técnica da análise dimensional. Alguns recursos algébricos - inerentes à técnica da análise dimensional - e computacionais foram utilizados como ferramentas auxiliares nesse estudo. Os resultados obtidos a partir das correlações empíricas foram submetidos a uma comparação com aqueles obtidos diretamente através das medidas experimentais.

V.1 - ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional combinada com experiências é uma das técnicas de mais larga aplicação na análise de fenômenos físicos de grande complexidade. A exemplo das demais técnicas, a análise dimensional também tem suas limitações, que restringem o seu alcance de aplicação. A principal limitação deste método é que os resultados obtidos são incompletos e absolutamente inaproveitáveis sem dados experimentais. No entanto, em se tratando de um problema como este, cuja abordagem é meramente empírica, a análise dimensional facilita a interpretação e estende o campo de aplicação dos dados

experimentais, correlacionando-os em termos de grupos adimensionais.

A análise dimensional possui uma estratégia bastante peculiar, já que a mesma não gera equações passíveis de serem resolvidas. Ao contrário, ela combina diversas variáveis em grupos adimensionais, tais como os números de Reynolds, Froude e Weber, os quais possuem uma dada interpretação física e já são consagrados em estudos desta natureza.

Quando, para um dado problema físico, tem-se conhecimento acerca de uma equação, ou de um conjunto de equações que descrevem o fenômeno, a aplicação da análise dimensional fornece diretamente os grupos adimensionais envolvidos no mesmo. Ao contrário, quando não se dispõe das equações fenomenológicas, o sucesso na utilização da técnica depende da escolha das variáveis que influem no problema. Caso uma das variáveis pertinentes seja omitida nessa escolha, os resultados obtidos poderão ser errôneos. Escolhidas as variáveis pertinentes, o procedimento seguinte é a obtenção dos grupos adimensionais que integrarão a correlação empírica.

V.1.1 - DIMENSÕES PRIMÁRIAS

Na aplicação da técnica da análise dimensional certas dimensões devem ser estabelecidas como fundamentais. A escolha dessas dimensões é arbitrária, porém as fórmulas dimensionais de todas as variáveis pertinentes devem ser expressas em termos das dimensões primárias.

Em problemas de transferência de momentum, todas as variáveis envolvidas podem ser expressas em termos das grandezas fundamentais massa (M), comprimento (L) e tempo (T).

V.1.2 - TEOREMA Π DE BUCKINGHAM

Em situações gerais, onde não existam equações diferenciais que governem o fenômeno, necessita-se de um procedimento mais geral para a aplicação da análise dimensional. Tal procedimento é conhecido como método de Buckingham.

O passo inicial na aplicação do método de Buckingham requer a listagem de todas as grandezas significativas para o problema. Torna-se necessário, então, determinar o número de parâmetros adimensionais nos quais as grandezas possam ser combinadas. Este número pode ser determinado usando-se o teorema Π de Buckingham, o qual assegura que o número de grupos adimensionais necessário para descrever uma situação envolvendo n variáveis é igual a $(n - r)$, onde r é o posto ("rank") da matriz dimensional das variáveis.

A matriz dimensional das variáveis consiste de um arranjo formado pelos expoentes das variáveis pertinentes, expressas em termos das dimensões fundamentais, conforme será ilustrado em seguida. O posto desta matriz corresponde ao número de linhas (ou de colunas) da maior matriz com determinante não nulo, obtida a partir da matriz original.

Denominando-se os grupos adimensionais por $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots$, etc, decorre do teorema Π que a equação representativa do fenômeno pode ser expressa em termos dos grupos adimensionais, através de uma relação do tipo:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{(n-r)}) = 0 \quad (52)$$

Na maioria dos problemas físicos deseja-se observar o comportamento de um dado grupo adimensional, que contenha um parâmetro de interesse, em função dos demais grupos. Neste caso, o teorema Π assegura a validade de uma nova expressão que atenda a essas exigências. Neste caso, pode-se expressar a Eq. (52) da

seguinte forma:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{(n-r)}) \quad (53)$$

Dessa forma, os dados experimentais podem ser correlacionados representando-se Π_1 em função dos demais grupamentos, ou ainda, explicitar o parâmetro de interesse, supostamente contido em Π_1 . Isto é exatamente o que será feito no presente trabalho.

V.1.3 - DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS

O procedimento utilizado na determinação dos grupos adimensionais exige a listagem de todas as grandezas que influem no problema físico, conforme já citado anteriormente. Na sequência é necessário selecionar as variáveis básicas, as quais figurarão em cada um dos grupos Π e devem envolver todas as dimensões primárias. Estas variáveis são também denominadas de variáveis repetidas, pelo simples fato de estarem presentes nas expressões originárias de cada grupo. A escolha dessas variáveis deve obedecer a certos critérios que têm influência direta sobre a expressão final da correlação e sua capacidade de representar o problema físico. O principal desses critérios é a exclusão das variáveis, cujos comportamentos deseja-se observar, daquele conjunto de variáveis básicas.

Um outro critério importante sugere que a composição da base seja feita escolhendo-se variáveis representativas; por exemplo, empregando-se uma variável de caráter cinemático, outra ligada às forças ou massa (grandeza inercial), e uma outra de caráter geométrico.

As demais grandezas constituem o conjunto das variáveis não repetidas. Cada uma dessas variáveis, juntamente com o conjunto de variáveis básicas, origina um grupamento Π diferente. Para melhor

esclarecer este procedimento, suponhamos as seguintes proposições.

Sejam

x_1, x_2, \dots, x_r o conjunto das variáveis básicas.

Admitamos também que

y_1, y_2, \dots, y_p seja o conjunto de variáveis não repetidas, onde $r =$ posto ("rank") da matriz dimensional das variáveis pertinentes;

$p =$ número de grupos adimensionais independentes, cujo valor é igual a $(n - r)$, sendo n o número de variáveis pertinentes.

Designando-se a_1, a_2, \dots, a_r como expoentes das variáveis básicas x_1, x_2, \dots, x_r , respectivamente, pode-se escrever o conjunto de expressões genéricas para os grupos adimensionais da seguinte forma:

$$\Pi_1 = x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_r^{a_r} y_1$$

$$\Pi_2 = x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_r^{a_r} y_2$$

$$\Pi_p = x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_r^{a_r} y_p$$

De modo a evitar dificuldades ou um impasse completo na solução dessas equações, é essencial que estas r variáveis repetidas sejam incapazes de gerarem um grupo adimensional, sem o auxílio de uma variável adicional.

V.2 - APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL AO PROBLEMA FÍSICO.

V.2.1 - VARIÁVEIS PERTINENTES

A Tabela 01 apresenta as grandezas supostamente envolvidas no problema físico, juntamente com a simbologia adotada e as suas representações em termos das dimensões fundamentais M, L e T.

Tabela 01 - Grandezas físicas com símbolos e dimensões correspondentes.

GRANDEZA	SIMBOLO	DIMENSÕES
Comprimento da coluna	L	L
Diâmetro da coluna	D	L
Porcentagem de área livre	α	-
Número de discos	N	-
Aceleração da gravidade	g	$L T^{-2}$
Frequência de pulsação	f	T^{-1}
Amplitude de pulsação	A	L
Vazão vol. da fase contínua	Q_c	$L^3 T^{-1}$
Vazão vol. da fase dispersa	Q_d	$L^3 T^{-1}$
Massa específica da fase contínua	ρ_c	$M L^{-3}$
Massa específica da fase dispersa	ρ_d	$M L^{-3}$
Tensão interfacial	σ	$M T^{-2}$
Viscosidade da fase contínua	μ_c	$M L^{-1} T^{-1}$
Viscosidade da fase dispersa	μ_d	$M L^{-1} T^{-1}$
Fração volum. da fase dispersa	ϵ	-

V.2.2 - MATRIZ DIMENSIONAL DAS VARIÁVEIS

Com base na tabela anterior e utilizando-se o que foi descrito no item IV.1.2, obteve-se a seguinte matriz:

	L	D	α	N	g	f	A	Q_c	Q_d	ϵ	ρ_c	ρ_d	σ	μ_c	μ_d
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
L	1	1	0	0	1	0	1	3	3	0	-3	-3	0	-1	-1
T	0	0	0	0	-2	-1	0	-1	-1	0	0	0	-2	-1	-1

Os valores numéricos acima dispostos constituem a denominada matriz dimensional das variáveis pertinentes. Conforme já foi descrito, os mesmos representam os expoentes das dimensões primárias (M, L e T) para cada uma das variáveis listadas.

V.2.3 - OBTENÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS E DA CORRELAÇÃO EMPÍRICA

Antes de se determinar os grupamentos adimensionais é preciso conhecer o número de tais grupamentos necessário para a representação do problema. O cálculo desse número exige o conhecimento do posto da matriz do ítem anterior. Sem maiores dificuldades, pode-se obter uma matriz de ordem 3, com determinante não nulo, selecionando-se, por exemplo, as colunas correspondentes a ρ_c , σ e μ_c na matriz dimensional. Assim, o número de grupos adimensionais será dado por:

$$p = n - r \quad \text{ou} \quad p = 15 - 3 = 12$$

Na aplicação da técnica da análise dimensional a etapa de obtenção dos grupos é, sem dúvidas, a que determina o sucesso ou fracasso da correlação empírica obtida. A decisão mais importante é a seleção das variáveis básicas. A depender do conjunto escolhido, pode-se obter diferentes grupos e, conseqüentemente, correlações diferentes. Daqui por diante, o procedimento torna-se um tanto iterativo, pois não existe um critério exato na seleção das variáveis básicas que garanta o sucesso. Então, é preciso propor um dado conjunto de variáveis básicas, obter a correlação e testar sua validade, mediante o uso dos resultados experimentais. Após algumas tentativas vãs, chegou-se a uma correlação satisfatória.

Um artifício que mostrou-se necessário, face às tentativas com fracasso, foi a combinação de variáveis, originando novas

variáveis. Uma destas combinações surgiu em função da necessidade de se trabalhar com a velocidade de pulsação. Neste caso, interpretou-se esta nova variável em termos do produto $(A.f)$. A segunda combinação envolveu a diferença entre as massas específicas das fases, definida como $\Delta\rho$. Este procedimento é comum na literatura e não contraria o teorema Π de Buckingham, uma vez que são obtidas novas variáveis pertinentes e o posto da matriz dimensional não foi afetado por essas operações. Este artifício ocasionou um benefício adicional que foi a redução do número de grupos de 12 para 10.

As variáveis escolhidas como básicas foram as seguintes:

-Velocidade de pulsação $\Rightarrow (A.f)$

-Diferença entre as massas específicas das fases $\Rightarrow \Delta\rho$

-Vazão da fase dispersa $\Rightarrow Q_d$

Após a escolha das variáveis básicas, as demais grandezas excedentes foram:

$$L, D, \alpha, N, Q_c, \mu_c, \mu_d, \sigma, g \text{ e } \varepsilon$$

Combinando-se cada uma destas grandezas com as variáveis básicas, seguindo-se o procedimento já delineado, obtém-se as seguintes expressões para os grupos adimensionais:

$$\Pi_1 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} L \quad (54)$$

$$\Pi_2 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} D \quad (55)$$

$$\Pi_3 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} \alpha \quad (56)$$

$$\Pi_4 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} N \quad (57)$$

$$\Pi_5 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} Q_c \quad (58)$$

$$\Pi_6 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} \mu_c \quad (59)$$

$$\Pi_7 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} \mu_d \quad (60)$$

$$\Pi_8 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} \alpha \quad (61)$$

$$\Pi_9 = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} g \quad (62)$$

$$\Pi_{10} = (A.f)^{a_1} \Delta\rho^{a_2} Q_d^{a_3} \varepsilon \quad (63)$$

O restante do procedimento envolve o equacionamento de cada uma destas expressões em termos das dimensões primárias. O Apêndice C apresenta o detalhamento empregado na obtenção dos grupos adimensionais, a partir das Eqs. 54 a 63, e da correlação empírica resultante, cuja expressão genérica resultante é a seguinte:

$$\varepsilon = k_1^* \alpha^{k_2} N^{k_3} \left[\left(\frac{A.f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right]^{k_4} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right)^{k_5} Re^{k_6} We^{k_7} Fr^{k_8} \quad (64)$$

V.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CORRELAÇÃO

A determinação dos expoentes k_1^* , k_2 , ..., k_8 é um problema típico de otimização. Portanto, é necessário definir uma função objetivo e escolher um método numérico eficiente para solucionar o problema.

A função de mais larga aplicação em problemas de otimização é, sem dúvidas, a dos mínimos quadrados, cuja expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left[(\varepsilon_{exp})_i - (\varepsilon_{calc})_i \right]^2 \quad (65)$$

onde

$\left[\varepsilon_{\text{exp}} \right]_i$ = valores experimentais da fração de retenção da fase dispersa;

$\left[\varepsilon_{\text{calc}} \right]_i$ = valores da fração de retenção calculados com base na Eq. (64);

n = número de pontos experimentais.

O procedimento consiste na minimização da função objetivo definida pela Eq. (65). No entanto, a manipulação dessa equação, na sua forma original, é um tanto complicada, pois as variáveis estão na forma de expoentes. Um artifício permitido e bastante simplificador é a linearização da Eq (64), seguida da minimização de uma função objetivo modificada ψ , definida por:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln} \left[\varepsilon_{\text{exp}} \right]_i - \text{Ln} \left[\varepsilon_{\text{calc}} \right]_i \right]^2 \quad (66)$$

Note-se que, após a aplicação do logaritmo neperiano, a Eq. (64) assume a forma:

$$\begin{aligned} \text{Ln}(\varepsilon) = & \text{Ln}(k_1^*) + k_2 \text{Ln}(\alpha) + k_3 \text{Ln}(N) + k_4 \text{Ln} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right] + k_5 \text{Ln} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right) + \\ & + k_6 \text{Ln}(\text{Re}) + k_7 \text{Ln}(\text{We}) + k_8 \text{Ln}(\text{Fr}) \end{aligned} \quad (67)$$

Agora, as variáveis $\text{Ln}(k_1^*)$, k_2 , ..., k_8 apresentam-se na forma linear, já que os seus coeficientes são nada mais do que constantes, calculadas com base nos resultados de cada corrida experimental.

O passo seguinte envolve a aplicação da condição de mínimo à função ψ , de acordo com a teoria dos mínimos quadrados. Uma condição necessária é que as derivadas da função objetivo, em relação a cada variável, seja nula. O resultado deste procedimento forneceu o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \text{Ln}(k_1^*)} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}})_i = \sum_{i=1}^n \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}})_i \quad (68)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_2} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln}(\alpha) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\alpha) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (69)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_3} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln}(N) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(N) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (70)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_4} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right] \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right] \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (71)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_5} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (72)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_6} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln}(Re) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(Re) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (73)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_7} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln}(We) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(We) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (74)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial k_8} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(\varepsilon_{\text{calc}}) \cdot \text{Ln}(Fr) \right]_i = \sum_{i=1}^n \left[\text{Ln}(Fr) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\text{exp}}) \right]_i \quad (75)$$

Substituindo-se a expressão (67) em cada uma das equações do sistema, vê-se claramente que o mesmo é linear.

A resolução deste sistema de equações foi desenvolvida através do método de Gauss, utilizando-se um programa codificado na

linguagem TURBOPASCAL, o qual consta do Apêndice B do presente trabalho.

V.4 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CORRELAÇÃO.

Os resultados que constam do Apêndice A deste trabalho, juntamente com as observações apresentadas no Capítulo III, revelam que a fração de retenção da fase dispersa demonstrou ser muito mal comportada, dada as irregularidades existentes. Este mal comportamento refletiu na dificuldade de se obter uma equação que ajustasse os dados com pequenos desvios.

Após um estudo exaustivo da melhor maneira de correlacionar os resultados experimentais, constatou-se que a melhor alternativa encontrada para proceder o ajuste foi a divisão dos mesmos segundo a vazão da fase dispersa, pois observou-se que, para dadas faixas de valores dessa variável, havia uma certa regularidade no comportamento da retenção da fase dispersa. Dessa forma, os dados foram divididos em dois conjuntos: um deles constituído por todos os resultados experimentais obtidos para vazões da fase dispersa de 7,3 a 8,4 cm³/s, e um outro para as vazões de 10,8 a 14,2 cm³/s.

A mesma correlação genérica (Eq. 64) foi utilizada para ajustar os dois conjuntos de resultados anteriormente citados.

Para o conjunto de resultados experimentais correspondente à faixa inferior de vazões da fase dispersa foi obtida a seguinte correlação:

$$\varepsilon = 0,9987 \alpha^{-0,00268} N^{-0,00041} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right]^{-0,00148} We^{0,00607} Fr^{0,22942} \quad (76)$$

para $7,3 \leq Q_d \leq 8,4$ cm³/s.

Comparando-se a última equação com a correlação genérica

dada pela Eq. 64, nota-se que, na faixa de validade desta correlação, os grupos (Q_c/Q_d) e o número de Reynolds modificado tiveram uma influência desprezível. No entanto, o grupo que representa o número de Froude mostrou-se ser bastante influente, uma vez que o mesmo apresentou um expoente relativamente grande.

A Figura 30 faz uma comparação entre os valores da fração de retenção experimentais e os que foram calculados a partir da correlação empírica dada pela Eq. 76.

Pode-se notar que a grande maioria dos valores da fração de retenção foram menores do que 0,30, com um erro relativo médio de 39,7%.

Para as vazões da fase dispersa compreendidas entre 10,8 e 14,2 cm³/s, utilizando-se a a mesma fórmula genérica da correlação, chegou-se à seguinte expressão:

$$\epsilon = 0,9998 \alpha^{-0,00151} N^{-0,00066} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right]^{-0,00132} We^{0,05118} Fr^{0,17207} \quad (77)$$

para $10,8 \leq Q_d \leq 14,2 \text{ cm}^3/\text{s}$

Comparando-se a última equação com a do caso anterior, nota-se que, novamente, os grupos (Q_c/Q_d) e Re não influenciaram significativamente no cálculo da fração de retenção. Por outro lado, pode-se observar que ocorreu um ganho por parte do número de Weber modificado, em detrimento da queda sofrida pelo efeito do número de Froude modificado.

De modo análogo ao caso anterior, a Figura 31 faz uma comparação dos resultados experimentais da fração de retenção com os calculados a partir da Eq. 77.

Do exposto na Figura 31, nota-se que os pontos apresentaram-se melhor distribuídos em toda a faixa de valores da

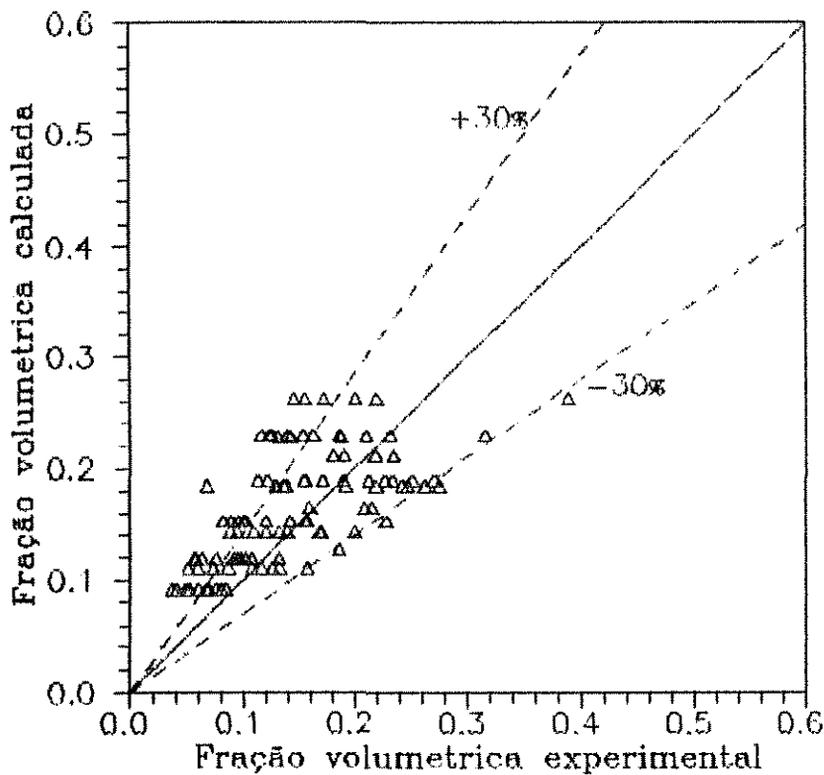


Figura 30 - Gráfico da retenção calculada x retenção experimental para $Q_d = 7.3 - 8.4 \text{ cm}^3/\text{s}$

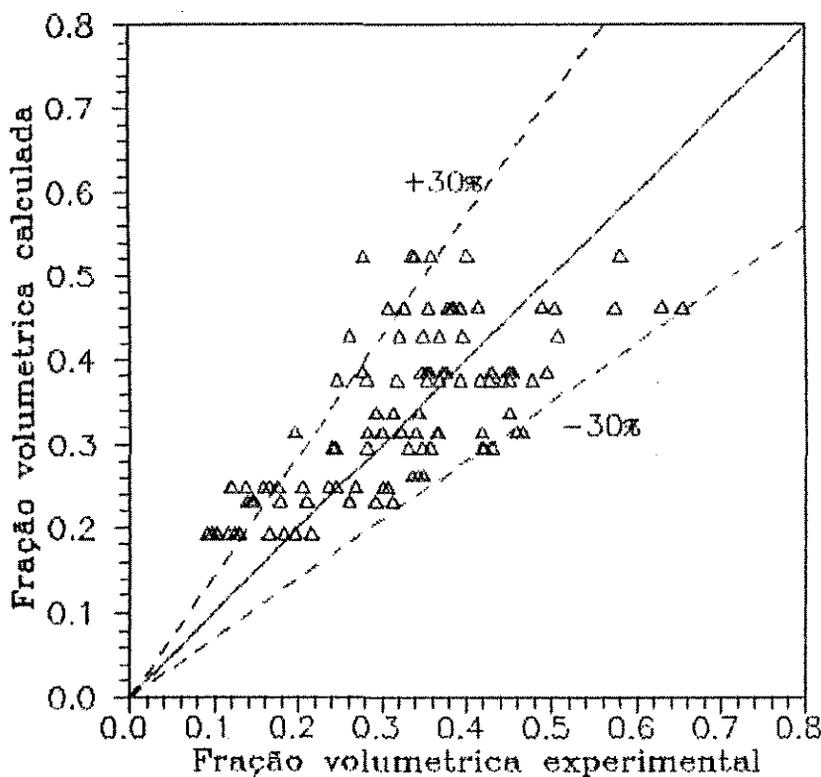


Figura 31 - Gráfico da retenção calculada x retenção experimental para $Q_d = 10.8 - 14.2 \text{ cm}^3/\text{s}$

fração de retenção. Além disso, nota-se que esta correlação é válida para uma faixa de valores mais ampla da fração de retenção, onde predominam valores deste parâmetro superiores a 0,30; ou seja, a correlação reproduz melhor os valores elevados da fração volumétrica da fase dispersa. Para efeito de comparação com o caso anterior é importante salientar que o erro relativo médio para esta última correlação foi de 28,1%.

V.5 - CONCLUSÕES

O mal comportamento da fração volumétrica da fase dispersa, conforme já citado no item anterior, mostrou-se ser um grande empecilho na obtenção das correlações empíricas capazes de predizerem o valor do referido parâmetro, a partir das condições experimentais. Daí a necessidade da divisão dos resultados em dois conjuntos, os quais forneceram duas equações distintas para a avaliação da fração de retenção da fase dispersa.

A primeira correlação, definida pela Eq. 76, apresentou um erro relativo médio maior do que o da segunda. Este comportamento é atribuído à grande irregularidade apresentada pelos resultados experimentais correspondentes à faixa de vazões da fase dispersa situada entre 7,3 e 8,4 cm^3/s . Já para a faixa de vazões de 10,8 a 14,2 cm^3/s , a correlação correspondente demonstrou ser mais fidedigna na predição do valor da retenção da fase dispersa.

Nas correlações obtidas nota-se a influência predominante dos grupos adimensionais que representam o número de Froude e o número de Weber modificados. Por outro lado, os demais grupamentos revelaram-se fracamente influentes no cálculo da retenção da fase dispersa.

Os resultados apresentados nos dois Capítulos antecedentes revelaram, de forma relativamente clara, as tendências da fração de retenção da fase dispersa, e proporcionaram uma série de observações, as quais encontram-se delineadas nos parágrafos seguintes.

Nas condições em que foram desenvolvidos os experimentos não foram constatadas mudanças no regime de operação, em discordância com alguns autores que seguiram a caracterização operacional proposta por Sege e Woodfield (1954). Estas mudanças no regime de operação são geralmente verificadas visualmente, o que conduz a um determinado grau de incerteza. É claro que foi possível constatar que, para baixas velocidades de pulsação, a fase dispersa apresentou-se na forma de uma dispersão mais grosseira do que no caso de velocidades de pulsação mais elevadas. Em algumas situações, observou-se uma ligeira turvação na coluna, dando indícios de que a operação estava sendo realizada em regime de emulsão.

A estratégia adotada para o estudo do comportamento da retenção da fase dispersa consistiu basicamente num estudo mais ou menos detalhado envolvendo a influência de cada variável experimental sobre o parâmetro de interesse, que é a própria retenção da fase dispersa, e na modelagem matemática do problema, via correlações empíricas.

Na primeira parte deste estudo chegou-se a uma série de observações importantes, as quais serão delineadas a seguir.

A fração volumétrica da fase dispersa foi bastante influenciada pelas condições de pulsação. Verificou-se que, mantendo-se fixas as demais condições operacionais, existia uma condição de agitação, além da qual, a capacidade de retenção do

equipamento decrescia, caso mais energia fosse fornecida à massa líquida na forma de pulsação. Este efeito foi mais pronunciado para combinações envolvendo a amplitude máxima (8 cm) e as frequências de 1,2 e 1,9 s⁻¹. A redução da fração de retenção foi associada ao arraste da fase dispersa, provavelmente devido à redução excessiva do tamanho das gotas. Esta observação está em concordância com os trabalhos de Chen e Liu (1991a) e Rama Rao et al (1991b). O fenômeno de arraste é mais comum em sistemas com baixa tensão interfacial, como é o caso do sistema n-butanol - água.

A retenção da fase dispersa demonstrou ser diretamente proporcional à vazão desta fase, em condições normais de operação, conforme se verificou em toda a faixa estudada.

Já a vazão da fase contínua favoreceu a redução da fração volumétrica da fase dispersa. Acredita-se que a combinação dos efeitos da excessiva pulsação com a velocidade de escoamento da fase contínua sejam os principais responsáveis pelo arraste da fase dispersa, o que é bastante coerente.

Quanto ao número de discos pulsantes, verificou-se que o aumento na sua quantidade contribuiu para o crescimento da retenção da fase dispersa. Este efeito é perfeitamente compreensível, dado que a efetividade de agitação tende a aumentar, favorecida pelo maior número de discos presente no interior da coluna.

Por outro lado, o aumento da área de escoamento nos discos contribuiu para a queda na capacidade de retenção da fase dispersa. Atribui-se este efeito ao aumento no diâmetro dos furos contidos nos discos, que proporcionou uma maior área livre de escoamento e, conseqüentemente, uma menor eficiência na quebra das gotas.

O estudo da velocidade relativa e da velocidade característica veio reforçar as evidências de que o arraste e a coalescência das gotas da fase dispersa afetaram a retenção. Foi

possível notar que a velocidade característica, a qual, para baixos valores da fração de retenção, aproxima-se da velocidade terminal de uma gota isolada, sofreu uma redução, à medida que a fração volumétrica da fase dispersa aumentou. Esta observação está de acordo com o exposto por Lo, Baird e Hanson (1983d).

A segunda parte deste estudo envolveu a modelagem matemática do problema através de correlações empíricas. A melhor maneira encontrada para correlacionar os dados experimentais foi estabelecendo-se faixas de validade das equações, em termos da vazão da fase dispersa. As correlações apresentadas poderão ser utilizadas para predições da fração volumétrica da fase dispersa, conhecendo-se as características operacionais correspondentes à situação desejada. Deve-se admitir que estudos desse tipo são úteis para o projeto e operação de equipamentos de extração, mais especificamente, para o de discos alternativos.

Como nenhum trabalho é completo por excelência, torna-se bastante válido sugerir algumas propostas que, quando desenvolvidas, possam ser somadas ao que foi fruto deste trabalho, proporcionando uma contribuição científica mais completa e abrangente. Assim, pode-se sugerir os seguintes tópicos:

-Estudar métodos que minimizem o efeito indesejável associado ao arraste da fase dispersa; por exemplo, procurando-se otimizar as condições de agitação;

-Expandir o que foi desenvolvido no presente trabalho a outros sistemas líquidos;

-Realizar experimentos adicionais que permitam uma melhor análise do efeito do número de discos e da área livre de escoamento nos mesmos;

-Desenvolver outros estudos hidrodinâmicos, tais como o consumo de energia, a dispersão longitudinal e o diâmetro das gotas,

envolvidos no processo de escoamento bifásico em colunas de discos pulsantes;

-Finalmente, torna-se necessário, também, um estudo envolvendo a transferência de massa nesses equipamentos.

A integração de todos os estudos mencionados irá possibilitar o projeto de unidades industriais, contribuindo verdadeiramente do ponto de vista tecnológico.

APÊNDICE A - RESUMO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS JUNTAMENTE COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

As condições em que foram realizadas as corridas experimentais serão apresentadas na forma de quadros, de modo que as variáveis operacionais que figuram nos cabeçalhos são válidas para todo o conjunto de resultados contido nos mesmos. Os campos que identificam as colunas obedecem à nomenclatura global adotada neste trabalho.

$N = 7$; $\alpha = 38\%$; $A = 6$ cm (intermediária)

f (s^{-1})	Q_c (cm^3/s)	Q_d (cm^3/s)	ϵ
0,4	3,8	7,3	0,073
	10,0	8,4	0,126
		14,2	0,178
	11,2	7,3	0,107
		14,2	0,210
0,7	3,8	7,3	0,139
	10,0	8,4	0,132
		14,2	0,243
	11,2	7,3	0,088
		14,2	0,420
1,2	3,8	7,3	0,138
	10,0	8,4	0,263
		14,2	0,442
	11,2	7,3	0,128
		14,2	0,393
1,9	3,8	7,3	0,142
	10,0	8,4	0,187
		14,2	0,377
	11,2	7,3	0,130
		14,2	0,382

f (s ⁻¹)	Q _c (cm ³ /s)	Q _d (cm ³ /s)	ϵ
0,4	3,8	7,3	0,051
		8,4	0,084
		10,8	0,124
		14,2	0,183
	10,0	7,3	0,051
		8,4	0,068
		10,8	0,096
		14,2	0,165
	11,2	7,3	0,048
		8,4	0,075
		10,8	0,091
		14,2	0,165
0,7	3,8	7,3	0,056
		8,4	0,091
		10,8	0,158
		14,2	0,268
	10,0	7,3	0,057
		8,4	0,101
		10,8	0,137
		14,2	0,237
	11,2	7,3	0,075
		8,4	0,107
		10,8	0,119
		14,2	0,176
1,2	3,8	7,3	0,082
		8,4	0,142
		10,8	0,299
		14,2	0,465
	10,0	7,3	0,102
		8,4	0,142
		10,8	0,195
		14,2	0,339
	11,2	7,3	0,101
		8,4	0,120
		10,8	0,364
		14,2	0,458
1,9	3,8	7,3	0,121
		8,4	0,213
		10,8	0,356
		14,2	0,371
	10,0	7,3	0,154
		8,4	0,227
		10,8	0,375
		14,2	0,493
	11,2	7,3	0,113
		8,4	0,252
		10,8	0,276
		14,2	0,429

$f \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$Q_c \text{ (cm}^3\text{/s)}$	$Q_d \text{ (cm}^3\text{/s)}$	ϵ
0,4	3,8	7,3	0,157
		8,4	0,132
		10,8	0,144
		14,2	0,292
	10,0	7,3	0,050
		8,4	0,116
		10,8	0,139
		14,2	0,261
	11,2	7,3	0,059
		8,4	0,086
		10,8	0,146
		14,2	0,312
0,7	3,8	7,3	0,109
		8,4	0,200
		10,8	0,240
		14,2	0,356
	10,0	7,3	0,120
		8,4	0,168
		10,8	0,240
		14,2	0,329
	11,2	7,3	0,094
		8,4	0,170
		10,8	0,281
		14,2	0,347
1,2	3,8	7,3	0,219
		8,4	0,243
		10,8	0,352
		14,2	0,584
	10,0	7,3	0,192
		8,4	0,263
		10,8	0,427
		14,2	0,415
	11,2	7,3	0,136
		8,4	0,247
		10,8	0,281
		14,2	0,476
1,9	3,8	7,3	0,186
		8,4	0,231
		10,8	0,354
		14,2	0,628
	10,0	7,3	0,124
		8,4	0,210
		10,8	0,306
		14,2	0,413
	11,2	7,3	0,122
		8,4	0,316
		10,8	0,378
		14,2	0,488

$f \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$Q_c \text{ (cm}^3\text{/s)}$	$Q_d \text{ (cm}^3\text{/s)}$	ε	
0,4	3,8	7,3	0,060	
		8,4	0,142	
		10,8	0,116	
		14,2	0,216	
	10,0	10,0	7,3	0,040
			8,4	0,080
			10,8	0,102
			14,2	0,129
	11,2	11,2	7,3	0,036
			8,4	0,067
			10,8	0,092
			14,2	0,196
0,7	3,8	7,3	0,101	
		8,4	0,097	
		10,8	0,205	
		14,2	0,301	
	10,0	10,0	7,3	0,091
			8,4	0,131
			10,8	0,165
			14,2	0,246
	11,2	11,2	7,3	0,062
			8,4	0,094
			10,8	0,120
			14,2	0,306
1,2	3,8	7,3	0,089	
		8,4	0,228	
		10,8	0,321	
		14,2	0,417	
	10,0	10,0	7,3	0,095
			8,4	0,157
			10,8	0,298
			14,2	0,339
	11,2	11,2	7,3	0,100
			8,4	0,156
			10,8	0,282
			14,2	0,366
1,9	3,8	7,3	0,271	
		8,4	0,287	
		10,8	0,353	
		14,2	0,453	
	10,0	10,0	7,3	0,171
			8,4	0,190
			10,8	0,372
			14,2	0,581
	11,2	11,2	7,3	0,155
			8,4	0,234
			10,8	0,346
			14,2	0,449

$f \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$Q_c \text{ (cm}^3\text{/s)}$	$Q_d \text{ (cm}^3\text{/s)}$	ε	
0,4	3,8	7,3	0,224	
		8,4	0,214	
		10,0	0,362	
		14,2	0,444	
	10,0	10,0	7,3	0,226
			8,4	0,373
			10,0	0,405
			14,2	0,486
	11,2	11,2	7,3	0,287
			8,4	0,218
			10,0	0,452
			14,2	0,483
0,7	3,8	7,3	0,378	
		8,4	0,467	
		10,0	0,429	
		14,2	0,571	
	10,0	10,0	7,3	0,315
			8,4	0,216
			10,0	0,462
			14,2	0,618
	11,2	11,2	7,3	0,239
			8,4	0,229
			10,0	0,417
			14,2	0,610
1,2	3,8	7,3	0,344	
		8,4	0,490	
		10,0	0,612	
		14,2	0,727	
	10,0	10,0	7,3	0,286
			8,4	0,300
			10,0	0,317
			14,2	0,450
	11,2	11,2	7,3	0,067
			8,4	0,276
			10,0	0,246
			14,2	0,368
1,9	3,8	7,3	0,413	
		8,4	0,444	
		10,0	0,573	
		14,2	0,653	
	10,0	10,0	7,3	0,153
			8,4	0,139
			10,0	0,384
			14,2	0,503
	11,2	11,2	7,3	0,115
			8,4	0,162
			10,0	0,325
			14,2	0,393

$f \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$Q_c \text{ (cm}^3\text{/s)}$	$Q_d \text{ (cm}^3\text{/s)}$	ϵ
0,4	3,8	7,3	0,257
		8,4	0,253
		10,8	0,335
		14,2	0,535
	10,0	7,3	0,228
		8,4	0,256
		10,8	0,349
		14,2	0,417
	11,2	7,3	0,220
		8,4	0,186
		10,8	0,342
		14,2	0,342
0,7	3,8	7,3	0,216
		8,4	0,309
		10,8	0,312
		14,2	0,510
	10,0	7,3	0,159
		8,4	0,314
		10,8	0,343
		14,2	0,539
	11,2	7,3	0,209
		8,4	0,247
		10,8	0,292
		14,2	0,450
1,2	3,8	7,3	0,218
		8,4	0,325
		10,8	0,261
		14,2	0,368
	10,0	7,3	0,180
		8,4	0,394
		10,8	0,348
		14,2	0,506
	11,2	7,3	0,190
		8,4	0,234
		10,8	0,320
		14,2	0,395
1,9	3,8	7,3	0,219
		8,4	0,389
		10,8	0,358
		14,2	0,580
	10,0	7,3	0,154
		8,4	0,200
		10,8	0,339
		14,2	0,401
	11,2	7,3	0,144
		8,4	0,171
		10,8	0,278
		14,2	0,335

APÊNDICE B - LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

```

PROGRAM CORREL;
{ PROGRAMA PARA RESOLVER UM SISTEMA DE EQUACOES LINEARES PELO
  METODO DE GAUSS, CALCULANDO OS PARAMETROS DE UMA CORRELACAO
  EMPIRICA E DETERMINANDO O COEFICIENTE DE CORRELACAO E O
  ERRO RELATIVO MEDIO. }
{ FORMA GERAL DA CORRELACAO :
  e = a*(ALFA)^b*N^c*[(A*f/Qd)^0.5*1]^d*
      (Qc/Qd)^e*Re^f*We^g*Fr^h }
USES CRT, PRINTER;
TYPE
  REGISTRO = RECORD HDP : REAL;      { holdup          }
                  ALF : REAL;      { fr. de area livre }
                  N  : SHORTINT;   { no. de discos     }
                  A  : SHORTINT;   { amplitude         }
                  f  : REAL;       { frequencia        }
                  Qc : REAL;       { vazao de agua     }
                  Qd : REAL;       { vazao de butanol  }
  END;
  ARQUIVO = FILE OF REGISTRO;
  VETOR   = ARRAY[1..8] OF DOUBLE;
  MATRIZ  = ARRAY[1..8,1..9] OF DOUBLE;
  CONST
    l = 97.0;      { comprimento da coluna (cm)          }
    D = 5.5;      { diametro da coluna (cm)            }
    ROc = 0.997;  { massa esp. da fase continua (cm^3/s) }
    ROd = 0.803;  { massa esp. da fase dispersa (cm^3/s) }
    MIc = 0.009;  { visc. da fase continua (Poise)      }
    MId = 0.0261; { visc. da fase dispersa (Poise)     }
    SIGMA = 1.9;  { tensao interfacial (dinas/cm)       }
    g = 981.0;    { aceleracao da gravidade (cm/s^2)    }
    N = 8;        { numero de parametros da correlacao }
    NS = 1;       { referente ao vetor coluna independente }
    fRe = (ROc - ROd)*l/MIc; { multiplicador do Re }
    fWe = (ROc - ROd)*l/SIGMA; { multiplicador do We }
  VAR
    REG : REGISTRO;
    DADOS : ARQUIVO;
    I, J : INTEGER;
    SX, SY, ERRO, SXY, SX2, SY2, Er, ErPARC, EPSe,
    EPSc, T1, T2, T3, T4, CC, AUX1, AUX2, MORERRO,
    MINERRO, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 : REAL;
    B : VETOR;
    M : MATRIZ;
    ND4, ND7 : TEXT;
    NOMEARQ : STRING[11];
  { AREA DE DEFINICAO DAS SUBROTINAS }
  FUNCTION L4(R : REGISTRO): DOUBLE;
  { calculo do grupo : [(A*f/Qd)^0.5*1] }
  BEGIN
    L4:= LN(1*SQRT(R.A*R.f/R.Qd));

```

```

END;
FUNCTION L6(R : REGISTRO) : DOUBLE;
{ calculo do numero de Reynolds      }
BEGIN
  L6:= LN(fRe*R.A*R.f);
END;
FUNCTION L7(R : REGISTRO) : DOUBLE;
{ calculo do numero de Weber        }
BEGIN
  L7:= LN(fWe*SQR(R.A*R.f));
END;
FUNCTION L8(R : REGISTRO) : DOUBLE;
{ calculo do numero de Froude       }
BEGIN
  L8:= LN(SQR(R.A*R.f)/(1*g));
END;
{ METODO DA ELIMINACAO DE GAUSS }
PROCEDURE GAUSS(N, NS: INTEGER; VAR A: MATRIZ);
VAR
N1, NT, IP, J, K, I1      : INTEGER;
X                          : EXTENDED;
BEGIN
  N1:= N + 1;
  NT:= N + NS;
  IF N <> 1 THEN
  BEGIN
    FOR I:= 2 TO N DO
    BEGIN
      IP:= I - 1;
      I1:= IP;
      X:= ABS(A[I1,I1]);
      FOR J:= 1 TO N DO
      BEGIN
        IF ABS(A[J,I1]) >= X THEN
        BEGIN
          X:= ABS(A[J,I1]);
          IP:= J;
        END;
      END;
    END;
    IF IP <> I1 THEN
    BEGIN
      FOR J:= I1 TO NT DO
      BEGIN
        X:= A[I1,J];
        A[I1,J]:= A[IP,J];
        A[IP,J]:= X;
      END;
    END;
    FOR J:= I TO N DO
    BEGIN
      X:= A[J,I1]/A[I1,I1];
      FOR K:= 1 TO NT DO
        A[J,K]:= A[J,K] - X*A[I1,K];
      END;
    END;
  END;

```

```

        END;
    END;
END;
FOR IP:= 1 TO N DO
BEGIN
    I:= N1 - IP;
    FOR K:= N1 TO NT DO
    BEGIN
        A[I,K]:= A[I,K]/A[I,I];
        IF I <> 1 THEN
        BEGIN
            I1:= I - 1;
            FOR J:= 1 TO I1 DO
                A[J,K]:= A[J,K] - A[I,K]*A[J,I];
            END;
        END;
    END;
END;
END;
END;
{ FIM DA DEFINICAO DAS SUBROTINAS }
{ INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL }
BEGIN
    CLRSCR;
    WRITELN;    WRITELN;
    WRITE(' ':10,'ARQUIVO DE DADOS : ');
    READLN(NOMEARQ);
    ASSIGN(DADOS,NOMEARQ);
    IF NOMEARQ = 'BUTAN35.DAT' THEN
    BEGIN
        ASSIGN(ND4,'PEQVAZN4.DAT');
        REWRITE(ND4);
        ASSIGN(ND7,'PEQVAZN7.DAT');
        REWRITE(ND7);
    END
    ELSE
    BEGIN
        ASSIGN(ND4,'GRAVAZN4.DAT');
        REWRITE(ND4);
        ASSIGN(ND7,'GRAVAZN7.DAT');
        REWRITE(ND7);
    END;
    RESET(DADOS);
    FOR I:= 1 TO N DO
        FOR J:= 1 TO (N + 1) DO
            BEGIN
                M[I,J]:= 0.0;
                B[I]:= 0.0;
            END;
        [ CALCULO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ ]
    M[1,1]:= FILESIZE(DADOS);
    REPEAT
    BEGIN
        READ(DADOS,REG);
        M[1,2]:= M[1,2] + LN(REG.ALF);

```

```

M[1, 3] := M[1, 3] + LN(REG.N);
M[1, 4] := M[1, 4] + L4(REG);
M[1, 5] := M[1, 5] + LN(REG.Qc/REG.Qd);
M[1, 6] := M[1, 6] + L6(REG);
M[1, 7] := M[1, 7] + L7(REG);
M[1, 8] := M[1, 8] + L8(REG);
      B[1] := B[1] + LN(REG.HDP);
M[2, 2] := M[2, 2] + LN(REG.ALF)*LN(REG.ALF);
M[2, 3] := M[2, 3] + LN(REG.ALF)*LN(REG.N);
M[2, 4] := M[2, 4] + LN(REG.ALF)*L4(REG);
M[2, 5] := M[2, 5] + LN(REG.ALF)*LN(REG.Qc/REG.Qd);
M[2, 6] := M[2, 6] + LN(REG.ALF)*L6(REG);
M[2, 7] := M[2, 7] + LN(REG.ALF)*L7(REG);
M[2, 8] := M[2, 8] + LN(REG.ALF)*L8(REG);
      B[2] := B[2] + LN(REG.ALF)*LN(REG.HDP);
M[3, 3] := M[3, 3] + LN(REG.N)*LN(REG.N);
M[3, 4] := M[3, 4] + LN(REG.N)*L4(REG);
M[3, 5] := M[3, 5] + LN(REG.N)*LN(REG.Qc/REG.Qd);
M[3, 6] := M[3, 6] + LN(REG.N)*L6(REG);
M[3, 7] := M[3, 7] + LN(REG.N)*L7(REG);
M[3, 8] := M[3, 8] + LN(REG.N)*L8(REG);
      B[3] := B[3] + LN(REG.N)*LN(REG.HDP);
M[4, 4] := M[4, 4] + SQR(L4(REG));
M[4, 5] := M[4, 5] + L4(REG)*LN(REG.Qc/REG.Qd);
M[4, 6] := M[4, 6] + L4(REG)*L6(REG);
M[4, 7] := M[4, 7] + L4(REG)*L7(REG);
M[4, 8] := M[4, 8] + L4(REG)*L8(REG);
      B[4] := B[4] + L4(REG)*LN(REG.HDP);
M[5, 5] := M[5, 5] + LN(REG.Qc/REG.Qd)*LN(REG.Qc/REG.Qd);
M[5, 6] := M[5, 6] + LN(REG.Qc/REG.Qd)*L6(REG);
M[5, 7] := M[5, 7] + LN(REG.Qc/REG.Qd)*L7(REG);
M[5, 8] := M[5, 8] + LN(REG.Qc/REG.Qd)*L8(REG);
      B[5] := B[5] + LN(REG.Qc/REG.Qd)*LN(REG.HDP);
M[6, 6] := M[6, 6] + SQR(L6(REG));
M[6, 7] := M[6, 7] + L6(REG)*L7(REG);
M[6, 8] := M[6, 8] + L6(REG)*L8(REG);
      B[6] := B[6] + L6(REG)*LN(REG.HDP);
M[7, 7] := M[7, 7] + SQR(L7(REG));
M[7, 8] := M[7, 8] + L7(REG)*L8(REG);
      B[7] := B[7] + L7(REG)*LN(REG.HDP);
M[8, 8] := M[8, 8] + SQR(L8(REG));
      B[8] := B[8] + L8(REG)*LN(REG.HDP);
END;
UNTIL EOF(DADOS);
CLOSE(DADOS);
FOR I:= 1 TO N DO
BEGIN
  FOR J:= I TO N DO
    M[J, I] := M[I, J];
  M[I, (N + 1)] := B[I];
END;
GAUSS(N, NS, M);
{ IMPRESSAO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA }

```

```

CLRSCR;
WRITELN;  WRITELN;
WRITELN(' ':20, 'PARAMETROS DA CORRELACAO ');
WRITELN;  WRITELN;
WRITE(' ':27, 'a = ');      WRITELN(EXP(M[1, (N + 1)]):7:5);
WRITE(' ':27, 'b = ');      WRITELN(M[2, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'c = ');      WRITELN(M[3, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'd = ');      WRITELN(M[4, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'e = ');      WRITELN(M[5, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'f = ');      WRITELN(M[6, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'g = ');      WRITELN(M[7, (N + 1)]:7:5);
WRITE(' ':27, 'h = ');      WRITELN(M[8, (N + 1)]:7:5);
{ CALCULOS ESTATISTICOS }
SX:= 0;  SY:= 0;  SXY:= 0;  SX2:= 0;  SY2:= 0;  ErPARC:= 0;
RESET(DADOS);
MORERRO:= 0;  MINERRO:= 1E6;
REPEAT
BEGIN
  READ(DADOS, REG);
  T1:= EXP(M[1, (N+1)] + M[2, (N+1)]*LN(REG.ALF) +
          M[3, (N+1)]*LN(REG.N));
  T2:= EXP(M[4, (N+1)]*L4(REG) +
          M[5, (N+1)]*LN(REG.Qc/REG.Qd));
  T3:= EXP(M[6, (N+1)]*L6(REG) + M[7, (N+1)]*L7(REG));
  T4:= EXP(M[8, (N+1)]*L8(REG));
  EPSc:= T1*T2*T3*T4;
  G1:= LN(REG.ALF);      G2:= LN(REG.N);      G3:= L4(REG);
  G4:= LN(REG.Qc/REG.Qd);  G5:= L6(REG);      G6:= L7(REG);
  G7:= L8(REG);
  SX:= SX + REG.HDP;      SY:= SY + EPSc;
  SXY:= SXY + REG.HDP*EPSc;  SX2:= SX2 + SQR(REG.HDP);
  SY2:= SY2 + SQR(EPSc);
  ERRO:= (EPSc - REG.HDP)/REG.HDP;
  IF ERRO > MORERRO THEN
    MORERRO:= ERRO
  ELSE
    IF ERRO < MINERRO THEN
      MINERRO:= ERRO;
  ErPARC:= ErPARC + ABS(ERRO);
  IF (REG.N = 4) THEN
    WRITELN(ND4, REG.HDP:5:3, ' ':2, EPSc:5:3, ' ':2,
            ERRO:6:2, ' ':2, G1:6:4, ' ':2, G2:6:4, ' ':2,
            G3:6:4, ' ':2, G4:6:4, ' ':2, G5:6:4, ' ':2,
            G6:6:4, ' ':2, G7:6:4)
  ELSE
    WRITELN(ND7, REG.HDP:5:3, ' ':2, EPSc:5:3, ' ':2,
            ERRO:6:2, ' ':2, G1:6:4, ' ':2, G2:6:4, ' ':2,
            G3:6:4, ' ':2, G4:6:4, ' ':2, G5:6:4, ' ':2,
            G6:6:4, ' ':2, G7:6:4);
END;
UNTIL EOF(DADOS);
{ CALCULO DO COEFICIENTE DE CORRELACAO }
AUX1:= SXY - SX*SY/FILESIZE(DADOS);

```

```

AUX2:= (SX2 - SQR(SX)/FILESIZE(DADOS))*
        (SY2 - SQR(SY)/FILESIZE(DADOS));
CC:= AUX1/SQRT(AUX2);
{ CALCULO DO ERRO RELATIVO MEDIO }
Er:= 100*ErPARC/FILESIZE(DADOS);
CLOSE(DADOS);      CLOSE(ND4);      CLOSE(ND7);
WRITELN;      WRITELN;
WRITELN(' ':20,'Coef. de Correlacao = ',CC:6:4);
WRITELN;
WRITELN(' ':20,'Erro Relativo Medio = ',Er:5:2,' ','%');
WRITELN;
WRITELN(' ':20,'Maior Erro Relativo = ',
        MORERRO*100:5:2,' ','%');
WRITELN;
WRITELN(' ':20,'Menor Erro Relativo = ',
        MINERRO*100:5:2,' ','%');
REPEAT UNTIL KEYPRESSED;
END.

```

APÊNDICE C - DETALHES ENVOLVIDOS NA OBTENÇÃO DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS E DA CORRELAÇÃO EMPÍRICA.

No ítem V.2.3 foram estabelecidas as variáveis básicas e as expressões genéricas dos grupos adimensionais. Partindo-se dessas expressões e aplicando-se os critérios de adimensionalização, serão obtidas as expressões particularizadas para os referidos grupos.

-Determinação de π_1 (Eq. 54):

$$\pi_1 = \left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot L$$

O primeiro passo na obtenção de um número adimensional é escrever as grandezas em termos das dimensões primárias, neste caso, M, L e T. Partindo-se do princípio que os π 's são adimensionais, deve-se expressá-los em termos das dimensões fundamentais, da seguinte forma:

$$\pi = M^0 L^0 T^0$$

Aplicando-se a condição acima delineada à expressão de π_1 , tem-se:

$$M^0 L^0 T^0 = \left[L T^{-1} \right]^{a_1} \left[M L^{-3} \right]^{a_2} \left[L^3 T^{-1} \right]^{a_3} L$$

O passo seguinte consiste no equacionamento dos expoentes das dimensões fundamentais, obtendo-se o seguinte sistema de equações:

$$M : a_2 = 0$$

$$L : a_1 - 3a_2 + 3a_3 + 1 = 0$$

$$T : -a_1 - a_3 = 0$$

cuja solução é a seguinte:

$$a_1 = \frac{1}{2} ; \quad a_2 = 0 ; \quad a_3 = -\frac{1}{2}$$

Agora, substituindo-se os valores de a_1 , a_2 e a_3 na expressão original de π_1 , tem-se:

$$\pi_1 = \left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \quad (c.1)$$

O mesmo procedimento será aplicado aos demais grupos,

dispensando comentários.

-Determinação de π_2 (Eq. 55):

$$\pi_2 = \left[A \cdot f \right]^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot D$$

Já que a dimensão de D é também a de um comprimento, de modo análogo ao anterior, deduz-se facilmente que

$$\pi_2 = \left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} D \quad (c.2)$$

-Determinação de π_3 (Eq. 56):

$$\pi_3 = \left[A \cdot f \right]^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot \alpha$$

Como α é adimensional e as variáveis básicas são incapazes de gerarem um grupo adimensional, o sistema admite apenas a solução trivial, resultando:

$$\pi_3 = \alpha \quad (c.3)$$

-Determinação de π_4 (Eq. 57):

$$\pi_4 = \left[A \cdot f \right]^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot N$$

De modo análogo ao caso anterior deduz-se que

$$\pi_4 = N \quad (c.4)$$

-Determinação de π_5 (Eq. 58):

$$\pi_5 = \left[A \cdot f \right]^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot Q_c$$

Em termos de M, L e T, tem-se

$$M^0 L^0 T^0 = \left[L T^{-1} \right]^{a_1} \left[M L^{-3} \right]^{a_2} \left[L^3 T^{-1} \right]^{a_3} L^3 T^{-1}$$

$$M : a_2 = 0$$

$$L : a_1 - 3a_2 + 3a_3 + 3 = 0$$

$$T : -a_1 - a_3 - 1 = 0$$

O sistema acima admite como solução:

$$a_1 = 0 ; \quad a_2 = 0 ; \quad a_3 = -1$$

resultando

$$\pi_5 = \frac{Q_c}{Q_d} \quad (c.5)$$

-Determinação de π_6 (Eq. 59):

$$\pi_6 = (A.f)^{a_1} \cdot \Delta\rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot \mu_c$$

Em termos de M, L e T, tem-se

$$M^0 L^0 T^0 = \left[L T^{-1} \right]^{a_1} \left[M L^{-3} \right]^{a_2} \left[L^3 T^{-1} \right]^{a_3} M L^{-1} T^{-1}$$

$$M : a_2 + 1 = 0$$

$$L : a_1 - 3a_2 + 3a_3 - 1 = 0$$

$$T : -a_1 - a_3 - 1 = 0$$

cuja solução é a seguinte.

$$a_1 = -\frac{1}{2} ; \quad a_2 = -1 ; \quad a_3 = -\frac{1}{2}$$

resultando

$$\pi_6 = \frac{\mu_c}{\Delta\rho \left(A.f.Q_d \right)^{1/2}} \quad (c.6)$$

-Determinação de π_7 (Eq. 60):

$$\pi_7 = (A.f)^{a_1} \cdot \Delta\rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot \mu_d$$

Procedendo-se de maneira análoga à anterior, encontra-se que

$$\pi_7 = \frac{\mu_d}{\Delta\rho \left(A.f.Q_d \right)^{1/2}} \quad (c.7)$$

-Determinação de π_8 (Eq. 61):

$$\pi_8 = (A.f)^{a_1} \cdot \Delta\rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot g$$

Em termos de M, L e T tem-se:

$$M^0 L^0 T^0 = \left[L T^{-1} \right]^{a_1} \left[M L^{-3} \right]^{a_2} \left[L^3 T^{-1} \right]^{a_3} M T^{-2}$$

$$M : a_2 + 1 = 0$$

$$L : a_1 - 3a_2 + 3a_3 = 0$$

$$\Gamma : -a_1 - a_3 - 2 = 0$$

fornecendo

$$a_1 = -\frac{3}{2} ; \quad a_2 = -1 ; \quad a_3 = -\frac{1}{2}$$

resultando em

$$\pi_{\theta} = \frac{\sigma}{\Delta \rho (A.f)^{3/2} Q_d^{1/2}} \quad (c.8)$$

-Determinação de π_{ϕ} (Eq. 62):

$$\pi_{\phi} = (A.f)^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot g$$

Em termos de M, L e T tem-se

$$M^{\circ} L^{\circ} T^{\circ} = (L T^{-1})^{a_1} (M L^{-3})^{a_2} (L^3 T^{-1})^{a_3} L T^{-2}$$

$$M : a_2 = 0$$

$$L : a_1 - 3a_2 + 3a_3 + 1 = 0$$

$$\Gamma : -a_1 - a_3 - 2 = 0$$

A solução deste sistema é a seguinte:

$$a_1 = -\frac{5}{2} ; \quad a_2 = 0 ; \quad a_3 = \frac{1}{2}$$

Dai

$$\pi_{\phi} = \frac{g \cdot Q_d^{1/2}}{(A.f)^{5/2}} \quad (c.9)$$

-Determinação de π_{10} (Eq. 63):

$$\pi_{10} = (A.f)^{a_1} \cdot \Delta \rho^{a_2} \cdot Q_d^{a_3} \cdot \epsilon$$

Como ϵ é adimensional e as variáveis da base não produzem um número adimensional, a solução do sistema é a trivial. Assim

$$\pi_{10} = \epsilon \quad (c.10)$$

Dada a semelhança existente entre alguns grupos, é

conveniente fazer-se manipulações entre os mesmos, visando-se chegar a números adimensionais conhecidos. Assim, dividindo-se π_7 por π_6 , obtém-se

$$\pi_7^* = \frac{\mu_d}{\mu_c} \quad (c.11)$$

A partir de π_1 e π_2 pode-se estabelecer que

$$\pi_2^* = \frac{\pi_2}{\pi_1} \Rightarrow \pi_2^* = \frac{D}{L} \quad (c.12)$$

Operando-se com π_9 e π_1 chega-se a

$$\pi_9^* = \frac{(A.f)^2}{g.L} \equiv Fr \quad (c.13)$$

O grupo π_9^* representa o número de Froude de pulsação, o qual está ligado à relação entre as forças inerciais e a força da gravidade.

De π_1 e π_6 chega-se a

$$\pi_6^* = \frac{\Delta\rho.(A.f).L}{\mu_c} \equiv Re \quad (c.14)$$

Este grupo representa o número de Reynolds modificado, o qual relaciona as forças inerciais com as forças viscosas.

Finalmente, de π_1 e π_8 pode-se deduzir que

$$\pi_8^* = \frac{(A.f)^2 \Delta\rho.L}{\sigma} \equiv We \quad (c.15)$$

O último grupo adimensional representa o número de Weber de pulsação, cujo significado físico envolve uma relação entre as forças inerciais e aquelas ligadas à tensão interfacial do sistema.

Levando-se em conta os grupos adimensionais modificados e expressando-se o parâmetro dependente ε , representado por π_{10} , como uma função dos demais grupos, na forma de um produto de potências

dos mesmos, chega-se à seguinte correlação genérica:

$$\varepsilon = k_1 \alpha^{k_2} N^{k_3} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q_d} \right)^{1/2} L \right]^{k_4} \left(\frac{D}{L} \right)^{k_5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{k_6} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right)^{k_7} \text{Re}^{k_8} \text{Fr}^{k_9} \text{We}^{k_{10}} \quad (\text{c.16})$$

onde

k_1, k_2, \dots, k_{10} são parâmetros a determinar, com base nos resultados experimentais.

A Eq. (c.16) representa a fórmula geral da correlação obtida, seguindo-se as condições já delineadas. No caso especial desse trabalho, as grandezas geométricas L e D , bem como as propriedades físicas da sistema foram mantidas constantes. Assim, os grupos (D/L) e (μ_d/μ_c) podem ser associados à constante k_1 , resultando:

$$\varepsilon = k_1^* \alpha^{k_2} N^{k_3} \left[\left(\frac{A \cdot f}{Q} \right)^{1/2} L \right]^{k_4} \left(\frac{Q_c}{Q_d} \right)^{k_5} \text{Re}^{k_6} \text{Fr}^{k_7} \text{We}^{k_8} \quad (\text{c.17})$$

Esta é, portanto, a equação de modelagem para avaliar a fração volumétrica da fase dispersa no fenômeno de escoamento bifásico, sujeito à agitação, estabelecido no interior do equipamento utilizado nas investigações experimentais inerentes a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daird, M. H. I. e Lane, S. J. Drop Size and Holdup in a Reciprocating Plate Extraction Column. Chem. Eng. Sci., 28 : 947-957 ; 1973.
- Baird, M. H. I. e Shen, Z. J. Holdup and Flooding in Reciprocating Plate Extraction Column. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 62: 218 - 227; 1984.
- Bell, R. e Babb, A. Holdup and Axial Distribution in a Pulsed Sieve-Plate Extraction Column. I & EC Process Des. and Development, 8(3) : 392-400 ; 1969.
- Berger, R. e Walter, K. Flooding in Pulsed Sieve Plate Extractors. Chem. Eng. Sci., 40(12) : 2175-2184 ; 1985.
- Chen, B. H. e Liu, C. H. Liquid-Liquid Extraction in a Reciprocating Screen Plate Column. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 69: 300 - 307; 1991a.
- Edwards, R. B. e Beyer, G. H. Flooding Characteristics of a Pulse Extraction Column. AIChE Journal, 2(2) : 148-152 ; 1956.
- Godfrey, J. C. e Hanson, C. Handbook of Multiphase Systems, Seção 4, McGraw-Hill, 1982.
- Hanson, C. Recent Advances in Liquid-liquid Extraction, Pergamon Press ,New York ; 1971.

Heyberger, A., Sovová, H. e Prochazka, J. Hold-up and Flooding in a Vibrating Plate Extractor. Collection Czechoslovak Chem. Commun., 48: 989-1000; 1983a.

Ikeda, H. e Kiyose, R. Effects of Operating Condition on Axial Holdup for Pulsed Sieve-Plate Solvent Extraction Column. Journal of Nuclear Sci. and Technology, 20(1) : 84-86 ; 1983b.

Karr, A. E. Design, Scale-up and Applications of the Reciprocating Plate Extraction Column. Separation Sci. and Technology, 15(4) : 877-905 ; 1980a.

Kumar, A. E. e Hartland, S. Correlations for Dispersed Phase Holdup in Pulsed Sieve-Plate Liquid-liquid Extraction Columns. Chem Eng. Res. Des., 61 : 248-252 ; 1983c.

Kumar, A. E. e Hartland, S. Prediction of Dispersed Phase Hold-up in Pulsed Perforated-Plate Extraction Columns. Chem. Eng. Process., 23: 41 - 59; 1988a.

Kumar, A. E. e Hartland, S. Independent Prediction of Slip Velocity and Hold-up in Liquid-Liquid Extraction Columns. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 67: 17 - 25; 1989.

Lo, T. C., Baird, M. H. I. e Hanson, C. Handbook of Solvent Extraction. John Wiley & Sons, New York; 1983d.

McAllister, R. A., Gronier, W. S. e Ryon, A. D. Correlation of Flooding in Pulsed Perforated-Plate Extraction Columns. Chem. Eng. Sci., 22 : 931-944; 1967.

Miyanami, K., Tojo, K., Yano, T., Miyajy, K. e Minami, I. Drop Size Distribution and Holdups in a Multistage Vibrating Disk Column. Chem. Eng. Sci. 30 : 1415-1420; 1975.

Miyauchi, T. e Oya, H. Longitudinal Dispersion in Pulsed Perforated Plate Columns. AIChE Journal, 11 (3): 395-402; 1965.

Rama Rao, N. V. , Srinivas, N. S. e Varma, Y. B. G. Dispersed Phase Holdup and Drop Size Distributions in Reciprocating Plates Columns. The Canadian Journal of Chem. Eng., 61 : 168-177; 1983e.

Rama Rao, N. V., Vijayan, S. e Baird, M. H. I. Hydrodynamics of a Vibrating Perforated Plate Extraction Column. The Canadian Journal of Chem. Eng., 69 : 212 - 221; 1991b.

Reid, Robert C., Prausnitz, John M. e Poling, Bruce E. The Properties of Gases & Liquids. 4^a edição, McGraw-Hill; 1988b.

Sege, G. e Woodfield, F. W. Pulse Column Variables. Chem. Eng. Progress, 50(8) : 396-402; 1954.

Sehmel, G. A. e Babb, A. L. Holdup Studies in Pulsed Sieve-Plate Solvent Extraction Column. I & E C Process Design and Development, 2(1) : 38-42; 1963.

Smoot, L. D., Mar, B. W. e Bab , A. L. Flooding Characteristics and Separation Efficiencies of Pulse Sieve-Plate Extraction Columns. Industrial and Engineering Chemistry, 51 (9): 1005-1010; 1959.

Thornton, J. D. Liquid-Liquid Extraction Part XIII: The Effect of Pulse Wave-Form and Plate Geometry on the Performance and Throughput of a Pulsed Column. Trans. Instn. Chem. Engrs., 35: 316-330; 1957b.

Tojo, K., Miyanami, K. e Yano, T. Design Method and Performance Characteristics of a Multistage Vibrating Disk Column (MVDC) Extractor. Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev., 19: 459 - 465; 1980b.

van Dijck, W. J. D. Process and Apparatus for Intimately Contacting Fluids. U. S. Patent n^o 2011186; 1935.

NOMENCLATURA

- A - Amplitude de pulsação, cm
- c - Constante definida pela Equação (31)
- d - Diâmetro das perfurações dos discos, cm
- d_d - Diâmetro dos discos, cm
- d_g - Diâmetro das gotas, cm
- D - Diâmetro da coluna, cm
- E - Parâmetro de dissipação de energia por unidade de massa da mistura líquida, definido pela Equação (19), $m^2 s^{-3}$
- f - Frequência de pulsação, s^{-1}
- Fr - Número de Froude
- g - Aceleração da gravidade, cm/s^2
- k_1, \dots, k_n - Parâmetros da correlação
- h - Espaçamento entre os discos, cm
- L - Comprimento da coluna, cm
- n - Número de resultados experimentais
- N - Número de discos
- p - Número de grupos adimensionais
- Q_c - Vazão da fase contínua, cm^3/s
- Q_d - Vazão da fase dispersa, cm^3/s
- r - Posto ("rank") da matriz dimensional das variáveis pertinentes
- r^* - Raio das gotas adimensionalizado
- Re - Número de Reynolds
- S - Área da seção transversal da coluna
- t - tempo arbitrário, s
- V_c - Velocidade da fase contínua, cm/s

V_d - Velocidade da fase dispersa, cm/s
 V_o - Velocidade característica, cm/s
 V_p - Velocidade de pulsação, cm/s
 V_r - Velocidade relativa, cm/s
 w - Variável definida pela Equação (38)
 We - Número de Weber
 x - Variável definida pela Equação (42)
 y - Variável definida pela Equação (43)
 z' - Posição de um dado ponto do eixo pulsante em relação a um referencial horizontal

Letras Gregas

α - Fração de área livre nos discos
 β - Variável definida pela Equação (6)
 $\Delta\rho$ - Diferença entre as massas específicas das duas fases, g/cm³
 ϵ - Fração de retenção da fase dispersa ("holdup")
 θ - Razão entre as velocidades da fase dispersa e contínua
 μ_c - Viscosidade da fase contínua, poise
 μ_d - Viscosidade da fase dispersa, poise
 ξ - Função definida pela Equação (65)
 π_1, \dots, π_{10} - Grupamentos adimensionais definidos pelas equações (54) a (63)
 ρ - Massa específica da mistura líquida, g/cm³
 ρ_c - Massa específica da fase contínua, g/cm³
 ρ_d - Massa específica da fase dispersa, g/cm³
 σ - Tensão interfacial, dyn/cm
 σ_c - Tensão superficial da fase contínua, dyn/cm

σ_d - Tensão superficial da fase dispersa, dyn/cm

σ_v - Tensão superficial da água, dyn/cm

ϕ - Fator de correção da velocidade relativa em relação à velocidade característica

χ - Parâmetro definido pela Equação (5), $m^{11/12} s^{-1}$

φ - Variável dada pela Equação (9)

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi(r^*)$ - Funções definidas pelas Equações (29), (30) e (32), respectivamente

ψ - Função definida pela Equação (66)